

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**LA PRODUCTION D'ÉLÉMENTS FABRIQUÉS EN BÉTON
DE POUDRES RÉACTIVES**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Olga-Mihaela Stoica

Sherbrooke (Québec) , CANADA

Novembre 1996

À mon père.....

RÉSUMÉ

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes d'abord intéressés à la caractérisation d'un BPR fabriqué au Québec à partir de matériaux locaux.

La recherche effectuée a porté sur deux problématiques différentes: la fabrication en conditions industrielles du BPR à partir de matériaux locaux, et la caractérisation des propriétés mécaniques des BPR ainsi produits en comparant leurs propriétés.

Par des études de laboratoire nous avons d'abord étudié :

- ◊ la compatibilité entre le ciment et le superplastifiant,
- ◊ l'influence de la finesse de mouture du ciment,
- ◊ la choix des matériaux pour fabriquer le BPR,
- ◊ l'optimisation de la composition du BPR.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la fabrication du BPR par :

- ◊ la réalisation de gâchées en camion-malaxeur,
- ◊ la réalisation de gâchées dans une usine de préfabrication,
- ◊ l'application d'un traitement thermique après la prise du béton,
- ◊ l'application d'une pression de serrage avant et pendant la prise du béton.

Cette étude nous a permis de voir le BPR passer le stade du laboratoire.

- ◊ Les matériaux qui ont été utilisés pour fabriquer les BPR tant au laboratoire qu'en usine sont tous des matériaux qui n'ont rien d'exceptionnel et qui sont facilement disponibles commercialement.
- ◊ La microstructure du BPR est le facteur qui influence surtout les performances mécaniques en compression et en flexion ;
- ◊ Pour augmenter les performances du BPR, il faut lui ajouter des fibres métalliques et/ou lui appliquer une pression de serrage avant et pendant la prise de même qu'il faut soumettre le BPR à un traitement thermique;
- ◊ Le confinement du BPR dans des tubes d'acier permet de réduire les coûts associés aux microfibrés ;
- ◊ Enfin, les BPR ont de très bonnes propriétés d'étanchéité et de durabilité, ce qui rend leur utilisation intéressante dans le stockage de déchets industriels et radioactifs.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord à mon directeur de recherche, Pierre-Claude Aïtcin pour sa patience , son assistance et ses encouragements.

Merci aux professeurs Arezki Tagnit-Hamou, Kamal Khayat et Richard Gagné pour leur conseils .

Merci à la direction de la compagnie Handy Chemicals Ltée, qui m'a appuyé financièrement et à son président Nelu Spiratos pour son "sprijin moral".

Merci à tous ceux qui m'ont apporté une aide, particulièrement Irène Kelsey-Lévesque, Éric Dallaire, Claude Poulin, Ghislaine Luc, Claude Faucher, Gilles Breton, Pierre-Claude Nkinamubanzi et Mustapha Kessal.

.....À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire, j'exprime toute ma gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
1. INTRODUCTION.....	1
2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
2.1. Historique des matériaux cimentaires à très haute résistance.....	3
2.2. Principes généraux pour fabriquer des BPR.....	4
2.2.1. Principes généraux.....	4
2.2.2. Formule de base des BPR.....	5
2.3. Application des principes de fabrication du BPR.....	6
2.3.1. Amélioration de l'homogénéité.....	6
2.3.1.1. La taille du gros granulat.....	6
2.3.1.2. Suppression de l'aurole de transition.....	7
2.3.1.3. Amélioration des propriétés mécaniques de la pâte.....	7
2.3.1.4. Limitation du dosage en sable.....	7
2.3.2. Amélioration de la compacité.....	8
2.3.2.1. Optimisation du mélange granulaire.....	8
2.3.2.2. Critères des choix des composants du mélange granulaire.....	9
2.3.2.3. Le pressage avant et pendant la prise.....	10
2.3.2.4. Amélioration de la microstructure par traitement thermique.....	11
2.3.3. Amélioration de la ductilité par l'emploi des microfibrilles ou le confinement de béton.....	15
3. CHOIX DES MATÉRIAUX, NORMES ET MÉTHODES D'ESSAIS.....	17
3.1. Matériaux utilisés pour fabriquer des BPR.....	17
3.1.1. Le ciment.....	17
3.1.1.1. Caractéristiques physiques du ciment Type 20M.....	18
3.1.1.2. Caractéristiques chimiques du ciment Type 20M.....	18
3.1.2. La fumée de silice.....	19
3.1.3. Le superplastifiant.....	21
3.1.4. Le sable.....	22
3.1.5. Le quartz broyé.....	22
3.1.6. Les fibres d'acier.....	22
3.1.7. L'eau de gâchage.....	23
3.2. Normes et méthodes d'essais.....	23
3.2.1. Caractérisation du ciment.....	24

3.2.2.	Rhéologie et point de saturation	25
3.2.3.	Essais d'ouvrabilité.....	25
3.2.4.	Le ressuage d'un BPR	26
3.2.5.	Temps de prise d'un BPR.....	26
3.2.6.	L'effet du type de mûrissement sur la résistance en compression sur cubes.....	27
3.2.7.	Calorimétrie	28
3.2.8.	Compacité d'une pâte de BPR.....	29
3.2.9.	Essais mécaniques sur BPR	29
3.2.9.1.	Compression uniaxiale avec asservissement en déformation	29
3.2.9.2.	Flexion avec asservissement en déformation	30
3.2.10.	Essais de durabilité	31
3.2.10.1.	Perméabilité aux ions chlore	31
3.2.10.2.	Résistance à l'abrasion mécanique	31
3.2.10.3.	Résistance aux cycles de gel et dégel	32
3.2.10.4.	Résistance à l'écaillage	33
4.	ESSAIS EN LABORATOIRE.....	35
4.1.	Essais de compatibilité ciment-superplastifiant et point de saturation.....	35
4.2.	Effet de la finesse Blaine sur le point de saturation du ciment.....	36
4.3.	Essais d'optimisation sur BPR.....	38
4.3.1.	Essais d'optimisation de la quantité de superplastifiant.....	38
4.3.2.	Essais d'optimisation de mise en place par vibration.....	38
4.3.3.	Essais d'optimisation sur la procédure du malaxage et la consistance du mélange.....	39
4.4.	Détermination du temps de prise d'une pâte de BPR.....	41
4.5.	Essais calorimétriques.....	42
4.5.1.	Effet de la finesse Blaine et du surdosage en superplastifiant sur des ciments Type 20M.....	42
4.5.2.	Ciment Type 20M avec de fumée de silice	44
4.5.3.	Essais calorimétriques sur BPR.....	45
4.6.	Effet du type de mûrissement sur BPR.....	47
4.6.1.	La vitesse d'élévation de la température et du refroidissement.....	48
5.	PROCÉDURES POUR LA FABRICATION DU BPR.....	49
5.1.	Formulation du BPR.....	49
5.1.1.	Fabrication du BPR en camion-malaxeur	49
5.1.2.	Fabrication du BPR à l'usine de préfabrication.....	49
5.2.	Les séquences de malaxage en camion-malaxeur	50
5.2.1.	Mélange sans quartz broyé.....	50
5.2.2.	Aspect du mélange sans quartz broyé.....	51
5.2.3.	Mélange avec quartz broyé.....	51
5.2.4.	Aspect du mélange avec quartz broyé	52
5.3.	Séquence de malaxage à l'usine	52
5.3.1.	Aspect du mélange fabriqué en usine.....	53
5.4.	Confection et mûrissement du BPR.....	53

5.4.1.	Confection des éprouvettes.....	53
5.4.2.	Programme de mûrissement.....	54
6.	ESSAIS SUR LES BPR FABRIQUÉS DANS LE CAMION-MALAXEUR ET L'USINE.....	68
6.1.	Essais mécaniques sur BPR	69
6.1.1.	L'influence de la compacité du BPR sur sa résistance en compression.....	69
6.1.2.	Essais en compression sur carottes.....	71
6.1.3.	Module élastique et coefficient de Poisson.....	71
6.1.4.	Compression uniaxiale avec asservissement en déformation	72
6.1.5.	Flexion sur poutres.....	73
6.2.	BPR confiné.....	76
6.2.1.	BPR confiné à l'usine	76
6.2.2.	BPR confiné au laboratoire.....	79
7.	RÉSULTATS ET ANALYSE DES ESSAIS DE DURABILITÉ SUR BPR.....	86
7.1.	Perméabilité aux ions chlore	86
7.2.	Résistance à l'abrasion mécanique	87
7.3.	Résistance aux cycles de gel et dégel	89
7.4.	Résistance à l'écaillage	90
8.	MICROSTRUCTURE DU BPR EXAMINÉE AU MEB.....	92
8.1.	Microscope électronique à balayage (MEB).....	92
8.2.	Analyse au MEB de la pâte durcie du BPR	94
	CONCLUSIONS.....	105
	BIBLIOGRAPHIE	107

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	: Relation semi-quantitative : Résistance/ Porosité/Taux de cristallisation	12
Figure 2.2	: Diagramme de phases des C-S-H.....	13
Figure 2.3	: Variation du taux de dessiccation en fonction de la température	14
Figure 2.4	: Couture des granulats par embiellage	15
Figure 3.1	: Photo d'essai de maniabilité en laboratoire avant les essais en grande échelle.....	34
Figure 3.2	: Principe d'une analyse calorimétrique.....	29
Figure 4.1	: Point de saturation en superplastifiant du ciment Type 20M et du ciment Type 10.....	36
Figure 4.2	: Point de saturation en superplastifiant du ciment Type 20M pour différentes finesses Blaine	37
Figure 4.3	: Courbes calorimétriques -L'effet de la finesse Blaine et du pourcentage en superplastifiant sur une ciment Type 20 M à E/C=0,28.....	43
Figure 4.4	: Courbes calorimétriques du ciment Type 20M-A et du Type 20M-B avec 32% fumée de silice à E/C=0,28 et 1,7 % en superplastifiant	44
Figure 4.5	: Effet de la fumée de silice sur le dégagement de chaleur des pâtes de ciment [19].....	45
Figure 4.6	: Courbes calorimétrique du BPR à E/C=0,28 et 1,7% de superplastifiant.....	46
Figure 5.1	: Dosage et chargement du camion-malaxeur - Hall de l'université.....	57
Figure 5.2	: Fabrication du BPR en camion-malaxeur (séquence d'introduction du superplastifiant par fût verseur).....	58
Figure 5.3	: Aspect de la pâte du BPR1 après l'introduction des fibres d'acier dans le camion-malaxeur.....	58
Figure 5.4	: Aspect de la pâte BPR1, sans quartz broyé (camion-malaxeur).....	59
Figure 5.5	: Aspect de la pâte BPR 2, avant l'introduction des fibres d'acier.....	60
Figure 5.6	: Fabrication des deux poutres en BPR 2, et consolidation par vibration interne ...	61
Figure 5.7	: Hall d'essais de l'usine de préfabrication, avec préparation des coffrages sur tables vibrantes	62
Figure 5.8	: L'intérieur du malaxeur "Couvrot" utilisé à l'usine	62
Figure 5.9	: Aspect du mélange BPR 3, après le versement d'une partie des fibres.....	63
Figure 5.10	: Aspect de la pâte à la sortie du malaxeur	63
Figure 5.11	: Aspect de la pâte BPR 3, une heure après la fin du malaxage.....	64
Figure 5.12	: BPR confiné en usine- mécanisme de pressage par serrage.....	66
Figure 5.12a:	BPR 3 confiné en usine dans deux tubes d'acier et vibré avec l'aiguille vibrante.....	65
Figure 5.12b:	Pressage par serrage du BPR3 en usine.....	65
Figure 5.13	: Mécanisme de pressage et de confinement en laboratoire.....	67
Figure 6.1	: Presse MTS de 5000 kN	84
Figure 6.2a.	: Photo du montage utilisé lors des essais en flexion.....	85
Figure 6.2b.	: Photo du montage utilisé lors des essais en flexion et en compression	85
Figure 6.3	: Courbe contrainte-déflexion pour le BPR 2-fibré	73
Figure 6.4	: Influence du mûrissement sur le contrainte maximale en flexion.....	75
Figure 6.5	: Courbe contrainte-déflexion pour le BPR 2-fibré	75

Figure 6.6 :	BPR 3 confiné-Résistance en compression en fonction du pressage	78
Figure 6.7 :	Courbes contrainte-déformation BPR 3: confiné-pressé et non-pressé.....	78
Figure 6.8 :	Résistance en compression du BPR 2 confiné en fonction du dosage en fibres et du pressage	80
Figure 6.9 :	Résistance en compression en fonction du confinement et de la présence de fibres	81
Figure 6.10a:	BPR confiné et pressé, fibré et non fibré (tube e=1,5 mm-bas)	81
Figure 6.10b:	BPR confiné et pressé, fibré et non fibré (tube e = 1,5 mm-haut).....	82
Figure 6.10c:	BPR confiné fibré et non fibré, pressé et non pressé, (tube e=3mm-bas).....	82
Figure 6.10d:	BPR confiné fibré et non fibré, pressé et non pressé, (tube e=3mm-haut)	83
Figure 7.1 :	Profondeur d'abrasion en fonction du temps.....	89
Figure 8.1 :	Représentation schématique du MEB	93
Figure 8.2 :	Représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface d'un échantillon.	94
Figure 8.3a :	BPR confiné-pressé : vue de la pâte (1700X).....	96
Figure 8.3b :	BPR confiné non pressé : vue de la pâte (1700X)	96
Figure 8.4a :	BPR confiné-pressé : vue de la pâte (700X).....	97
Figure 8.4b :	BPR confiné non pressé : vue de la pâte (700X)	97
Figure 8.5a :	BPR confiné-pressé : l'interface pâte-granulat (2200X)	98
Figure 8.5b :	BPR confiné non pressé : l'interface pâte-granulat (2200X).....	98
Figure 8.6a :	BPR confiné-pressé : vue générale (50X).....	99
Figure 8.6b :	BPR confiné non pressé : vue générale (50X)	99
Figure 8.7a :	BPR confiné-pressé-fibré : l'interface pâte-fibre (95X).....	100
Figure 8.7b :	BPR confiné non pressé-fibré : l'interface pâte-fibre (95X)	100
Figure 8.8a :	BPR confiné-pressé-fibré : l'interface fibre-pâte (100X).....	101
Figure 8.8b :	BPR confiné non pressé-fibré : l'interface fibre-pâte (100X)	101
Figure 8.9 :	BPR confiné-fibré, pressé : l'interface fibre-pâte(200X).....	102
Figure 8.10a:	BPR confiné, pressé -fibré : vue générale(33X).....	103
Figure 8.10b:	BPR confiné non pressé-fibré : vue générale(33X).....	103
Figure 8.11a:	BPR confiné-pressé-fibré : vue générale (densité et orientation de fibres) (15X).....	104
Figure 8.11b:	BPR confiné non pressé-fibré : vue générale (densité et orientation de fibres) (15X).....	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice utilisée.....	20
Tableau 3.2	Caractéristiques physiques de la fumée de silice utilisée.....	20
Tableau 3.3	Caractéristiques du superplastifiant utilisé.....	21
Tableau 3.4	Caractéristiques chimiques du sable de quartz utilisé.....	22
Tableau 3.5	Caractéristiques chimiques du ciment Type 20M utilisé.....	24
Tableau 3.6	Composition de Bogue.....	25
Tableau 3.7	Formulation du BPR.....	26
Tableau 3.8	Formulation du BPR 2.....	27
Tableau 4.1	Étalements mesurés sur la table à chocs.....	38
Tableau 4.2	Formulation du BPR 7.....	39
Tableau 4.3	Essais en compression sur le BPR 7.....	39
Tableau 4.4	La formulation du BPR 1 et du BPR 2.....	40
Tableau 4.5	Aspect et consistance des mélanges.....	41
Tableau 4.6	Temps de prise du BPR et du ciment Type 20M.....	42
Tableau 4.7	Résistance en compression sur cubes des BPR.....	47
Tableau 4.8	Résistance en compression sur cubes des BPR (effet de la vitesse d'élevation et du refroidissement de la température).....	48
Tableau 5.1	Formulation massique des mélanges de BPR.....	50
Tableau 5.2	Programme de mûrissement pour les éprouvettes cylindrique.....	55
Tableau 5.3	Programme de mûrissement pour les essais de gel / dégel, écaillage et flexion.....	56
Tableau 6.1	Résistance en compression et compacité à 22 heures du BPR 3 fabriqué en usine.....	69
Tableau 6.2	Résistance à la compression en fonction de la compacité.....	70
Tableau 6.3	Résistance à la compression des carottes de BPR.....	71
Tableau 6.4	Module d'élasticité et coefficient de Poisson.....	72
Tableau 6.5	Compression avec asservissement en déformation.....	73
Tableau 6.6	Flexion en 4 points sur BPR.....	74
Tableau 7.1	Essais de perméabilité aux ions de chlore.....	87
Tableau 7.2	Échelle de perméabilité proposée par Whiting.....	87
Tableau 7.3	Matériaux testés et modalités des essais.....	88
Tableau 7.4	Formulation de BHP avec et sans fibres.....	88
Tableau 7.5	Facteur de durabilité des BPR des essais.....	90
Tableau 7.6	Résistance au cycles de gel-dégel en fonction du facteur de durabilité relative après 300 cycles (Neville).....	90
Tableau 7.7	Résistance à l'écaillage du BPR.....	91

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les bétons à poudres réactives (BPR) constituent une nouvelle famille de matériaux de construction dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires. Le BPR est un matériau cimentaire à matrice à ultra haute performance. Le BPR est caractérisé par une forte teneur en fumée de silice et par un très faible rapport eau/ciment. C'est un matériau dont les plus gros granulats, en l'occurrence du sable, ont une dimension maximale d'environ 600 μm . Pour le fabriquer on utilise des matériaux tels que : du ciment Portland, du sable, de la fumée de silice, un superplastifiant et de l'eau. On utilise également des fibres d'acier et du quartz broyé pour améliorer certaines caractéristiques de ce béton telles que la résistance et la ductilité. Il se distingue fondamentalement des autres bétons par la très petite taille des particules granulaires et par le pourcentage élevé des composants ayant une activité hydraulique.

C'est la Direction Scientifique de Bouygues (France) qui a mis au point le béton de poudres réactives. Ce nouveau concept de béton ductile à haute performance a été développé à partir de l'expérience acquise dans la formulation et la mise en oeuvre de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de béton à haute performance.

Les principes de base qui ont conduit au développement du BPR sont les suivants :

- ◊ Amélioration de l'homogénéité du matériau par la suppression des gros granulats.
- ◊ Amélioration de la compacité par l'optimisation de la composition granulaire, et lorsque cela est possible, par application d'un pressage avant et pendant la prise.
- ◊ Amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- ◊ Amélioration de la ductilité par l'ajout des fibres métalliques
- ◊ Fabrication et mise en place aussi proches que possible que celles des bétons conventionnels.

Parallèlement aux travaux en cours à la Direction Scientifique de Bouygues, à l'Université de Sherbrooke, le Professeur Aïtcin a initié un projet de recherche qui consistait à fabriquer du

BPR à l'aide de matériaux locaux ainsi qu'à développer certains aspects de ce nouveau matériau. Le premier objectif de ce projet de recherche a consisté à utiliser un tel béton dans des éléments structuraux qui ne comportent pas d'armatures passives traditionnelles, car l'absence de ségrégation et la bonne ouvrabilité facilitent sa mise en oeuvre et permettent donc la réalisation d'éléments minces et de géométrie complexe. L'une des applications de cette propriété est de préfabriquer de tels éléments dans une usine de préfabrication.

Le deuxième objectif du projet de recherche consiste à comparer les caractéristiques rhéologiques, mécaniques de même que la durabilité et la microstructure d'un BPR ainsi fabriqué.

La première partie de ce mémoire est d'abord consacrée à une revue bibliographique portant sur l'histoire des bétons à très haute résistance de même que sur les principes généraux de fabrication des BPR. Elle traite ensuite du choix des matériaux, des méthodes d'essais et des normes utilisés lors de notre travail de recherche.

La deuxième partie présente d'abord les essais préliminaires effectués en laboratoire, et les procédures de fabrication du BPR. Elle présente ensuite les résultats des essais, leur analyse, l'analyse microstructurale des BPR, et enfin une conclusion et certaines recommandations.

CHAPITRE 2

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Historique des matériaux cimentaires à très haute résistance

Plusieurs voies de recherche ont été poursuivies dans le but d'obtenir des performances mécaniques élevées à partir de matériaux à matrices cimentaires. Dès les années 1930, Eugène Freyssinet a démontré l'intérêt du pressage des bétons frais pendant leur prise pour en améliorer la résistance [1]. Dans les années 60, des petits échantillons de pâte, de ciment et de mortier ont été réalisés par pressage et chauffage en atmosphère saturée, c'est-à-dire en conditions hydrothermales. On a alors mesuré sur les échantillons ainsi obtenus des résistances en compression allant jusqu'à 650 MPa [2]. Ces expériences ont permis de démontrer que la résistance des pâtes cimentaires n'était que faiblement utilisée dans les bétons traditionnels et même dans les bétons dits à haute performance.

Des microbétons à matrice granulaire compacte (DSP), fortement dosées en superplastifiant et en fumée de silice et incorporant des granulats de grande dureté (bauxite, calcinée ou granite) ont été développés [3]. Ce matériau est performant en compression mais sa résistance à la traction est médiocre et sa ductilité est très faible.

Une autre avenue de recherche qui a été explorée concerne les mortiers contenant des polymères, mortiers que l'on a appelé MDF (Macro Defect Free) [4]. Ces mortiers fabriqués à partir de ciment alumineux ont une résistance en traction très élevée. Les MDF sont fabriqués avec des polymères solubles qui perdent une partie de leurs propriétés liantes en cas d'exposition prolongée à l'humidité, toutefois les conditions de fabrication sont très délicates, et le produit est peu ductile. Les recherches se poursuivent pour limiter la sensibilité des MDF à l'eau par hydrofugation et pour améliorer la ductilité par l'introduction des fibres non métalliques, mais ces procédures augmentent encore les difficultés de fabrication [5].

Pour pallier à la faible ductilité des matrices cimentaires, on a développé des bétons que l'on a appelé SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete). On remplit les coffrages avec des fibres en vrac et on l'injecte un mortier très fluide. Cette technique permet d'améliorer fortement la ductilité du matériau résultant, mais elle nécessite une quantité importante de fibres (7 % à 15 % en volume selon la forme et la méthode de mise en place). Toutefois pour assurer un bon remplissage, le coulis doit être très fluide, ce qui nécessite l'utilisation d'un rapport eau/ciment élevé ce qui est à l'inverse d'une matrice cimentaire de haute performance où ce rapport doit être faible. On peut cependant corriger la situation en ayant recours à de forts dosages en superplastifiant pour diminuer le rapport E/C.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, l'emploi des matériaux à matrice cimentaire à ultra-hautes performances a été limité jusqu'à présent à des usages non structuraux. Pour la construction des structures, telles que des poutres, des dalles, des poteaux, des éléments de treillis etc., il est nécessaire de pouvoir disposer d'un matériau ductile, c'est-à-dire apte à supporter des déformations plastiques importantes aux états limites ultimes.

Ces bétons appelés BPR qui sont des matériaux caractérisés par une forte teneur en fumée de silice et un rapport eau/ciment très faible peuvent répondre à ces exigences. Des fibres métalliques viennent s'ajouter comme inclusion particulière pour augmenter les caractéristiques mécaniques de traction et de flexion. Pour rendre les BPR plus performants, on peut aussi les presser avant et pendant la prise, et leur microstructure peut être enfin améliorée par des traitements thermiques. Tout cela donne un béton très résistant, efficace et somme toute d'un prix de revient abordable au regard de ses performances.

2.2 Principes généraux pour fabriquer des BPR

2.2.1 Principes généraux

Pour optimiser les caractéristiques du BPR, il faut améliorer la microstructure en passant en revue tous les facteurs qui peuvent influencer la matrice cimentaire. Les principes qui ont conduit au développement du BPR sont les suivants :

- Suppression des gros granulats pour augmenter l'homogénéité du matériau.

- Amélioration de la compacité par optimisation de la composition granulaire et, lorsque cela est possible, par l'application d'un pressage avant et pendant la prise.
- Amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- Ajout de fibres métalliques pour améliorer la ductilité.
- Fabrication et mise en place aussi proches que possible des bétons traditionnels.

Les trois premiers principes de base (amélioration de l'homogénéité, amélioration de la compacité, amélioration de la microstructure) conduisent à l'obtention d'une matrice très résistante en compression mais dont la ductilité n'est pas améliorée par rapport à un mortier traditionnel. L'emploi des fibres métalliques permet d'améliorer la résistance en traction et d'obtenir la ductilité requise.

Les dispositions concernant la fabrication (pressage et traitement thermique) sont des mesures optionnelles permettant d'améliorer les performances. Ces mesures doivent être évaluées en fonction des difficultés technologiques qu'elles présentent (pressage) ou de leur coût (traitement thermique).

2.2.2 Formule de base des BPR

La formule de base des BPR exprimée en proportions massiques par rapport à la quantité de ciment est la suivante :

- Ciment Portland : 1
- Sable : 1,1
- Fumée de silice : 0,25
- Silice de précipitation : 0,01
- Superplastifiant (Polyacrylate) : 0,01
- E/C (Eau totale) : 0,1 à 0,15
- Fibres d'acier : diamètre 0,15 mm , longueur de 3 à 12 mm
fonction de l'application (optionnel)
- Quartz broyé : environ 0,75 de la masse du sable (optionnel)

2.3 Application des principes

2.3.1 Amélioration de l'homogénéité

Le béton traditionnel est un matériau hétérogène dans lequel les granulats (sable et gros granulat ont un module d'élasticité la plupart du temps égal ou supérieur à 70 GPa) constituent un squelette enrobé dans une pâte qui a un module d'élasticité beaucoup plus faible d'environ 18 à 22 GPa. A cette hétérogénéité s'ajoute une hétérogénéité chimique manifestée par un retrait chimique de la pâte pendant le durcissement, retrait empêché par le squelette granulaire chimiquement inerte. En outre, le coefficient de dilatation thermique de la pâte durcie est de trois à quatre fois inférieur à celui des granulats quartzeux ($\sim 13,5 \times 10^{-6}$ m/m). Ce sont tous ces problèmes liés à l'hétérogénéité qui expliquent en partie le comportement mécanique médiocre d'un béton traditionnel. Comme ces problèmes d'hétérogénéité sont considérablement réduits dans le cas des BPR, ceux-ci ont des propriétés mécaniques nettement améliorées par rapport aux bétons traditionnels.

Pour améliorer l'homogénéité du BPR, les facteurs suivants ont une grande importance:

2.3.1.1 La taille du gros granulat

Sous une charge uniaxiale, le champ des contraintes de cisaillement à l'interface d'une inclusion rigide sphérique dans une matrice homogène est maximal à 45°, il en va de même pour les contraintes de traction normales à l'effort principal qui se développent au voisinage de l'équateur. Sous l'application d'un effort axial, la pâte, qui enrobe un granulat (comparé à l'inclusion sphérique), se fissure dans les zones plus tendues et/ou cisailées à l'interface pâte-granulat dans la zone appelée "auréole de transition". La dimension de ces fissures est directement proportionnelle au diamètre de l'inclusion. Le BPR, avec une réduction par un facteur d'environ 50 de la taille du plus gros granulat (600 μ m au lieu de 20mm) va présenter une réduction considérable de la taille des microfissures d'origine:

- mécanique (charges extérieures),
- chimique (auto-dessiccation conduisant à un retrait de la pâte),

- thermomécanique (dilatations différentielles entre la pâte et la granulats en cas de traitement thermique).

2.3.1.2 Suppression de l'auréole de transition

De nombreuses recherches ont montré que l'auréole de transition est supprimée quand la pâte cimentaire a une teneur élevée en fumée de silice. En plus, dans le cas de traitement thermique, une liaison chimique s'établit entre la pâte et le sable siliceux.

2.3.1.3 Amélioration des propriétés mécaniques de la pâte

La réduction de la taille des microfissures et la suppression de l'auréole de transition va contribuer à augmenter le module d'élasticité de la pâte (entre 50 GPa et 75 GPa) ce qui fait que l'effet d'hétérogénéité mécanique disparaît presque totalement .

2.3.1.4 Limitation du dosage en sable

Dans un béton traditionnel les granulats (sable et gravier) sont les composants majoritaires en volume et ils forment un squelette rigide de grains en contact les uns des autres. Une partie importante du retrait de la pâte est bloquée par le squelette granulaire ce qui conduit à une augmentation de la porosité [6].

Dans les BPR, le volume de pâte est volontairement supérieur d'au moins 20% 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 [6]. Ainsi, dans le BPR les grains de sable les plus gros forment un ensemble d'inclusions enrobées dans une matrice continue, donc le retrait d'ensemble n'est plus bloqué par le squelette rigide des gros granulats comme il l'est dans les bétons traditionnels, les grains pouvant donc être entraînés par la pâte et se déplacer les uns par rapport aux autres.

2.3.2 Amélioration de la compacité

2.3.2.1 Optimisation du mélange granulaire

Un facteur important qui mène à une bonne compacité est l'optimisation du mélange granulaire. Il est toujours difficile d'atteindre une bonne compacité à cause des raisons suivantes:

- Les BPR comportent plus de trois classes des composantes granulaires, qui ont des formes différentes et l'effet de paroi est important. Il est donc difficile de modéliser un tel mélange granulaire par une approche mathématique.
- Même en employant un superplastifiant, il est toujours difficile d'atteindre un état complètement dispersé des grains de ciment.
- Les composés granulaires de très petite taille (fumée de silice et silice de précipitation) sont partiellement agglomérés et adsorbent de l'eau, ce qui leur donne une taille supérieure à leur taille réelle.

Pendant pour obtenir l'optimum granulaire on applique les principes suivants:

- Les différentes classes granulaires utilisées pour fabriquer le BPR doivent avoir un fuseau granulaire étroit.
- Les classes granulaires doivent être séparées en choisissant un rapport élevé supérieur à 13, entre les diamètres moyens de deux classes granulaires consécutives.
- On doit étudier la compatibilité ciment - superplastifiant.
- On doit déterminer le dosage optimal en ciment - superplastifiant en effectuant une analyse de la rhéologique.
- On doit optimiser le malaxage.

Le paramètre principal d'évaluation d'un mélange granulaire, c'est la quantité d'eau qui doit être ajoutée à la poudre pour obtenir un bonne fluidification; on parlera par la suite de la demande en eau .

Il est bon de remarquer que le rapport E/C (eau/ciment) peut varier pour un BPR, et qu'en réalité, l'indice des vides du mélange granulaire correspond à la somme de la demande en eau et de l'air occlus.

Un paramètre plus global utilisé pour caractériser la compacité d'un BPR est la densité relative d_0/d_s [densité du béton au démoulage et la densité solide du mélange granulaire supposé compact (sans eau et air)].

En règle générale, on trouve que l'optimum pratique de teneur en eau est légèrement supérieur à l'optimum théorique pour compenser les hétérogénéités de dosage et permettre une mise en place plus aisée du béton dans les coffrages grâce à une meilleure rhéologie.

2.3.2.2 Critères de choix des composantes du mélange granulaire

L'énoncé des critères de choix de chacun des composantes du mélange granulaire est le suivant:

- Le sable doit avoir un diamètre moyen de 300 μm . Il est obtenu par tamisage d'un sable obtenu par concassage (angulaire), ou sable naturel (sphérique).
- Le ciment doit avoir une faible teneur en C_3A , d'un point de vue côté rhéologique il peut y avoir certaines restrictions concernant une prise très lente ou une demande en eau trop élevée.
- Le superplastifiant peut être à base de polyacrylate ou de polynaphtalène sulfonate qui ne présente pas trop d'effet retardeur, qui pourrait nuire à certaines applications pratiques. Les superplastifiants qui ne sont pas compatibles avec le ciment donnent toujours de très mauvais résultats.

Il faut toujours déterminer le dosage optimum de superplastifiant car un surdosage peut mener à plusieurs inconvénients tels que la dégradation de la rhéologie, le retard de prise et de durcissement et un coût plus élevé.

La fumée de silice possède trois fonctions principales :

1. Elle remplit les vides entre les particules de classe granulométrique supérieure grâce à une grande finesse de 14 000 à 22 000 m^2/kg .
2. Elle améliore la rhéologie, en lubrifiant le BPR grâce à la parfaite sphéricité de ses particules.

3. Elle produit des hydrates secondaires par réaction pouzzolanique avec la portlandite produite lors de l'hydratation primaire .

On doit chercher à utiliser de la fumée de silice contenant le moins possible d'impuretés, notamment le carbone.

- Le rapport pondéral fumée de silice - ciment est donné par l'optimum stoechiométrique correspondant à la consommation complète de la portlandite produite par l'hydratation totale du ciment, bien que presque toujours l'hydratation du ciment est incomplète .
- Le quartz broyé est constitué de grains ayant un diamètre moyen de 15 μm , on n'en utilise que dans les BPR traités thermiquement pour convertir les hydrates amorphes en tobermorite. Le dosage est donné par le calcul stoechiométrique.

Pour un BPR non soumis à un traitement thermique, le quartz broyé est inerte ou faiblement réactif .

La silice de précipitation, du fait de sa petite taille (200 Å) peut être utilisée car elle a une réactivité plus importante que la fumée de silice pour l'initiation des transformations chimiques. Sa présence augmente la demande en eau du mélange parce que ses particules sont fortement agglomérées. On en utilise de l'ordre de 1 % par rapport à la masse du ciment, la demande supplémentaire en eau est alors relativement faible par rapport à celle du ciment, et elle apporte une contribution significative aux performances du BPR.

2.3.2.3 Le pressage avant et pendant la prise

Pour augmenter la résistance en compression, il faut augmenter la densité relative. On peut obtenir une augmentation de la densité relative en réduisant la quantité d'air occlus et en essorant une partie de l'eau de gachage. L'air disparaît par serrage en quelques secondes. 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 .

La compensation du retrait chimique pourra être acquise en maintenant la pression de serrage pendant la prise du béton, soit de 6 à 12 heures après le malaxage, ce qui permet de refermer une partie de la porosité qui apparaît. On verra toujours apparaître des microfissures dues à la rupture des premiers ponts rigides qui ont été formés suite à l'expansion des granulats lors de la suppression de l'effort de serrage. Lors du durcissement ultérieur du BPR, ces fissures vont se cicatriser.

L'ensemble des effets de pressage mentionnés permet d'atteindre des densités relatives de 0,90, correspondant à des résistances en compression très élevées. Par contre, la résistance en traction n'est pas améliorée par le pressage.

2.3.2.4. 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 en atmosphère ambiante humide (vapeur d'eau), ou sèche (air chaud) à la pression atmosphérique.

Les BPR, qui contiennent des fumées de silice, présentent une forte réaction pouzzolanique à une température comprise entre 65°C et 90°C, 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 ayant des propriétés mécaniques médiocres (C_2SH_n), il faut définir les conditions stoechiométriques et thermodynamiques favorisant la formation d'un pourcentage optimal d'hydrates ayant les meilleures propriétés mécaniques possible.

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.

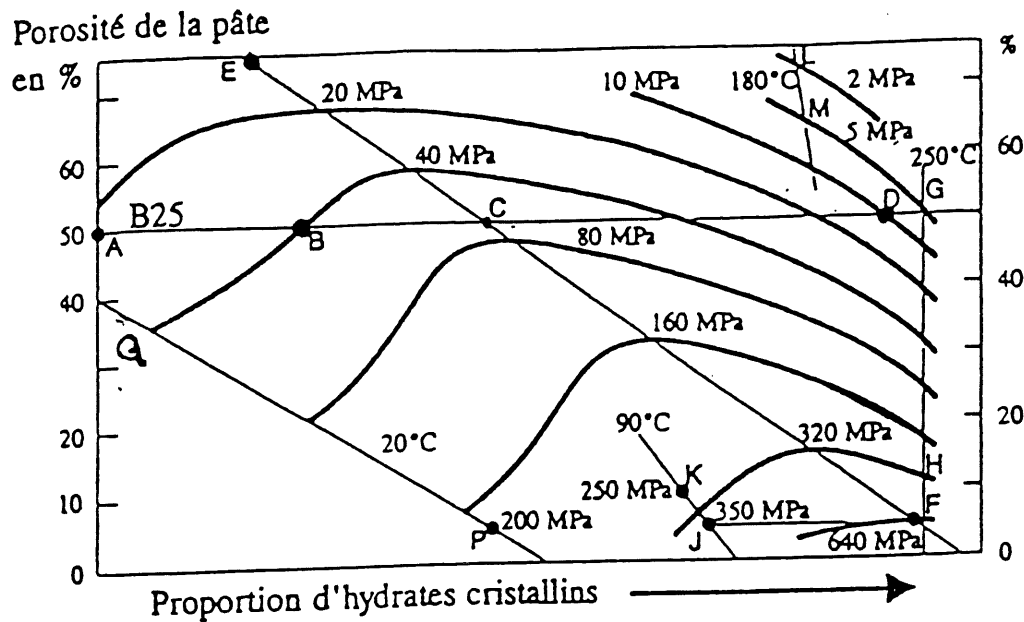


Figure 2.1. Relation semi-quantitative : Résistance / Porosité / Taux de cristallisation [13]

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 à 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.

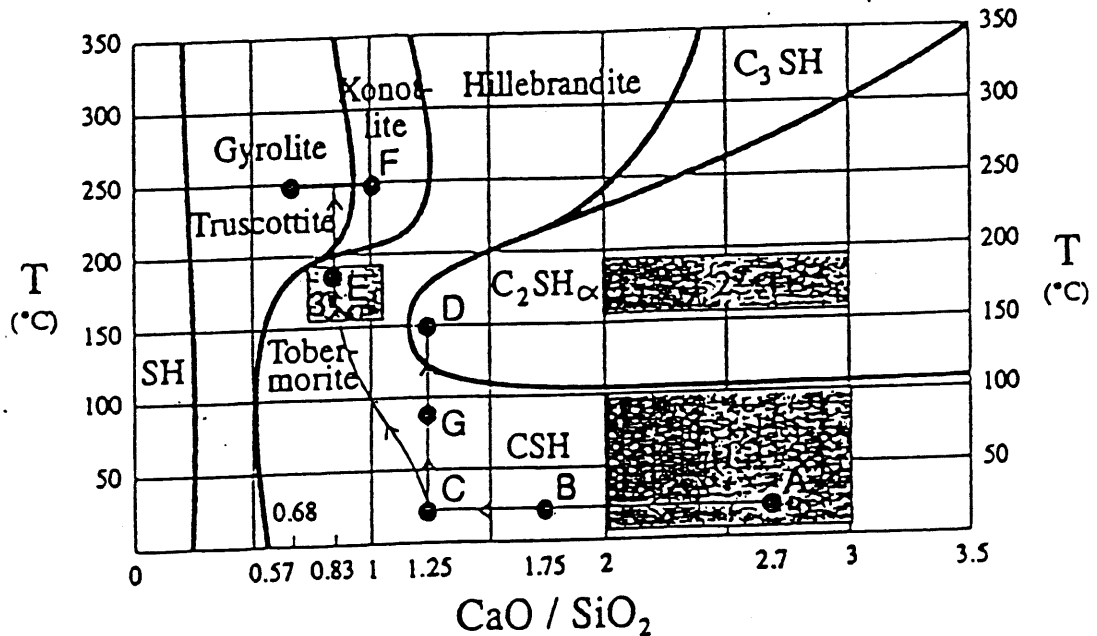


Figure 2.2 Diagramme de phases des CSH [14]

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 SiO₂, noté "rapport C/S".

Un ciment ordinaire a un C/S de l'ordre 2,7 (point A de la region 1), après l'hydratation le C/S tombe à 1,75 (point B), car lors de l'hydratation il se forme de portlandite-CH dont le rapport C/S est infini. Si on chauffe la pâte de ciment au dessus de 105°C, du C₂SH_α(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 110°C on ne peut pas éviter la formation de C₂SH_α (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 $180 \div 200^\circ\text{C}$, on observe une amélioration modérée de la résistance en compression. Pour passer de point C au point E, il faut encore extraire de l'eau parce que le rapport C/H ($C=\text{CaO}$ et $H=\text{H}_2\text{O}$) de la tobermorite formée est égal 1, et est voisin de celui des hydrates .

Si on continue à chauffer audessus de 200°C , on transforme la tobermorite ($\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$) en xonotlite $\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$ (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.

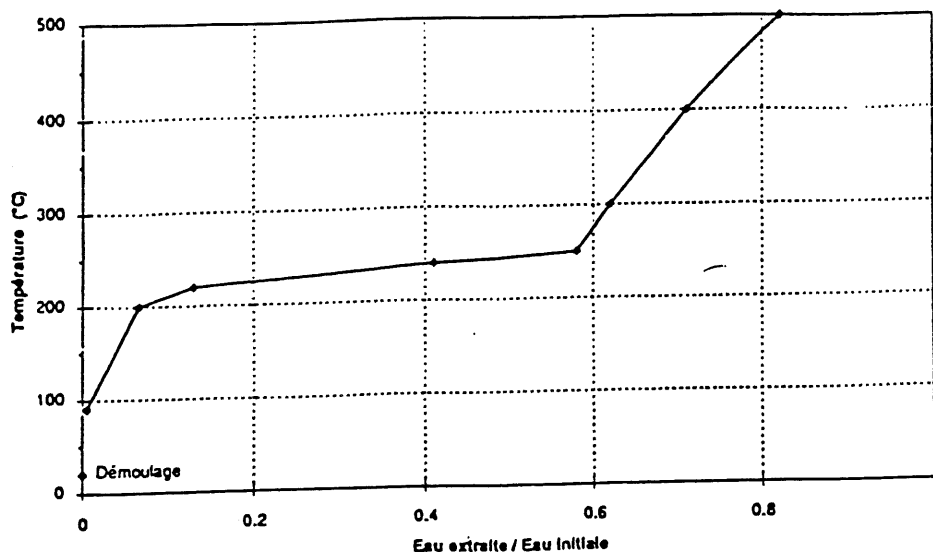


Figure 2.3 . Variation du taux de dessiccation en fonction de la température

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

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

Au contraire, la formation de la xonotlite est accompagnée d'une dessiccation intense, elle 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, on se trouve donc à améliorer aussi les résistances.

2.3.4. Amélioration de la ductilité par l'emploi de microfibres et par confinement

Les matrices de BPR ont une très bonne résistance en compression, mais une faible énergie de fracturation (quelques dizaines de J/m²). En ce sens ce sont des matériaux très semblables aux céramiques industrielles. Pour compenser ce désavantage, 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 va contrôler l'apparition de la fissure et ne va pas permettre l'augmentation et la propagation de cette fissure[12]. Donc, les fibres doivent avoir un module d'élasticité élevé.

Quand on choisit les fibres il faut définir avec beaucoup de soins les dimensions des fibres utilisées: la longueur de la fibre doit respecter la relation suivante :

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

Où D_{\max} représente la taille maximale du granulats, et L est la longueur de la fibre. De cette manière on peut "coudre" la fissure et réaliser un ancrage efficace par "embiellage". La condition de longueur est donnée par l'ancrage court de la fibre. Dans la figure 2.4 suivante, on pourra comprendre le mode d'action des fibres.

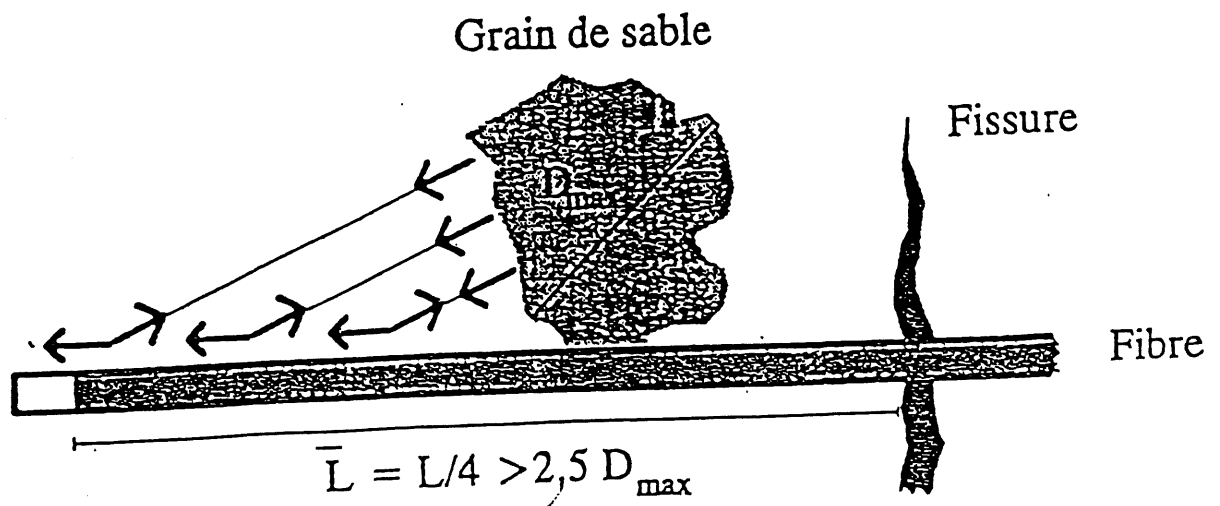


Figure 2.4 Couture des granulats par embiellage

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

Le dosage pondéral en fibre est déterminé expérimentalement. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un pourcentage en volume de fibres de 2 % soit environ de 150 à 160 kg/m³[8]

Par contre dans le cas des traitements thermique à des températures supérieures à 200°C où l'on a une dessiccation intense qui affecte la microstructure les meilleurs résultats sont obtenus avec des fibres courtes de moins de 3 mm de longueur qui ont une forme irrégulière. On a pu obtenir ainsi une résistance en compression de 810 MPa. 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 [12].

L'un des objectifs de cette recherche a été l'étude comparative du comportement mécanique d'éprouvettes de laboratoire et d'éléments structuraux, en incorporant des microfibrilles d'acier, ou en les confinant dans une mince enveloppe métallique d'épaisseur variable.

Il est connu que le confinement latéral dans une mince enveloppe métallique peut modifier le comportement fragile du béton [15], en apportant une augmentation considérable de la résistance du coeur confiné de même que l'augmentation de la déformabilité longitudinale à la contrainte maximale du béton, rendant ainsi la rupture plus graduelle et plus ductile (adoucissement de la pente de la partie post-pic de la courbe contrainte-déformation). Par confinement du BPR et par pressage, en appliquant une pression importante on peut obtenir une augmentation de la densité relative en réduisant la quantité d'air occlus et par essorage de l'eau.

Il est donc possible de fabriquer des matériaux à base de ciment portland très résistant qui présentent une grande ductilité pour envisager des applications structurales [15].

CHAPITRE 3

CHOIX DES MATÉRIAUX , NORMES ET MÉTHODES D'ESSAI

Le présent chapitre traite des caractéristiques des matériaux utilisés lors des travaux de laboratoire. Ce chapitre portera également sur les normes de référence et les méthodes utilisées lors des différents essais effectués en laboratoire et en usine.

Matériaux utilisés pour fabriquer les BPR

Les BPR ont été fabriqués à partir des matériaux suivants :

- ◊ un ciment Portland de Type 20 M
- ◊ de la fumée de silice
- ◊ un sable siliceux
- ◊ un quartz broyé
- ◊ un superplastifiant (Polynaphtalène)
- ◊ de l'eau
- ◊ des fibres d'acier

3.1.1 Le ciment

Nous avons effectué nos travaux de formulation des BPR avec du ciment de Type 20M produit par une cimenterie québécoise.

Le ciment de Type 20M est un ciment de Type 20 modifié. C'est un ciment défini par des spécifications précises d'Hydro-Québec et de la SEBJ (Société d'Exploitation de la Baie James).

C'est un ciment à faible chaleur d'hydratation. Les teneurs en C_3S et C_3A sont faibles, car ces deux phases sont celles qui développent les chaleurs d'hydratation les plus élevées. Par conséquent le ciment de Type 20M est peu réactif à court terme et son comportement est semblable à celui d'un ciment de Type 40 à faible chaleur d'hydratation.

La chaleur d'hydratation à 7 jours du ciment Type 20M est limitée par les spécifications à 270 kJ/kg, une valeur qui peut être considérée comme très faible pour les ciments Portland. La teneur maximale en aluminat tricalcique est de 5 %, car le C_3A est la phase qui dégage le plus de chaleur lors de l'hydratation. La quantité maximale de SO_3 est comprise entre 2 et 2,5 %. En ce qui concerne la teneur en alcalis, la limite maximale a été ramenée à un maximum de 0,7 % à partir de 1989.

La faible chaleur d'hydratation du ciment de Type 20 M constitue son principal avantage pour fabriquer des bétons de masse, tandis que sa prise et son durcissement relativement lents lorsqu'on l'utilise à un rapport eau/ciment élevé demeurent un inconvénient pour des applications structurales.

L'analyse chimique du ciment utilisé ainsi que sa composition de Bogue sont présentées dans les tableaux 3.5 et 3.6 du paragraphe 3.2.

3.1.1.1 Caractéristiques physiques du ciment Type 20M

- La finesse Blaine du ciment doit être comprise entre 280 et 360 m^2/kg .
- L'expansion ou résistance à la désagrégation (essai à l'autoclave) est admise jusqu'à un maximum de 0,30 %.
- La *résistance aux sulfates* à 14 jours ne doit pas dépasser 0,05 %.
- Le *temps de prise* minimum doit être de 120 min et ne pas dépasser 360 min.
- La *chaleur d'hydratation* à 7 jours ne devra pas dépasser 270 kJ/kg.
- La *résistance à la compression* du mortier normalisé à une échéance de 3 jours doit présenter un minimum de 10 MPa et à 91 jours une résistance minimale de 36 MPa.

3.1.1.2 Caractéristiques chimiques du ciment Type 20M

- La perte au feu ne doit pas dépasser 2,5 % (3,5 % pour le ciment de Type 10).
- La teneur en insolubles doit être inférieure ou égale à 0,7 % (1% pour le ciment Type 10). La teneur en SO_3 doit être faible, elle doit être comprise entre 2 et 2,5 % (pour le ciment de Type 10, cette teneur doit être inférieure à 3,5 %, quand la teneur en C_3A dépasse 7,5 %).

- La teneur maximale en MgO pour le ciment de Type 20 M est fixée à 5 %.
- La teneur en alcalis équivalent doit être inférieure ou égale à 0,7%, ce qui voudrait dire que le ciment Type 20 M est un ciment à faible teneur en alcalis.
- La teneur en chaux libre doit être inférieure à 1%, ce qui contribue à minimiser la chaleur d'hydratation.
- La teneur maximale en C_3A est de 5% .

L'examen des spécifications physico-chimiques du ciment de Type 20M montre qu'un tel type de ciment se distingue notablement des autres types par un nombre d'exigences plus élevé et un rigueur particulière de ces exigences.

3.1.2 La fumée de silice

La fumée de silice que nous avons utilisée dans notre projet de recherche provient d'une usine québécoise.

Les fumées de silice est constituée de très petites particules qui peuvent être 30 à 100 fois plus fines que les grains de ciment Portland. Elles peuvent présenter deux effets dans le système cimentaire où elles sont incorporées : un effet filler et un effet pouzzolanique. Ce dernier effet est obtenu grâce à la structure amorphe, à la très haute teneur en silice et à la grande surface spécifique des fumées de silice. La fumée de silice réagit avec la portlandite produite par l'hydratation des silicates pour former un silicate de chaux hydraté. Cependant, il a été prouvé que l'effet filler est aussi important, puisque l'on peut remplacer la fumée de silice par du noir de carbone de même diamètre et obtenir des gains de résistance semblables [8].

La composition chimique et les caractéristiques physiques de cette fumée de silice sont données dans les tableaux 3.3 et 3.4 suivants :

TABLEAU 3.1 COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FUMÉE DE SILICE UTILISÉE

COMPOSITION CHIMIQUE	(%)
SiO ₂	93
Al ₂ O ₃	0,59
FeO	0,70
MgO	0,52
CaO	0,51
Na ₂ O	0,17
K ₂ O	0,59
S	0,16
Perte au feu	2,20

TABLEAU 3.2 . CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE LA FUMÉE SILICE UTILISÉE

Couleur	Bleu gris
Densité	2,22
Masse volumique (kg/m ³)	280 (en vrac)
Fuseau granulométrique (µm)	0,04 à 0,28
Diamètre moyen (µm)	0,18
Surface spécifique théorique (m ² /kg)	20 000
Surface spécifique, B.E.T. (m ² /kg)	17 500

La petite taille et la forme sphérique des fumées de silice leur confèrent un effet filler particulier. Les particules de fumées de silice combleront ainsi les espaces vides entre les grains de ciment occupés généralement par l'eau. Cet effet de fumée de silice serait encore plus important dans la zone d'interface pâte-granulat qui deviendrait ainsi plus dense.

La réaction pouzzolanique est, comme l'effet filler, plus important dans la zone de transition pâte-granulat. La fumée de silice réduit notablement la formation de cristaux de portlandite orientée, comme elle réduit considérablement l'épaisseur de la zone de transition et ce d'autant plus que la quantité de fumée de silice ajoutée dans le béton est plus élevée [9].

Les particules de fumée de silice peuvent agir comme site de formation de germes de cristaux, accroissant ainsi le taux d'hydratation du ciment d'une part, et améliorant l'homogénéité et la finesse des produits d'hydratation, à travers ce que l'on a appelé le processus d'affinement des grains, d'autre part [10]. Selon Cheng-Yi et Feldman [11] la fumée de silice accélère la réaction d'hydratation en favorisant la création de sites de nucléation des cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dès les premières minutes après que la réaction d'hydratation a commencé.

En matière d'ouvrabilité des bétons, les fumées de silice jouent un rôle très important quand elles sont incorporées dans le béton. Grâce à leur forme sphérique, elles facilitent le glissement des particules les unes par rapport aux autres.

3.1.3 Le superplastifiant

Nous avons utilisé un sel de sodium d'un condensé de naphthalène sulfonate et de formaldéhyde produit au Québec. Ce superplastifiant est conforme à la norme canadienne ACNOR CAN3-A266.6-M85, relative aux adjuvants pour le béton. Les caractéristiques de ce superplastifiant que l'on retrouve dans la fiche technique du produit sont reprises dans le tableau 3.3.

TABLEAU 3.3. CARACTÉRISTIQUES DU SUPERPLASTIFIANT UTILISÉ

Apparence	Liquide brun clair
Teneur en solides	42,5 ± 1,5 (%)
Solides actifs	40,0 ± 1,5 (%)
Pourcentage de sulfate	2,5 ± 0,5 (%)
pH d'une solution à 10%	8,0 ± 0,5 (%)
Densité à 25°C	1,22 ± 0,22 (%)
Température de congélation	- 4 ° C (25° F)
Chlorure	Aucun
Nature ionique	Anionique
Solubilité dans l'eau	Instantanée même dans de l'eau dure

La rhéologie des BPR est étroitement liée à l'utilisation des superplastifiants. La diminution du rapport E/C est rendue possible grâce à l'utilisation des superplastifiants; cette faible valeur du rapport E/C rapproche les grains de ciment, si bien que la porosité globale sera moindre et que la microstructure du béton sera très dense et très imperméable.

3.1.4 Le sable

Le sable de quartz que nous avons utilisé dans notre projet de recherche est un sable commercial dont on retrouvera la composition chimique dans le tableau 3.4.

TABLEAU 3.4. COMPOSITIONS CHIMIQUES
DU SABLE DE QUARTZ UTILISÉ

	% Massique
SiO ₂	99,88
Fe ₂ O ₃	0,020
Al ₂ O ₃	0,050
K ₂ O	0,030
Na ₂ O	0,007
CaO	0,033
Perte au feu	0,15 (max.)

Le diamètre moyen des grains de ce sable est de 300 µm. Pour des questions de confidentialité, il est impossible de préciser d'avantage l'étendue granululaire de ce sable.

3.1.5 Le quartz broyé

Nous avons utilisé du quartz commercial broyé ayant un diamètre moyen de l'ordre de 15 µm. Si le quartz broyé est un ajout inerte (filler) dans les BPR non traités thermiquement, il est par contre un ajout nécessaire pour les BPR traités thermiquement.

3.1.6 La fibres d'acier

Les fibres d'acier que nous avons utilisées dans notre projet de recherche ont un diamètre de 0,16 mm et une longueur de 13 mm. Elle sont droites et lisses et elles ont un module élastique élevé (approximativement égal à 210 GPa).

3.1.7 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. Nous avons admis que l'eau utilisée rencontrait les prescriptions de l'ACNOR en matière de béton.

En conclusion on peut dire que les matériaux que nous avons utilisés pour fabriquer les BPR tant au laboratoire qu'en usine sont tous des matériaux qui n'ont rien d'exceptionnel et qui sont disponibles commercialement. Ce sont surtout leur caractéristiques granulaires très précises et les proportions dans lesquelles on les mélange pour obtenir une matrice très compacte qui confèrent aux BPR leurs propriétés remarquables. Pour des raisons de confidentialité, il nous est malheureusement impossible de présenter les caractéristiques particulières de ces matériaux.

3.2 Normes et méthodes d'essais

Les essais qui ont été mis en oeuvre pour réaliser ce programme de recherche suivent les normes et/ou recommandations des organismes suivants :

- ◊ Association Canadienne de Normalisation, **ACNOR**
- ◊ Le Bureau de Normalisation du Québec, **BNQ**
- ◊ American Society for Testing and Materials, **ASTM**
- ◊ American Concrete Institute, **ACI**

Certaines autres procédures d'essais ont été développées à l'Université de Sherbrooke au cours des années, comme l'essai d'analyse granulométrique par sédimentométrie très utilisé en mécanique des sols, ou inspirés de l'industrie pétrolière comme les essais de comportement rhéologique (essais de compatibilité ciment-superplastifiant et la détermination du point de saturation en superplastifiant).

La caractérisation de l'ouvrabilité du matériau par la mesure traditionnelle de l'affaissement ne peut être faite car l'essai d'affaissement n'est pas représentatif du comportement rhéologique du BPR pendant sa mise en oeuvre, du fait qu'il présente un caractère thixotropique très élevé. Il est donc conseillé de mesurer l'ouvrabilité du BPR par une méthode dynamique comme la table à choc, selon la norme ASTM C230.

3.2.1 Caractérisation du ciment

Nous avons déterminé la composition chimique du clinker et du ciment de Type 20M, exprimée en oxydes, par fluorescence X, au Laboratoire du Centre de Recherche et de Technique Lafarge. La composition phasique a été déterminée pour le ciment de Type 20M par application des formules de Bogue à partir de la composition chimique.

L'échantillon de ciment a été traité à l'acide salicilique, ce qui a permis de dissoudre les silicates et de réaliser l'étude par la diffraction des rayons X des phases aluminates et sulfates.

L'examen du clinker sur section polie au microscope optique nous a permis d'avoir une bonne évaluation qualitative globale du clinker en observant la taille des cristaux, leur niveau de développement, le degré de cuisson et de refroidissement.

La finesse du ciment a été déterminée à l'aide du perméabilimètre Blaine. Le principe de cet essai conforme à la ASTM C204-89 consiste à mettre un échantillon de ciment dans une cellule perforée et à mesurer le temps de passage d'un volume d'air connu sous une pression moyenne déterminée à travers une pastille de ciment de volume et de porosité définies.

TABLEAU 3.5 CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES
DU CIMENT DE TYPE 20M UTILISÉ

Oxydes	Teneur massique (%)
SiO ₂	23,10
Al ₂ O ₃	3,20
Fe ₂ O ₃	4,70
MgO	1,80
CaO	62,90
Na ₂ O	0,12
K ₂ O	0,40
SO ₃	2,40
Perte au feu	0,63

TABLEAU 3.6 COMPOSITION DE BOGUE

C ₃ S	45%
C ₂ S	32%
C ₃ A	1%
C ₄ AF	14%

3.2.2. Rhéologie et point de saturation

La rhéologie des BPR est semblable à celle des BHP, elle est étroitement liée à l'utilisation des superplastifiants. La rhéologie varie rapidement dans le temps, car elle est entre autres liée aux caractéristiques physico-chimiques du ciment.

Le comportement rhéologique de ciment du Type 20M a été évalué en même temps qu'un deuxième ciment de Type 10 produit par la même cimenterie. La détermination des temps d'écoulement à travers le cône Marsh des différents coulis fortement mélangés et homogénéisés à l'aide d'une mixette de laboratoire a été faite à 5 et 60 minutes.

Les essais rhéologiques ont été effectués en utilisant un superplastifiant à base de naphthalène, ce qui a permis de comparer le comportement de chacun des deux ciments vis-à-vis du même superplastifiant.

Ces essais que nous avons mené à un rapport E/C de 0,35 nous ont permis d'évaluer la compatibilité ciment/superplastifiant et de déterminer le point de saturation en superplastifiant.

Pour montrer la différence de comportement rhéologique d'une série de ciment de Type 20M mais ayant des finesses de broyage différentes, nous avons effectué des essais de détermination du point de saturation en superplastifiant de ce ciment de Type 20M à trois finesses Blaine : 240 , 290 et 330 m²/kg , avec le même superplastifiant à base de naphthalène et le même rapport E/C, soit 0,35. Le clinker a été broyé à l'aide d'un broyeur du Centre de Recherche et de Technique Lafarge.

3.2.3 Essais d'ouvrabilité

La caractérisation de l'ouvrabilité d'un BPR ne peut pas être faite par la mesure traditionnelle de l'affaissement car l'essai d'affaissement n'est pas représentatif pour le comportement rhéologique du BPR pendant sa mise en oeuvre, parce qu'il présente un caractère

thixotropique très net. Il est conseillé de mesurer l'ouvrabilité du BPR par une méthode dynamique comme la table à chocs, selon la norme ASTM C230.

Ces essais ont été réalisés pour déterminer l'optimum en superplastifiant qui est un sel de sodium d'un condensé de sulfonate de naphtalène et de formaldéhyde produit au Québec.

On retrouvera la formulation des BPR exprimée en masse par rapport au ciment dans le tableau 3.7.

Nous avons travaillé sur un BPR sans fibres, avec différents pourcentages de fumées de silice afin de modifier la quantité d'eau pour obtenir une maniabilité sensiblement constante.

Le malaxeur utilisé est un malaxeur à mortier classique de marque <<Hobart>>.

TABLEAU 3.7 FORMULATION DU BPR (PROPRIONS MASSIQUES)

	Ciment	Fumée de silice	Sable	Quartz
E/C=0,24 et FS=20 %	1	0,232	1,43	0,3
E/C=0,28 et FS=25 %	1	0,325	1,43	0,3

3. 2. 4 Ressuage du BPR

Il y a lieu de noter que la teneur en fumée de silice d'un mélange de BPR est tellement élevée qu'elle conduit à l'absence de ressuage. Cela provoque un séchage rapide en surface qui implique l'application d'une protection et d'un type de mûrissement comme pour n'importe quel mélange de BHP qui contient de la fumée de silice.

3.2.5 Temps de prise du BPR

La détermination des temps de prise du BPR a été effectuée en utilisant la norme ASTM C 191 (Time of setting of hydraulic cement by Vicat needle) étant donné qu'une pâte de BPR est constitué d'un mélange de poudres dont la dimension maximale est inférieure à 600µm.

Pour effectuer cet essai, nous avons confectionné une pâte de BPR avec une quantité de 2,7 % extrait sec en superplastifiant et en n'utilisant pas de fibres. Le temps de prise du BPR a été évalué en même temps que celui du ciment de Type 20M .

Le tableau 3.8 suivant, donne la formulation du BPR exprimée en masse par rapport au ciment :

TABLEAU 3.8 FORMULATION DU BPR 2

	BPR 2
Ciment	1,00
Fumée de silice	0,325
Sable de quartz	1,43
Quartz broyé	0,30
Superplastifiant	0,027
Eau	0,27

Durant cet essai, nous avons conservé l'échantillon dans l'eau à 20° C à cause d'un dessiccation prononcée en surface.

3.2.6 L'effet du type de mûrissement sur la résistance en compression sur cubes

Les essais sont effectués en conformité avec la norme ASTM C109 (Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) en utilisant des éprouvettes cubiques de 50 mm d'arête.

Pour effectuer cet essai, nous avons confectionné une pâte de BPR 2 selon la formulation du tableau 3.8.

Les éprouvettes de BPR frais ont été fabriquées dans des moules de 6 cubes chacun. Ils ont été mis en oeuvre en trois couches de même épaisseur et consolidés par 16 coups de pilons par couche, sans qu'aucune consolidation par vibration n'ait été utilisée.

Les échantillons ont été mûris uniquement dans de l'eau à 20°C pendant 14 jours, d'autres cubes de BPR ont subi le mûrissement suivant : 3 jours dans l'eau à 90°C et les autres jours restants dans l'eau à 20°C, jusqu'à l'échéance du temps de l'essai .

Comme la plupart des réactions chimiques exothermiques, l'hydratation du ciment est accélérée par la chaleur. Ainsi, quand on considère l'évolution de la résistance d'un béton en fonction du temps, on voit que dès l'origine, le phénomène évolue à des vitesses différentes, suivant la température de traitement appliquée [20].

Le dosage en eau des bétons traités par la chaleur est primordial, car l'eau est l'un des constituants du béton qui se dilate le plus. Alexanderson [20] a étudié sur des bétons ordinaires en 1972, les causes de perte de résistance à 28 jours pour les éprouvettes traitées à la chaleur (tous les bétons qui ont été mûri par la chaleur donnent des résistances à long terme plus faibles que celles des bétons ayant durci normalement) et il a montré que les pertes sont principalement dues à l'augmentation de la porosité et à la fissuration, et que c'est la pression de l'air dans les pores qui est responsable de ces dégradations.

Aujourd'hui on sait contrer ce phénomène en utilisant à la préprise, un superplastifiant, donc un rapport E/C très faible et la fumée de silice. De plus, dans un BPR, par suppression des gros granulats, on augmente son homogénéité qui se situe plus près d'un matériau céramique que d'un béton traditionnel.

D'autre part, il est essentiel que la vitesse d'élévation de la température et le refroidissement se fassent lentement pour éviter la fissuration due aux chocs thermiques.

3.2.7 Calorimétrie

L'analyse calorimétrique est utilisée pour déterminer la chaleur d'hydratation d'un liant hydraulique. En effet, lorsqu'un matériau cimentaire est mélangé à l'eau, il libère de la chaleur suite aux réactions chimiques exothermiques. Plus le degré de la réaction chimique sera élevé, plus la chaleur dégagée sera importante. C'est ainsi que le degré d'hydratation pourra indirectement être déterminé en mesurant la variation de température causée par la chaleur libérée.

La figure 3.2 illustre le principe d'utilisation d'un appareil calorimétrique. Une suspension de ciment introduite dans une bouteille est placée dans une fiole sous vide dans laquelle, il y a de l'eau à 20°C. La température externe de la fiole sous vide est contrôlée par un bain d'eau; la chaleur issue des réactions chimiques de l'échantillon est mesurée par le thermoélément. Le signal est par la suite, transformé en température.

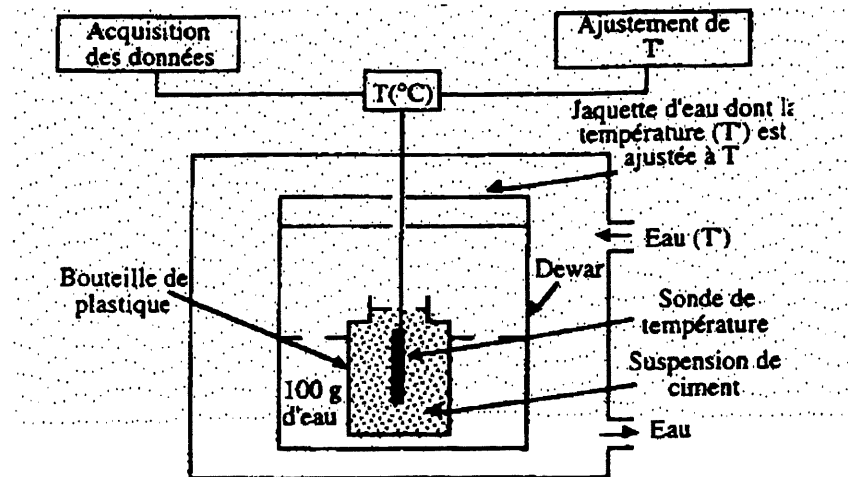


Figure 3.2 Principe d'une analyse calorimétrique

Les essais calorimétriques que nous avons menés pour déterminer l'évolution de la température lors de l'hydratation, que nous avons menés ont concerné l'effet de la finesse Blaine et du surdosage en superplastifiant à base de naphthalène sur la période dormante d'un ciment Type 20M. Nous avons ensuite examiné l'influence de la substitution du ciment par 32% fumée de silice pour enfin, réaliser des essais calorimétriques sur un BPR.

3.2.8 La compacité du BPR

La compacité correspond au rapport d_0/d_s ou d_0 est la densité du matériau durci au démoulage et d_s la densité solide du mélange granulaire supposé compact (sans eau et sans air).

En général, une compacité de 0,86 est considérée comme une valeur satisfaisante pour les éprouvettes des BPR non comprimées [4].

3.2.9 Essais mécaniques sur les BPR

3.2.9.1 Essais en compression uniaxiale avec asservissement en déformation

Les caractéristiques en compression ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques de dimension 100x200 mm, en conformité avec la norme ASTM C 39.

Le BPR était renforcé ou non des fibres d'acier et les cylindres de BPR ont été surfacés sur un tour.

Les essais ont été effectués sur une presse MTS d'une capacité de 5000 kN qui est schématisée dans la figure 6.1 au Chapitre 6.

En compression, les éprouvettes sont instrumentées de manière à obtenir la courbe contrainte-déformation de même que les valeurs du module d'élasticité.

Pour le BPR confiné dans des tubes d'acier, l'effort longitudinal a été mesuré en utilisant des jauges LVDT (Linear Variable Differential Transformer) placées autour des éprouvettes (figure 6.1).

Pour effectuer les essais en compression sur BPR confiné et pressé en usine dans des tubes d'acier (figure 5.12, Chapitre 5), ces derniers ont été coupés en éprouvettes d'une hauteur de 220 mm. La gaine de PVC prévue pour la précontrainte a été retirée et la cavité centrale comblée par un mortier ayant un rapport $E/C = 0,30$.

La charge en compression a été appliquée juste sur la surface du béton en enlevant un anneau de tube de 1 mm à chaque extrémité du tube d'acier schématisée dans la figure 6.1 au Chapitre 6.

Des jauges extensométriques ont été collées sur la surface extérieure des tubes d'acier, pour mesurer les efforts latéraux et ajuster le niveau de pression.

L'acier de tubes a une limite élastique de 350 MPa.

3.2.9.2 Essais en flexion avec asservissement en déformation

Les essais en flexion ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimension 100x100x300 mm conformément à la norme ASTM C 1018 (Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete).

La précision des LVDT utilisés pour la mesure de la déflexion est de 0,001mm. L'asservissement des essais s'est fait sous contrôle du déplacement des plateaux de la presse, à un taux de 0,05 mm/min. Un système d'acquisition de données permet un enregistrement en continu des valeurs de la charge appliquée et de la déflexion de la poutre.

3.2.10 Essais de durabilité

3.2.10.1 Perméabilité aux ions chlore

L'essai de perméabilité aux ions de chlore est réalisé selon les spécifications de la norme ASTM C 1202 91. Il consiste à déterminer la quantité de courant électrique qui passe au travers d'une carotte en béton de 95 mm de diamètre et de 51 mm d'épaisseur, dont une face est immergée dans une solution de chlorure de sodium et l'autre dans une solution de soude. Une différence de potentiel de 60 V est maintenue durant 6 heures entre les deux extrémités. La charge totale écoulée, exprimée en Coulombs donne un indice de la perméabilité aux ions de chlore et de la résistivité électrique du béton. L'essai de perméabilité aux ions de chlore s'effectue sur deux échantillons d'un même béton; le résultat final étant obtenu à partir de la moyenne des deux échantillons.

3.2.10.2 Résistance à l'abrasion mécanique

L'abrasion a été mesurée conformément à la procédure "C" de la norme ASTM C779 (Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces).

Cet essai consiste à faire rouler 8 billes d'acier d'un diamètre de 18,25 mm sur une surface de béton horizontale. Les billes sont retenues dans un anneau de telle sorte que le diamètre de rotation des billes est de 76 mm. La rotation est induite par un arbre de transmission vertical fixé à un moteur électrique. La vitesse de rotation de l'arbre est maintenue à 900 tours par minute lors de l'essai. Une force verticale constante de 120 newtons est également appliquée et maintenue tout au long de l'essai. Un indicateur de déplacement fixé entre l'appareil et un repère fixe permet de mesurer la profondeur d'abrasion en fonction du temps.

La durée de l'essai prescrite par la norme est de 20 minutes, avec une mesure de la profondeur d'abrasion toutes les 50 secondes.

3.2.10.3 Résistance aux cycles de gel et dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel est déterminée conformément à la norme ASTM C666- procédure A sur des éprouvettes de béton de dimensions 75x75x350 mm. Pour chaque gâchée on utilise deux échantillons pour mesurer l'évolution de l'allongement relatif, la perte de masse et la vitesse de propagation sonique en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. La

durée d'un cycle de gel-dégel est d'environ 4 heures. L'allongement relatif est le rapport de la variation de la longueur (Δl) et de la longueur initiale (l). La perte de masse est exprimée en pourcentage. Quant à la vitesse de propagation sonore, elle est égale au rapport de la longueur de l'éprouvette (350 mm) par le temps de parcours de l'onde exprimé en secondes. Quant à la perte du module dynamique, elle est calculée en faisant le rapport du module correspondant à la vitesse de propagation sonore à travers le prisme et celui correspondant à la vitesse au temps initial, exprimée en pourcentage. On calcule le facteur de durabilité FD d'après la formule suivante :

$$FD = P N / M$$

avec : P = Module d'élasticité dynamique relatif à N cycles (%)

M = Nombre de cycles spécifié auxquels l'exposition doit être terminée.

N = Nombre de cycles auxquels P atteint la valeur minimale spécifié pour discontinuer le test, ou le nombre de cycles spécifié auxquels l'exposition doit être terminée (M), suivant lequel de ces deux nombres est moindre.

En supposant que la masse volumique et le coefficient de Poisson restent constant au cours des cycles des gel-dégel, le facteur P est donné par la formule suivante :

$$P = (V_n / V_0)^2 \times 100$$

avec V_n : vitesse sonore correspondant à n cycles de gel-dégel (si $n > 60$) ;

V_0 : vitesse sonore initiale ;

3.2.10.4 Résistance à l'écaillage

L'essai de résistance à l'écaillage a été réalisé conformément à la norme ASTM C 672, sur deux échantillons prismatiques pour chaque formulation de béton. Les échantillons ont subi un mûrissement humide de 14 jours et un mûrissement à l'air sec de même durée. À la fin du mûrissement, les surfaces supérieures sont recouvertes d'une solution de chlorure de calcium et d'eau concentrée à 4 % .

Les échantillons sont exposés à 50 cycles de gel-dégel (température variant entre -18 et +20°C) au cours des quels on note à intervalle de 7 cycles (la durée d'un cycle étant de 24 heures), la masse de débris écaillés à la surface (exprimée en kg/m^2). On procède par filtration de la solution saline à travers les mailles très étroites d'un tamis afin de séparer les débris en suspension causés par l'écaillage.

On note également l'appréciation visuelle de l'échantillon. Selon la norme, un béton résiste à l'écaillage lorsque la masse des résidus pour chaque échantillon ne dépasse pas $0,80 \text{ kg/m}^2$ en contact avec la solution (après 50 cycles).

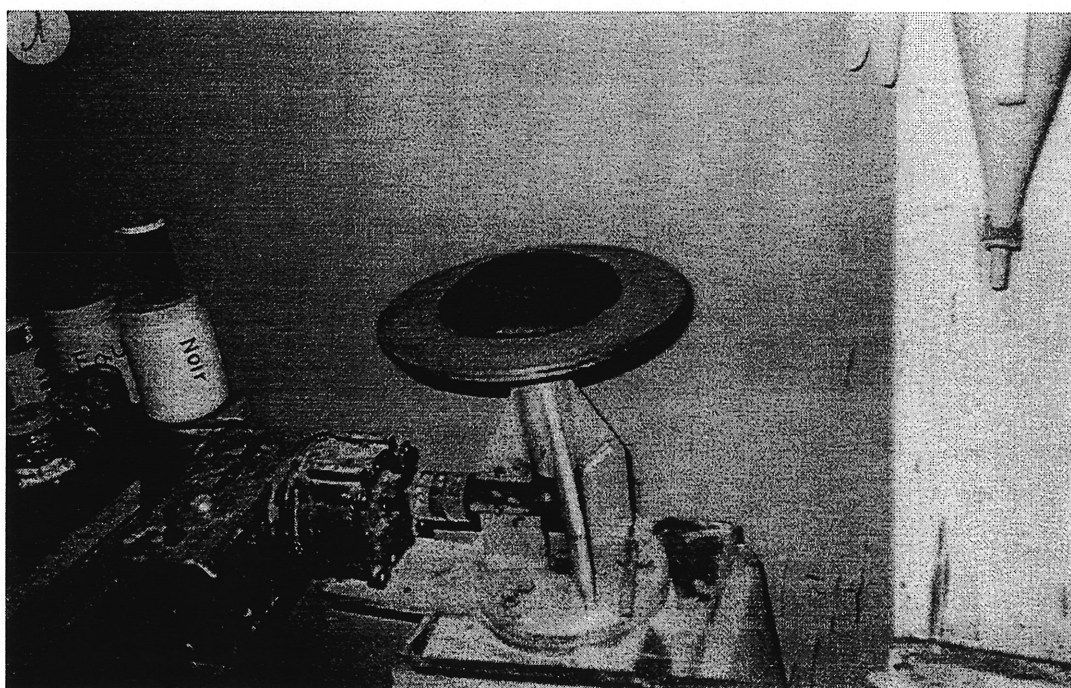


Figure 3.1 Essai de maniabilité en laboratoire avant les essais à grande échelle.

CHAPITRE 4

ESSAIS EN LABORATOIRE

Les essais en laboratoire que nous avons menés ont concerné la compatibilité ciment - superplastifiant et la détermination des points de saturation en superplastifiant. Nous avons ensuite étudié l'influence de la finesse Blaine du ciment sur le point de saturation en superplastifiant. Nous avons enfin réalisé des essais d'optimisation des mélanges de bétons, le temps de prise, des essais calorimétriques ainsi que l'effet du type de mûrissement sur la résistance en compression sur cubes de BPR.

4.1 Essai de compatibilité ciment - superplastifiant et point de saturation en superplastifiant

Avant d'entamer nos essais sur béton, nous avons d'abord voulu nous assurer de la compatibilité des ciments de Type 20M avec le superplastifiant à base de naphthalène, nous avons donc déterminé les points de saturation en superplastifiant de ce ciment à un rapport E/C de 0,35.

Le temps d'écoulement d'un litre de coulis au cône Marsh diminue au fur et à mesure que le dosage en superplastifiant augmente, mais il se stabilise dès que l'on atteint une teneur donnée en superplastifiant, appelée teneur optimale ou point de saturation.

Pour montrer la différence de comportement rhéologique selon le type de ciment, nous avons effectué nos essais de détermination du point de saturation en superplastifiant sur un ciment de Type 20M et un ciment de Type10 produits par la même cimenterie québécoise.

Les résultats des essais ont été portés sur la figure 4.1, exprimant le temps d'écoulement d'un litre de coulis (en secondes) en fonction de la teneur en extrait sec du superplastifiant.

L'examen de la figure 4.1 montre que les deux ciments ne présentent pas le même point de saturation. Le point de saturation est d'environ 0,6 % en extrait sec pour le ciment de Type 20M, alors qu'il est de 1,2 % en extrait sec pour le ciment de Type 10.

Ces résultats montrent que le ciment de Type 20M présente une meilleure fluidité que celle du ciment de Type 10 et ce pour un dosage en superplastifiant moindre.

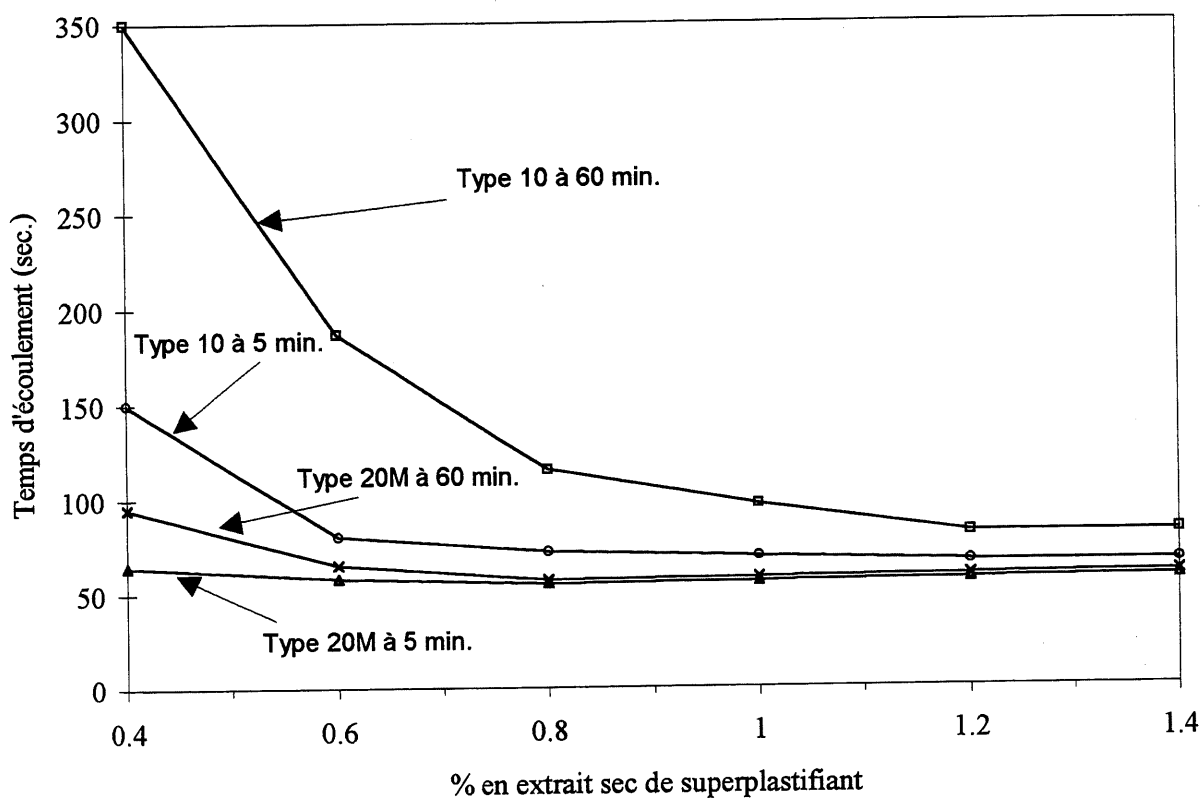


Figure 4.1 Points de saturation en superplastifiant du ciment Type 20M et du ciment de Type 10

4.2. Effet de la finesse Blaine sur le point de saturation du ciment

Pour montrer la différence de comportement rhéologique d'un même ciment ayant des finesses de broyage du clinker différentes, nous avons effectué nos essais de détermination du point de saturation en superplastifiant sur des ciments de Type 20M ayant les trois finesses Blaine suivantes: 240, 290 et 330 m^2/kg en utilisant le même

superplastifiant à base de naphthalène et le même rapport E/C de 0,35. Nous avons broyé le clinker au Centre de Recherche et de Techniques de Ciments Lafarge Canada à Montréal.

L'examen de la figure 4.2 montre que le point de saturation pour les trois fineses de broyage du clinker sont d'environ:

- ◊ 0,4 % en extrait sec pour la finesse Blaine de 240 m²/kg
- ◊ 0,5 % en extrait sec pour la finesse Blaine de 290 m²/kg
- ◊ 0,6 % en extrait sec pour la finesse Blaine de 350 m²/kg

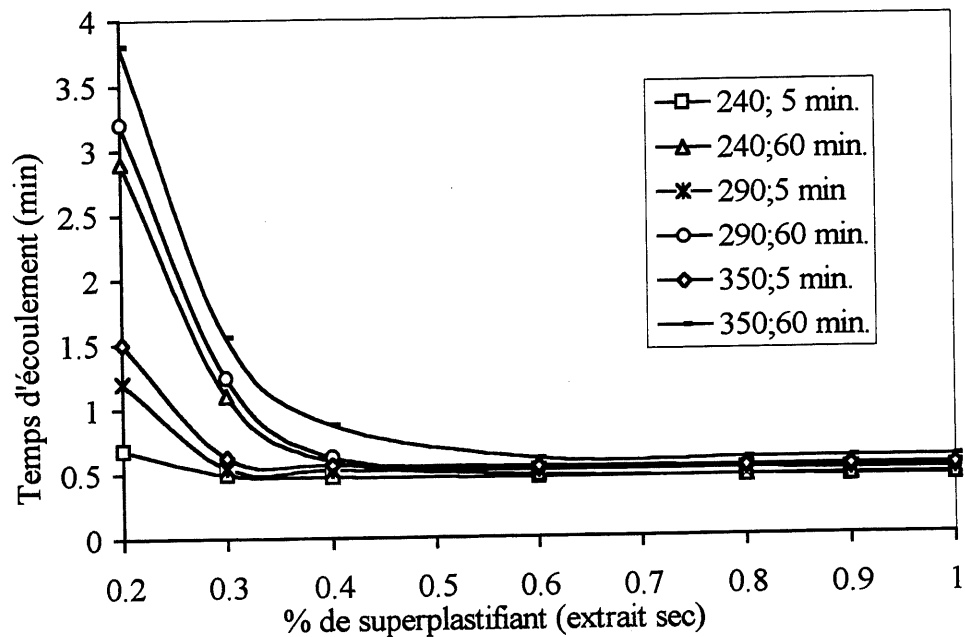


Figure 4.2 Points de saturation en superplastifiant du ciment de Type 20 M pour différentes fineses Blaine

Ces résultats montrent que le ciment ayant une la finesse Blaine de 240 m²/kg présente une meilleure fluidité par rapport au ciment d'un finesse Blaine de 290 m²/kg. Ce dernier présente lui-même une fluidité meilleure par rapport au ciment de finesse Blaine de 350 m²/kg

On peut conclure qu'à de faibles finesses de broyage, la fluidité des coulis est meilleure pour un dosage en superplastifiant moindre, et par conséquent un retard plus faible lors de la prise et du durcissement des bétons puisque la quantité de superplastifiant employée est plus faible, avec les répercussions économiques que cela engendre.

4.3 Essais d'optimisation sur BPR

4.3.1 Essais d'optimisation de la quantité de superplastifiant

Pour les essais d'optimisation sur le BPR, nous avons utilisé un malaxeur à mortier classique de marque "Hobart". L'optimisation de la quantité de superplastifiant à base de naphthalène a été effectuée par la mesure de l'étalement à la table à chocs (ASTM C230).

Elle a conduit à un optimum de 2,7 % d'extraits secs de superplastifiant par rapport au ciment dans le cas d'un BPR sans fibres d'acier.

Nous avons travaillé avec différents pourcentages en fumées de silice afin de modifier la quantité d'eau pour une maniabilité sensiblement constante.

L'étalement de l'échantillon en pourcentage est présenté dans le tableau 4.1 suivant:

TABLEAU 4.1 ÉTALEMENTS MESURÉS SUR LA TABLE À CHOCS

Extrait sec de superplastifiant (%)	Étalement sur la table à chocs (%)					
	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0
E/C = 0,24 ; F.S. = 20%	-	-	34	48	40	40
E/C = 0,28 ; F.S. = 25%	32	42	54	62	68	64

4.3.2 Essais d'optimisation de mise en place par vibration

Pour ces essais, les BPR désigné BPR 7 ont été confectionnés en laboratoire à l'aide d'un malaxeur à tambour d'une capacité d'environ 350 kg. Le tableau 4.2 suivant, donne la formulation exprimée en masse par rapport au ciment :

TABLEAU 4.2 FORMULATION DU BPR 7

	Densité	Formulation du BPR 7
Ciment de Type 20M	3,15	1
Fumée de silice*	2,20	0,25 (*sans quartz broyé)
Sable	2,65	1,1
Extrait sec de superplastifiant en %	1,20	1,8
Eau	1,00	0,18

Les échantillons de BPR frais ont été prélevés dans des moules cylindriques de 200x100 mm. Trois échantillons ont été vibrés uniquement sur la table vibrante et trois autres sur la table vibrante avec en plus une vibration interne à l'aiguille vibrante. Les échantillons des BPR ont subi le même mûrissement.

Le tableau suivant, indique un perte de 20 MPa en résistance à la compression pour une vibration à l'aiguille qui semble mal adaptée à ce genre de matériau.

TABLEAU 4.3 ESSAIS EN COMPRESSION SUR LE BPR 7

	N° de référene	f _c (MPa)	f _c moyen (MPa)
BPR 7 (avec table vibrante seulement)	1	218	221
	2	230	
	3	215	
BPR 7 (avec table vibrante et aiguille vibrante)	1	192	202
	2	219	
	3	196	

4.3.3 Essais d'optimisation sur la procédure du malaxage et de la consistance du mélange

Ces essais ont été réalisés sur la base des formulations du BPR présentées dans le tableau 4.4 suivant.

TABLEAU 4 .4 FORMULATION DU BPR 1 ET DU BPR 2

	BPR 1(*)	BPR 2
Ciment	1	1
Fumée de silice	0,25	0,325
Sable de quartz	1,10	1,43
Quartz broyé	0	0,30
Superplastifiant	0,018	0,018
Eau	0,16 à 0,23	0,16 à 0,27
Fibres d'acier	0,2	0,2

(*) Le BPR 1 est un mélange sans poudre de quartz

Le malaxeur utilisé est un malaxeur à mortier classique de marque Hobart.

La procédure de malaxage a été la suivante:

- mélange des constituants secs (environ 3 minutes)
- introduction de l'eau seule, sauf un volume équivalent à celui du superplastifiant
- introduction de tout le superplastifiant et du reste de l'eau
- introduction de la fibre d'acier.

Le temps nécessaire pour obtenir une pâte homogène a été d'environ 15 minutes à partir du début du malaxage. La quantité d'eau que l'on a utilisée pour fabriquer ce BPR est toutefois élevée pour la consistance de la pâte obtenue, très probablement à cause de la fumée de silice utilisée qui est riche en carbone et qui est trop fine.

Pour la fabrication du BPR en camion-malaxeur et en usine, ce qui n'avait jamais été réalisé jusqu'alors, nous avons décidé de conserver cette formulation mais en utilisant une quantité d'eau supérieure.

Le tableau 4.5 suivant décrit l'aspect et la consistance du mélange pendant l'introduction séquentielle des ingrédients.

TABLEAU 4.5 ASPECT ET CONSISTANCE DES MÉLANGES

	Aspect et consistance des 2 BPR	
	BPR 1	BPR 2
Après mélange avec l'eau	Sable humide	Sable humide
Après mélange avec le superplastifiant	Pâte ferme	Pâte assez plastique
Etalement en %(ASTM C230)	22 %	56 %
Ajout d'eau supplémentaire	Pâte assez plastique Pour E/C = 0,23	Aucun ajout d'eau
Etalement en % selon ASTM C230	64 %	-
Introduction de la fibre d'acier Etalement (%)	50 %	48 %

Comme la fabrication du BPR en camion-malaxeur et en usine n'a jamais été réalisé jusqu'alors au Québec, nous avons décidé de conserver cette formulation mais en utilisant une quantité d'eau supérieure.

4.4 Détermination du temps de prise d'une pâte de BPR

La détermination des temps de prise du BPR a été effectuée en utilisant la norme ASTM C 191 (Time of setting of hydraulic cement by Vicat needle) étant donné qu'une pâte de BPR est constituée d'un mélange de poudres dont la dimension maximale est inférieure à 600 µm.

Pour effectuer cet essai, nous avons confectionné une pâte de BPR 2 selon la formulation du tableau 4.4, mais avec une quantité de 2,7 % en extrait sec de superplastifiant et en n'utilisant pas de fibres.

Durant cet essai, nous avons conservé l'échantillon dans l'eau à 20° C à cause d'un dessiccation prononcée en surface probablement due au faible rapport E/C et la présence d'une quantité importante de la fumée de silice. En effet, en raison de sa surface spécifique élevée la fumée de silice a tendance à densifier le pâte et à adsorber beaucoup d'eau.

Environ 4 heures après la confection de l'échantillon, une croûte de plus en plus compacte et assez élastique se forme en surface, empêchant toute pénétration de l'aiguille Vicat et ce même si l'échantillon est conservé dans une chambre humide pendant sa prise.

La détermination du temps de prise du BPR a été faite en même temps que celle du ciment Type 20M. Les temps de prise sont donnés dans le tableau 4.6 suivant.

TABLEAU 4.6 TEMPS DE PRISE DU BPR ET DU CIMENT TYPE 20M

	Temps de prise en minutes	
	Début	Fin
Ciment Type 20 M	264	319
Melange : BPR 2	480	780

Même pour un pourcentage aussi élevé que 2,7 % en extraits secs, l'effet retardateur ne s'est pas fait sentir au regard des résultats obtenues par Jacques Beaulieu dans son étude de caractérisation des bétons constitués de ciment de Type 20M avec fumée de silice [16].

Le ciment de Type 20M satisfait l'exigence de la SEBJ qui situe le temps de prise entre 120 et 360 minutes.

4.5 Essais calorimétriques

Les essais calorimétriques que nous avons menés ont concerné l'effet de la finesse Blaine et du dosage en superplastifiant à base de naphthalène sur la période dormante d'un ciment de Type 20M. Nous avons ensuite examiné l'influence de la substitution au ciment de 32 % fumée de silice pour enfin réaliser des essais calorimétriques sur un échantillon de BPR.

4.5.1. Effet de la finesse Blaine et du dosage en superplastifiant

Les essais ont été effectués à un rapport E/C = 0,28 et un dosage en superplastifiant de 0,8 et 1,7 % en extraits secs. Une série d'essais a été faite avec le ciment

de Type 20M de finesse Blaine 345 m²/kg désigné 20 M-A et l'autre avec une finesse Blaine 290 m²/kg de même type de ciment et désigné 20M-B.

Les résultats des essais calorimétriques sont présentés dans la figure 4.3.

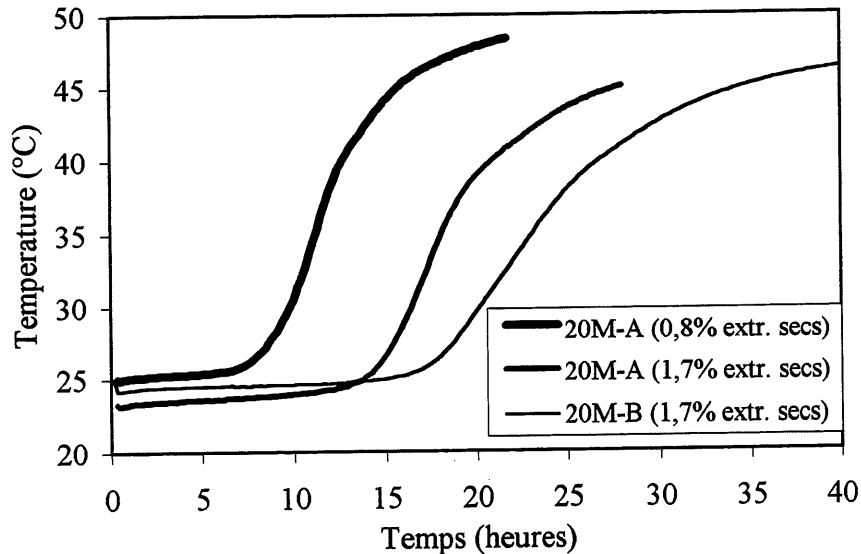


Figure 4.3 Évolution de la température lors de l'hydratation des ciments de Type 20M-A et 20M-B

L'examen de ces courbes calorimétriques montrant l'évolution de la température lors de l'hydratation des ciments de Type 20M-A et 20M-B présenté dans la figure 4.3, montre que les deux ciments de Type 20M sont peu réactifs puisque les périodes dormantes des deux ciments sont relativement longues pour un rapport E/C de 0,28 et avec un dosage de 1,7 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthalène. Si la période dormante est de 13 heures pour le ciment de type 20M-A, elle est par contre de 16 heures pour le ciment de Type 20M-B. Dans le même temps un dosage de 0,8 % en extrait sec de superplastifiant pour le même rapport E/C de 0,28 apporte une diminution d'environ 6 heures au ciment Type 20M-A.

4.5.2 Ciment de Type 20M avec ajout de fumée de silice

Nous avons examiné l'influence de la substitution au ciment de 32 % de fumée de silice, sur la montée en température d'un coulis de rapport $E/C = 0,28$ avec un dosage de 1,7 % en extrait sec de superplastifiant. Les courbes montrant l'évolution de la température des coulis du ciment 20M-B avec 32 % de fumée de silice et du ciment sans ajout sont présentés dans la figure 4.4.

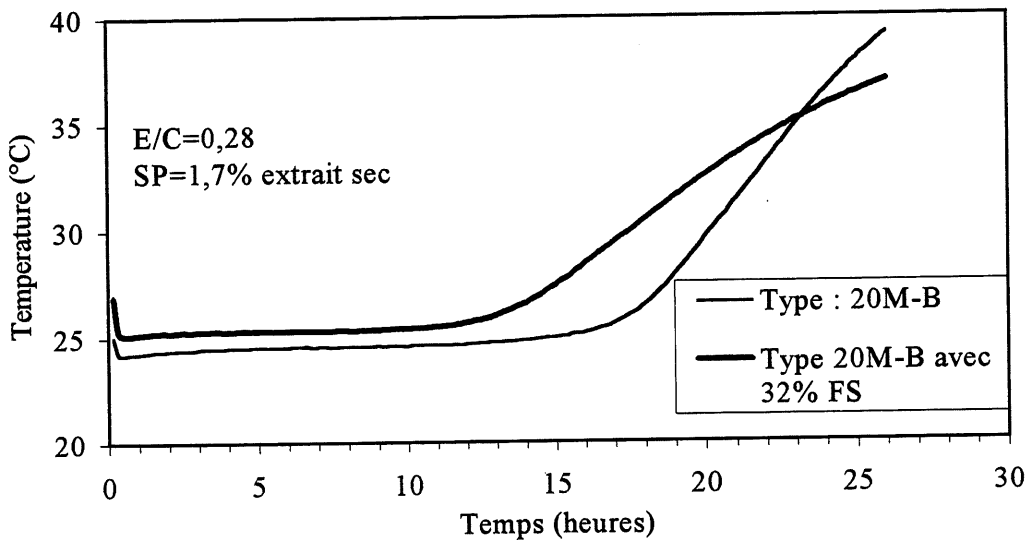


Figure 4.4 Évolution de la température lors de l'hydratation du ciment Type 20M-B avec et sans ajout de 32 % fumée de silice

L'examen de ces courbes calorimétriques montre d'abord que la période dormante a été significativement écourtée d'environ 4 heures par rapport aux coulis du ciment sans ajout.

Nous constatons que la substitution de 32 % de ciment par de fumée de silice a pour effet de rendre le ciment plus réactif et la cinétique globale de l'hydratation est changée par rapport aux coulis de ciment sans ajout.

Ces résultats confirment ceux obtenus par certains chercheurs, comme Bentur et Goldman [17], à savoir que la fumée de silice tend à accélérer le processus d'hydratation

du ciment et que la chaleur d'hydratation libérée et l'élévation de température dans le béton est plus grande.

La figure 4.5 illustre d'après Basham [18] la chaleur libérée dans des pâtes de ciment en fonction de la teneur en fumée de silice.

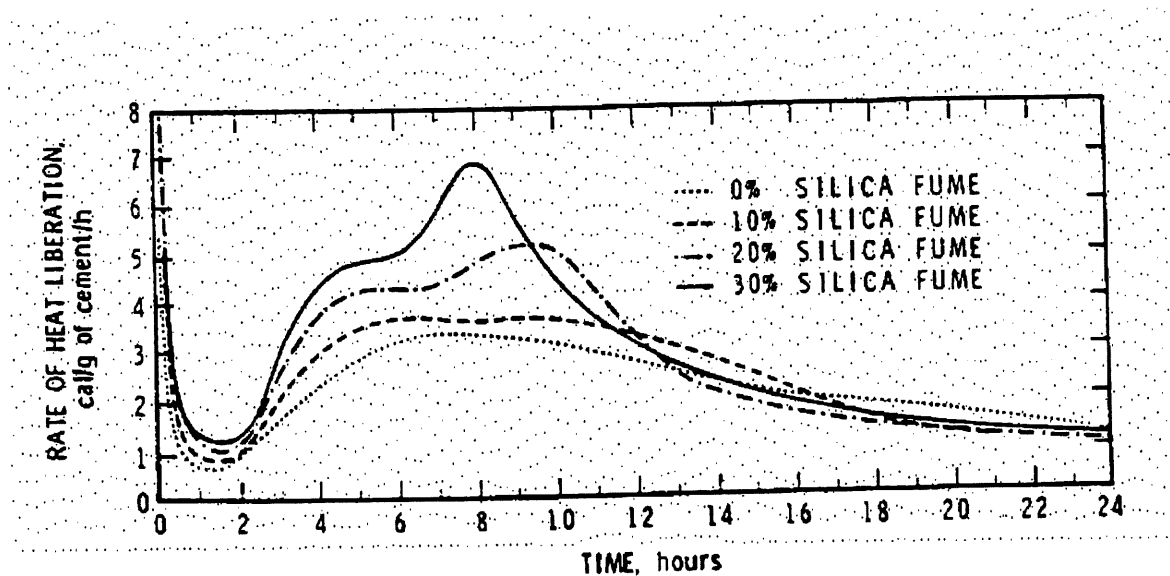


Figure 4.5 Effet de la fumée de silice sur le dégagement de chaleur des pâtes de ciment [18]

Avec sa pouzzolanité (donnée par sa phase de silice vitreuse) et sa surface spécifique élevée, la fumée de silice influence la période dormante, désigné aussi comme période de nucléation, en réagissant sur la vitesse de solubilisation des ions dans la phase aqueuse [8].

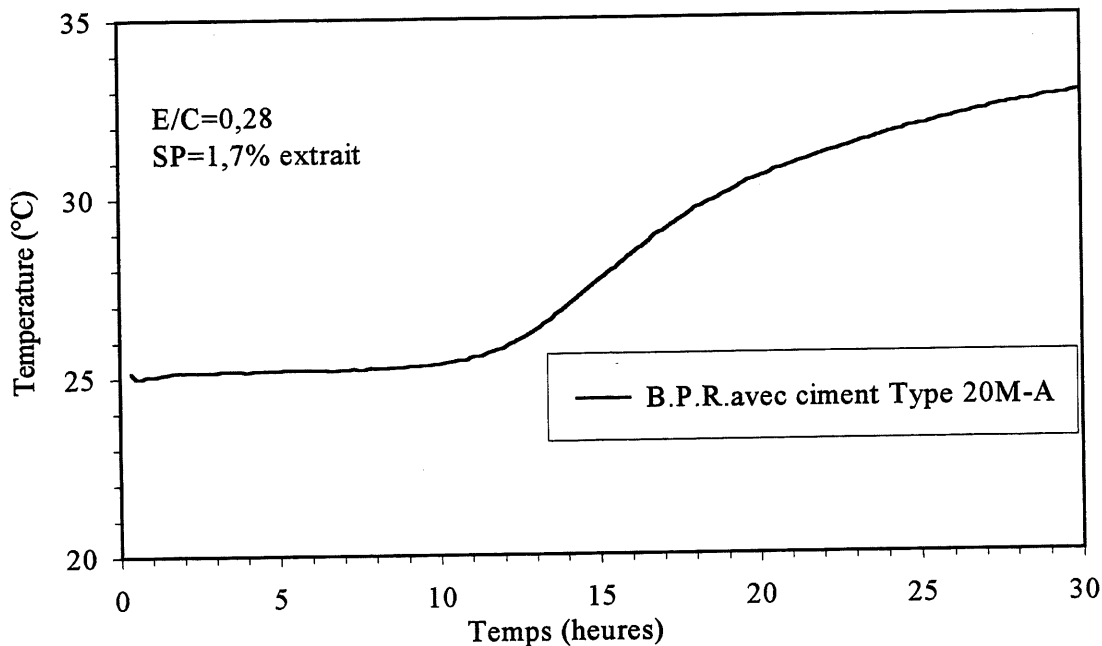
4.5.3 Essais calorimétrique sur BPR

Pour effectuer cet essai, nous avons confectionné une pâte de BPR 2 selon la formulation du tableau 4.4, mais avec un rapport E/C = 0,28, une quantité de 1,7 % en extrait sec de superplastifiant et en n'utilisant pas de fibres.

Il faut noter que l'apport au coulis de deux matériaux bien cristallisés, qui sont inertes chimiquement (à des températures habituelles) comme le couple sable de quartz et

quartz broyé, baisse la réactivité chimique de l'échantillon de ~100g (qui est introduit dans le calorimètre). De ce fait l'analyse comparative avec le coulis de ciment de Type 20M se limite à une comparaison relative à la période dormante sur la courbe calorimétrique.

La diagramme de montée en température d'un BPR est présenté dans la figure 4.6.



Figure

4.6 Courbes calorimétriques du BPR à $E/C = 0,28$ et 1,7 % de superplastifiant

L'examen de cette courbe calorimétrique montre d'abord que la période dormante a été écourtée d'environ 2 heures par rapport aux coulis de ciment Type 20M (figure 4.3) de même rapport $E/C = 0,28$ et avec un dosage de 1,7 %.

Le combinaison ciment Type 20M et la fumée de silice exerce une influence sur le pic principal de l'élévation de la température, en déplaçant la libération de chaleur sur une période plus longue, bien que la chaleur totale libérée en fin de l'hydratation d'une pâte de BPR reste la même, cependant la possibilité de microfissuration dans un tel genre de mélange (BPR) et fortement diminuée.

4.6 Effet du type de mûrissement sur la résistance en compression

Pour effectuer cet essai, nous avons confectionné une pâte de BPR 2 selon la formulation du tableau 4.4, mais avec une quantité de 2,7 % en extrait sec en superplastifiant et en n'utilisant pas de fibres.

Les essais en compression sont effectués en conformité avec la norme ASTM C109 en utilisant des éprouvettes cubiques de 50 mm d'arête.

Trois échantillons ont été mûris uniquement dans l'eau à 20°C pendant 14 jours, trois autres cubes de BPR ont subi le mûrissement suivant : 3 jours dans l'eau à 90°C et le reste dans l'eau à 20°C, jusqu'à l'échance de l'essai.

Le tableau 4.7 indique une augmentation de 74 MPa en résistance à la compression pour un BPR qui a subi un traitement thermique de 3 jours dans l'eau à 90°C.

Dans l'ensemble des effets produits par le traitement thermique d'un BPR, mentionnons la forte réaction pouzzolanique à une température comprise entre 65°C et 90°C, de la fumée de silice [4], qui modifie la structure des hydrates formés.

Le traitement thermique constitue pour les BPR un moyen d'améliorer leurs performances mécaniques. Le processus s'effectue après la fin de la prise en atmosphère humide ou sèche à la pression atmosphérique.

La résistance à la compression des éprouvettes cubiques et leur type de mûrissement, sont donnés dans le tableau 4.7 ci-dessous.

TABLEAU 4.7 RÉSISTANCE EN COMPRESSION SUR CUBES DES BPR

BPR 2 (cubes de 50 mm)	Type de mûrissement	N° ref.	f _c (MPa)	f _c Moyenne (MPa)
Après 14 jours (Mûris 14 jours dans l'eau à 20°C)	20°C	1	106	107
	20°C	2	101	
	20°C	3	115	
Après 14 jours (Mûris trois jours dans l'eau à 90°C)	20°C+90°C	4	187	181
	20°C+90°C	5	174	
	20°C+90°C	6	182	

4.6.1 La vitesse d'élévation et de refroidissement de la température

D'autre part, il est essentiel que la vitesse d'élévation de la température et le refroidissement se fasse lentement.

Le tableau 4.8 montre la résistance en compression des six cubes de BPR mûris uniquement dans l'eau à 90°C pendant 3 jours et la seule différence est que trois échantillons parmi les six ont été chauffés et refroidis, par hasard, plus lentement.

TABLEAU 4.8 COMPRESSION SUR CUBES DES BPR

BPR 2 (cubes de 50 mm)	Type mûrissement	N°ref.	f _c (MPa)	f _c Moyenne (MPa)
Après 7 jours (Elevation et refroidissement de la T°C plus lente)	90°C	1	191	190
	90°C	2	189	
	90°C	3	190	
Après 14 jours (Elevation et refroidissement de la T°C lente)	90°C	4	187	181
	90°C	5	174	
	90°C	6	182	

Le tableau 4.8 indique un accroissement de la résistance à la compression de 9 MPa pour un BPR qui a été chauffé et refroidi plus lentement.

CHAPITRE 5

PROCÉDURES DE FABRICATION D'UN BPR

Le présent chapitre traite des procédures utilisées lors de la fabrication des BPR :

- En camion-malaxeur (toupie), utilisé pour malaxer les bétons ordinaires;
- En usine de préfabrication, avec les moyens habituels du préfabricant (malaxeur stationnaire).

L'objectif était de comparer les BPR fabriqués à l'aide du camion-malaxeur et celui fabriqué à l'usine de préfabrication à partir des mélanges obtenus en laboratoire, de tester les possibilités de malaxage et coulage en grande quantité, de confectionner des éprouvettes pour les essais et d'en tirer des renseignements sur les spécifications de la fabrication et de la mise en oeuvre du BPR au Québec.

Les séquences de malaxage n'ont pas été optimisées, mais, pour les matériaux et les équipements utilisés, elles ont donné de bons résultats.

5.1. Formulation du BPR

5.1.1. Fabrication du BPR en camion-malaxeur

Nous avons fabriqué du BPR selon deux formulations la première, ne contenait pas de quartz broyé et la deuxième contenait du quartz broyé. Dans chaque cas nous avons fabriqué 2,6 m³ de BPR (figure 5.1).

Dans le tableau 5.1, on retrouvera les formulations des BPR malaxés en camion- malaxeur exprimées en masse par rapport à la masse du ciment utilisée dans chacun des cas et représentée par le mélange 1 et le mélange 2 du tableau.

La demande en eau et en superplastifiant des échantillons de BPR frais a été établie après les essais de laboratoire (Chapitre 4), et ce afin d'assurer une bonne mise en place, par vibration.

5.1.2 Fabrication du BPR à l'usine de préfabrication

On retrouvera la formulation du BPR malaxé en usine dans le tableau 5.1. Ce béton sera identifié comme étant le mélange BPR 3.

TABLEAU 5.1 FORMULATION MASSIQUE DES MÉLANGES DE BPR

	* BPR 1	* BPR 2	BPR 3
Ciment	1	1	1
Fumées de silice	0,25	0,325	0,325
Sable	1,43	1,43	1,43
Quartz broyé	0	0,3	0,3
Superplastifiant	0,018	0,027	0,027
Eau	0,25	0,28	0,26
Fibres d'acier	0,2	0,2	0,2

*Mélanges en camion-malaxeur.

5.2 Séquences de malaxage en camion-malaxeur

5.2.1 Mélange sans quartz broyé

Pour le mélange BPR 1, sans quartz broyé, le temps d'obtention d'une pâte sans fibres été d'environ deux heures de rotation de la toupie (à cause du chargement du camion qui s'est fait manuellement - figure 5.2), Il a fallu 30 minutes supplémentaires pour finir le malaxage apres l'ajout des fibres. La séquence de malaxage a été la suivante :

1. En premier lieu, nous avons mélangé les poudres sèches jusqu'à ce qu'un mélange homogène soit obtenu (environ 20 minutes) .
2. En deuxième lieu nous avons ajouté l'eau du mélange sans superplastifiant (environ 25 minutes de malaxage).
3. Nous avons ensuite ajouté le superplastifiant dilué dans le peu d'eau qui avait été gardée en réserve (environ 6 minutes de malaxage). C'est à ce moment que nous avons prélevé les premiers échantillons pour fabriquer les éprouvettes.
4. Nous avons enfin ajouté les fibres métalliques et prélevé des échantillons après 25 minutes de malaxage environ

5.2.2 Aspect du mélange sans quartz broyé

Pour le BPR 1, sans quartz broyé, l'aspect du mélange pendant les séquences de malaxage était le suivant :

- Pendant la séquence 1, la poudre paraissait homogène en se basant sur la couleur du mélange.
- Lors de la séquence 2, l'aspect de la pâte était celui d'une poudre humide avec des boulettes
- Au cours de la séquence 3, l'aspect de la pâte était fluide avec des mottes.
- En pendant la séquence 4, l'aspect de la pâte était fluide et présentait moins de mottes, mais toutes les mottes n'avaient pas encore été dispersées (figures 5.3 et 5.4).

5.2.3 Mélange avec quartz broyé

Pour le mélange BPR 2, qui contenait du quartz broyé, le temps d'obtention d'une pâte homogène sans fibres d'acier été d'environ deux heures de rotation de la toupie, puis environ 30 minutes supplémentaires pour finir le malaxage avec les fibres

Les séquences de malaxage sont les suivantes :

1. On mélange les poudres sèches jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène en se basant sur la couleur du mélange (environ 20 minutes de malaxage). Ensuite on ajoute une partie de l'eau mélangée préalablement avec la moitié du superplastifiant, en prenant le soin de garder une quantité d'eau suffisante pour diluer l'autre moitié du superplastifiant (environ 10 minutes).
2. Après quelques minutes, le restant de superplastifiant dilué dans l'eau est ajouté (environ 8 minutes de malaxage), à ce stade (figure 5.6), des échantillons ont été prélevés pour évaluer l'influence des fibres sur la résistance en compression et flexion. Des fibres métalliques ont enfin été ajoutées (environ 20 minutes de malaxage). A ce stade nous avons des éprouvettes, et nous avons confiné du BPR dans des tubes d'acier et coulé deux poutres de 3 m de longueur (figure 5.5).

5.2.4 Aspect du mélange avec quartz broyé

- Lors de la séquence 1, la poudre humide avait des boulettes plus petites que lors de l'essai sans quartz broyé.
- Durant la séquence 2, la pâte fluide, avait quelques mottes cassées, mais non dispersées (figure 5.6).
- Pendant la séquence 3, la pâte était fluide mais contenait encore quelques boulettes.

5.3 **Séquence de malaxage en usine**

La formulation choisie pour fabriquer du BPR en usine est représentée par le mélange BPR 3, le mélange comportait du quartz broyé. La quantité d'eau et de superplastifinat avaient été diminuées compte tenu des résultats des essais effectués pendant la fabrication du BPR en camion-malaxeur (figure 5.7).

Dans l'usine, les fibres d'acier ont été ajoutées durant le malaxage des poudres sèches pour améliorer le cisaillement pendant la formation de la pâte, de façon à casser les nodules qui ont tendance à se former lors d'introduction de l'eau dans le mélange (figures 5.8 et 5.9).

La durée totale du malaxage après l'introduction des composants secs a été de 18 minutes plus un temps supplémentaire de 15 minutes après introduction de l'eau. Le chargement du malaxeur s'est également fait à la main, comme au laboratoire.

Le déroulement du malaxage et l'introduction séquentielle a été la suivante :

1. En premier lieu , nous avons mélangé les poudres sèches (environ 3 minutes), nous avons ensuite introduit 1/4 % de la quantité de fibres (deux boites de fibres de 63 kg) et nous avons malaxé pendant 25 minutes.
2. Nous avons ensuite, ajouté l'eau du mélange (sauf 20 litres) et plus de la moitié du superplastifiant dilué dans l'eau (comme le superplastifiant ne pouvait être pesé avec l'eau de la centrale, il avait donc été décidé de le prédiluer et de le verser en même temps que la quantité principale d'eau dosée par la centrale), puis nous avons malaxé pendant 2 minutes.
3. Nous avons enfin prodédé au malaxage après l'introduction du reste des fibres et de 10 litres d'eau pour atteindre le rapport $E/C=0,26$ pendant 9 minutes.

5.3.1 L'aspect du mélange fabriqué en usine

- Le ciment présentait quelques mottes, lors de la séquence 1.
- Pas de pâte, lors de la séquence 2.
- Après 2 minutes, il y avait une pâte avec beaucoup de mottes et quelques boules de fibres, mais après 4 minutes de malaxage la pâte était belle quoiqu'un peu plastique (figure 5.10 et figure 5.11).

5.4. Confection et cure des éprouvettes en BPR

5.4.1 Confection des éprouvettes

Tous les échantillons de BPR coulés ont été vibrés sur la table vibrante.

Les échantillons des BPR frais ont été prélevés dans de moules en plastique, conformément à la norme ACNOR A23.2-1D, dans des moules cylindriques de 100x200 mm (pour chaque formulation de béton), dans des moules cylindriques de 95x50 mm (pour les essais de perméabilité aux ions chlore), dans des moules prismatiques 75x75x350mm (pour l'essai de gel/dégel), dans des moules prismatiques 255x280x220 mm (deux dalles pour l'essais de résistance à l'écaillage) conformément à la méthode d'essai ASTM C 672 et dans deux grandes éprouvettes de 200x300x3000 mm (pour les essais en compression sur des carottes).

Pour étudier l'influence du confinement sur la résistance en compression et sur la ductilité, nous avons coulé du BPR dans des tubes d'acier de 100 mm de diamètre, 1400 mm de longueur et 3 mm d'épaisseur de paroi.

Les autres caractéristiques du montage pour le BPR confiné en usine sont présentés dans la figures 5.12 et pour le BPR confiné en laboratoire dans figure 5.13. Les deux tubes de BPR 3 ont été coulé une heure après la fin du malaxage avec une pâte devenue légèrement cohésive, mais suffisamment thixotropique pour pouvoir effectuer une mise en place par vibration. Le BPR confiné a subi une vibration puissante à l'extérieur et à l'intérieur à l'aide d'une aiguille vibrante (figure 5.12a et 5.12b).

5.4.2 Programme de mûrissement

Tous les échantillons de BPR coulés sur la table vibrante ont été recouverts d'une toile de jute mouillée et d'un plastique. Les tubes confinés, pressés ou non-pressés ont été laissés à la température ambiante.

Les programmes de mûrissement ont été les suivants :

- trois jours dans l'eau à une température de 90⁰ C
- vingt huit jours dans l'eau à 20⁰ C.
- sept jours dans l'eau à 20⁰C , puis trois jours dans l'eau à une température de 90⁰ C.

Le mûrissement du BPR 2 fabriqué en camion-malaxeur a été le suivant : Sept jours en eau à 20⁰C puis trois jours à la températures de 90⁰C, pour les éprouvettes cylindriques et prismatiques. Tous les BPR, sauf ceux qui ont servi à l'étude de la résistance en fonction de la température de mûrissement, ont été mûris 28 jours dans l'eau à 20⁰ C.

Pour les grandes éprouvettes de 200x300x3000 mm, le mûrissement a duré 35 jours en atmosphère ambiante pour les essais en compression sur les carottes.

Le programme de mûrissement est présenté dans le tableau 5.4 pour les éprouvettes cylindriques et dans le tableau 5.5 pour les éprouvettes qui ont servi à des essais de gel-dégel, d'écaillage et de flexion .

En conclusion, le BPR est passé du stade du laboratoire, à celui d'un produit industriel, et sa production a pu être réalisée avec un matériel traditionnel.

L'utilisation d'un malaxage efficace contribue à diminuer le temps de malaxage qui reste toutefois supérieur à celui d'un béton ordinaire.

L'absence d'armatures traditionnelles et la bonne ouvrabilité du BPR facilitent considérablement le remplissage des coffrages, de plus la finesse des poudres utilisées permet d'obtenir une très belle qualité de parement.

**TABLEAU 5.4 PROGRAMME DE MÛRISSEMENT POUR LES
ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES**

Type de mûrissement	No ref.	BPR 2 A* (jours)		BPR 2 (jours)		BPR 3 (jours)	
	-	20°C	90°C	20°C	90°C	20°C	90°C
Cylindre 100 x 200 (mm)	1	1	3	7	3	28	3
	2	1	3	7	3	28	3
	3	1	3	7	3	28	3
	4	7	3	1	3	28	3
	5	7	3	7	3	28	3
	6	7	3	7	3	28	3
	7	7	3	7	3	28	3
	8	7	3	7	3	28	3
	9	7	3	7	3	28	3
	10	7	3	7	0	28	0
	11	7	3	1	0	28	0
	12	7	3	1	0	28	0

*Le mélange 1A est sans fibre d'acier.

**TABLEAU 5.5 PROGRAMME DE MÛRISSEMENT POUR LES ESSAIS DE
GEL/ DÉGEL, ÉCAILLAGE ET FLEXION**

	N° ref.	BPR 2A (jours)		BPR 2 (jours)		BPR 3 (jours)	
		20° C	90° C	20° C	90° C	20° C	90° C
Température de l'eau	-						
Gel/dégel 75x75x350	1	28	0	28	0	28	0
	2	7	3	7	3	7	3
Ecaillage 255x280x75	1	28	0	28	0	28	0
	2	7	3	7	3	7	3
Flexion 100x100x300	1	28	0	28	0	28	0
	2	7	3	7	3	7	3

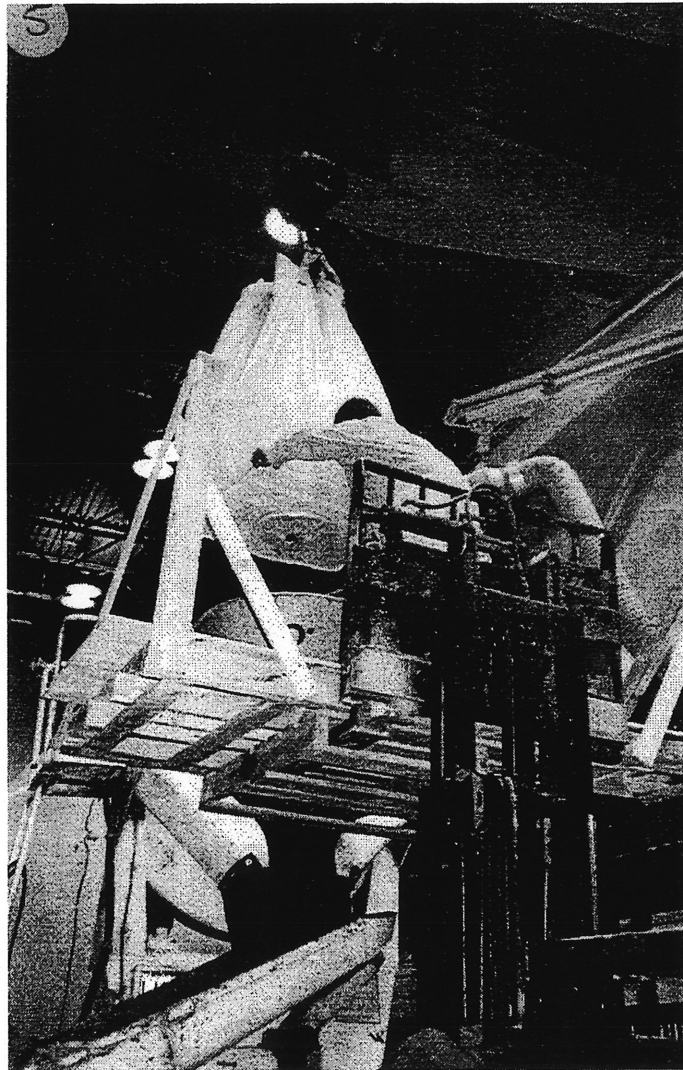


Figure 5.1 Dosage et chargement du camion malaxeur

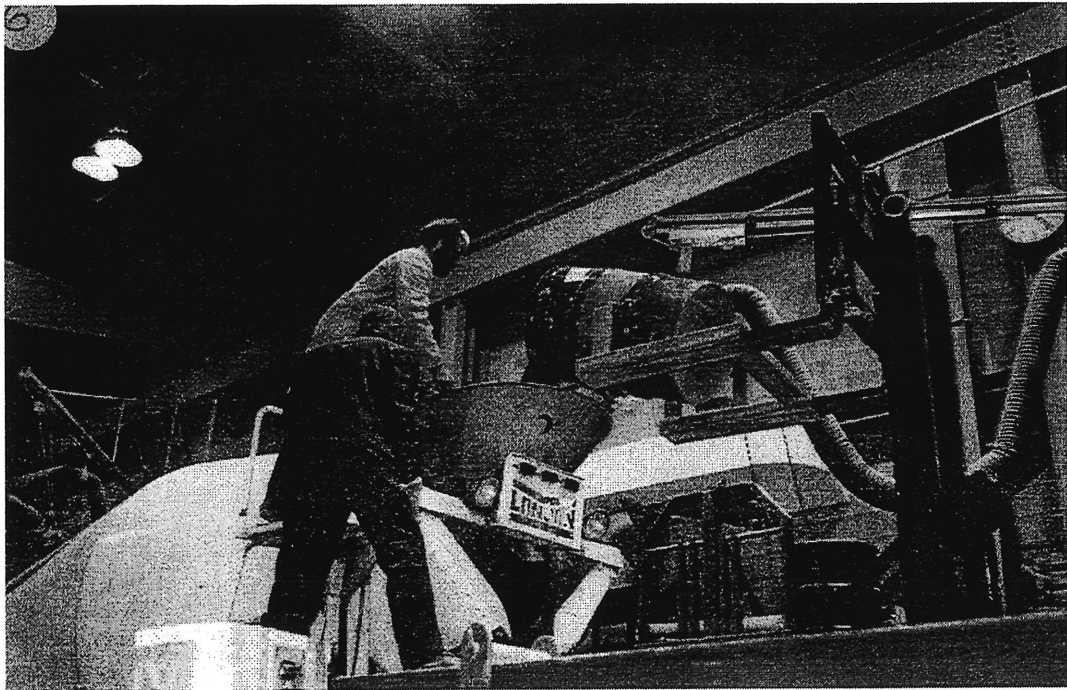


Figure 5.2 Fabrication du BPR en camion-malaxeur
(séquence d'introduction du superplastifiant par fût verseur)

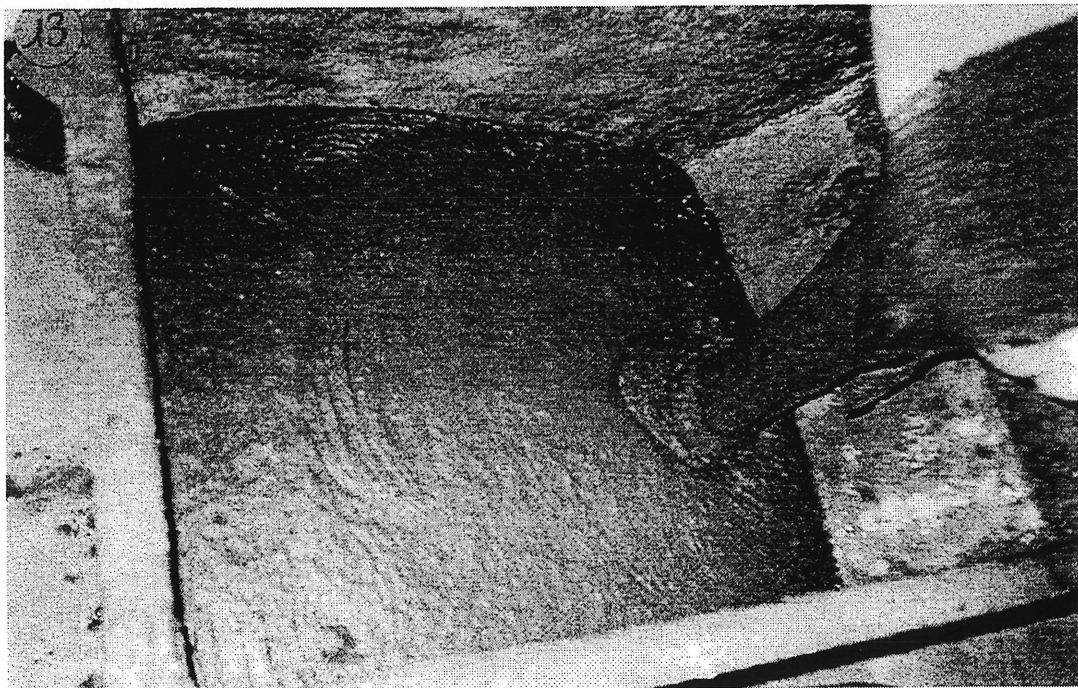


Figure 5.3 Aspect de la pâte du BPR 1 après l'introduction
des fibres d'acier dans le camion-malaxeur

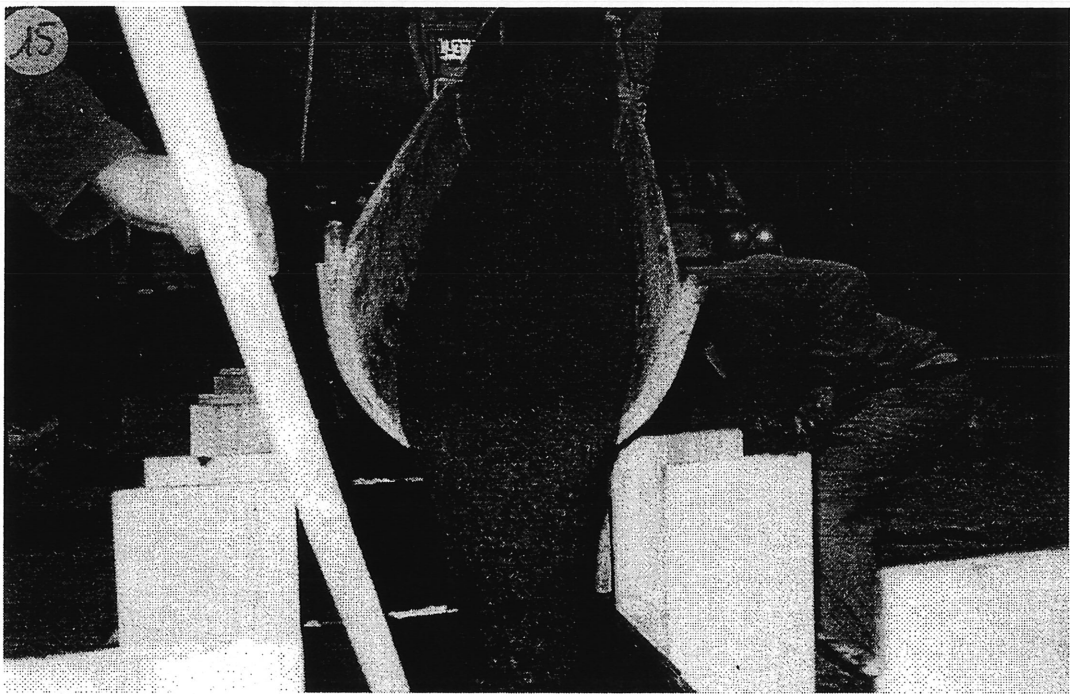


Figure 5.4 Aspect de la pâte BPR1, sans quartz broyé (camion-malaxeur)

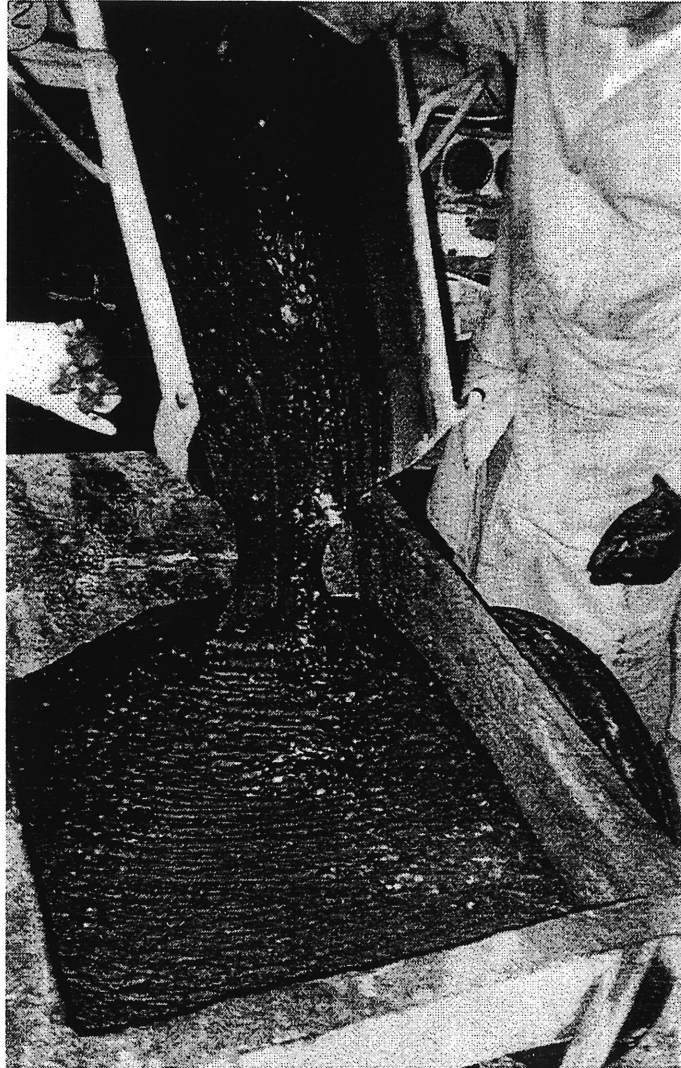


Figure 5.5 Aspect de la pâte du BPR 2 avant l'introduction des fibres d'acier

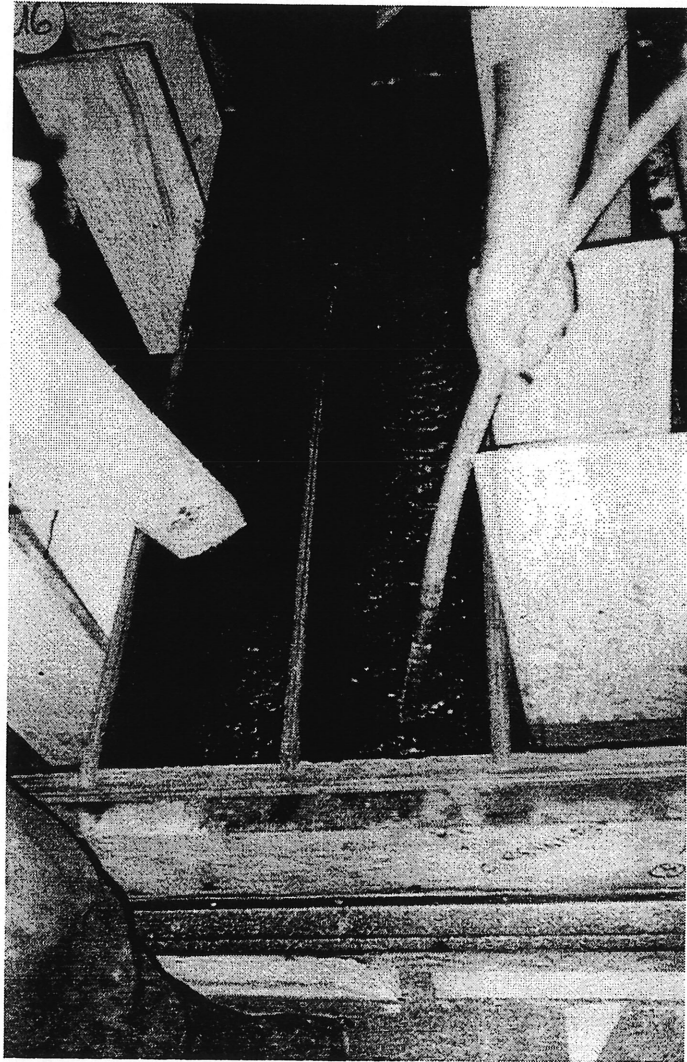


Figure 5.6 Coulage des deux poutres en BPR 2, et consolidation par vibration interne

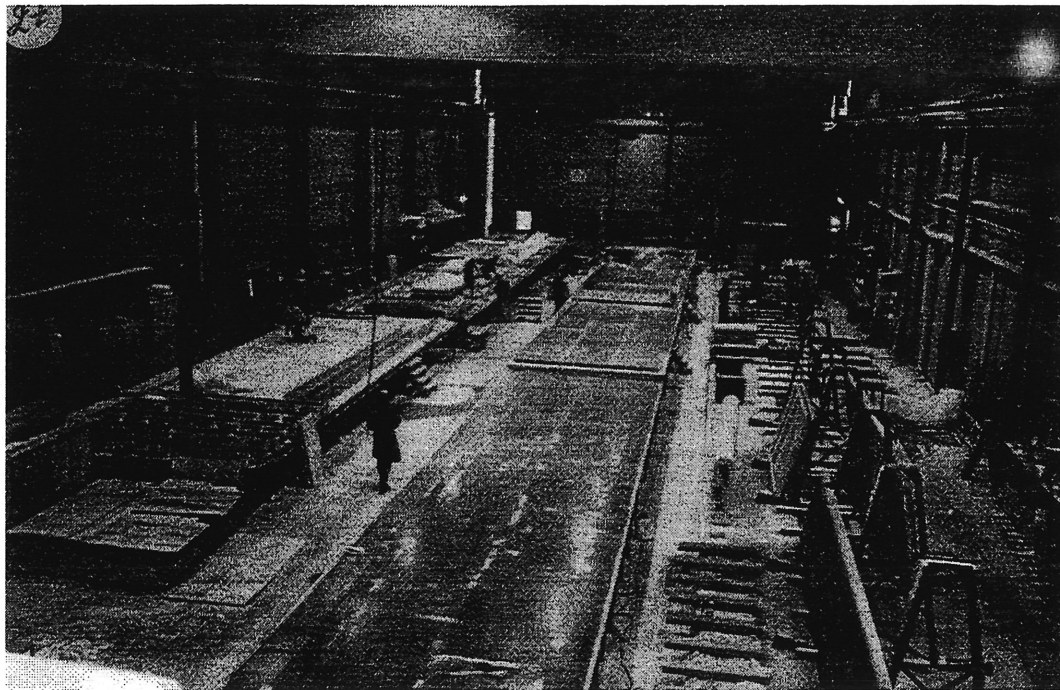


Figure 5.7 Hall d'essai de l'usine de préfabrication, avec préparation des coffrages sur tables vibrantes.

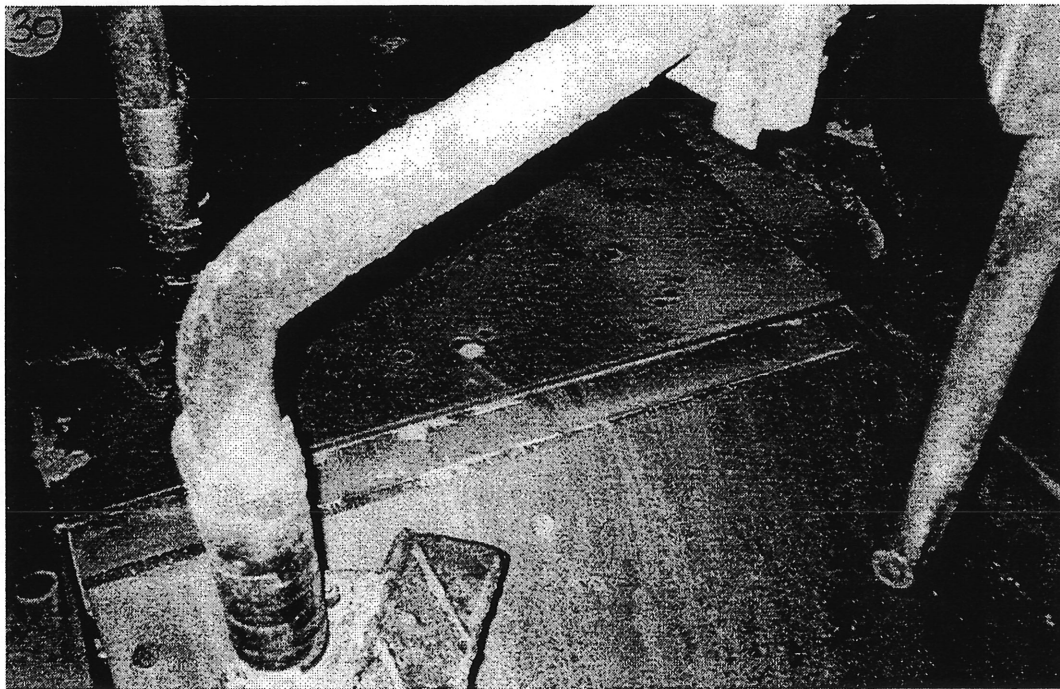


Figure 5.8 Intérieur du malaxeur "Couvrot"



Figure 5.9 Aspect du mélange BPR 3, après le versement d'une partie des fibres



Figure 5.10 Aspect de la pâte à la sortie du malaxeur



Figure 5.11 Aspect de la pâte une heure après la fin du malaxage

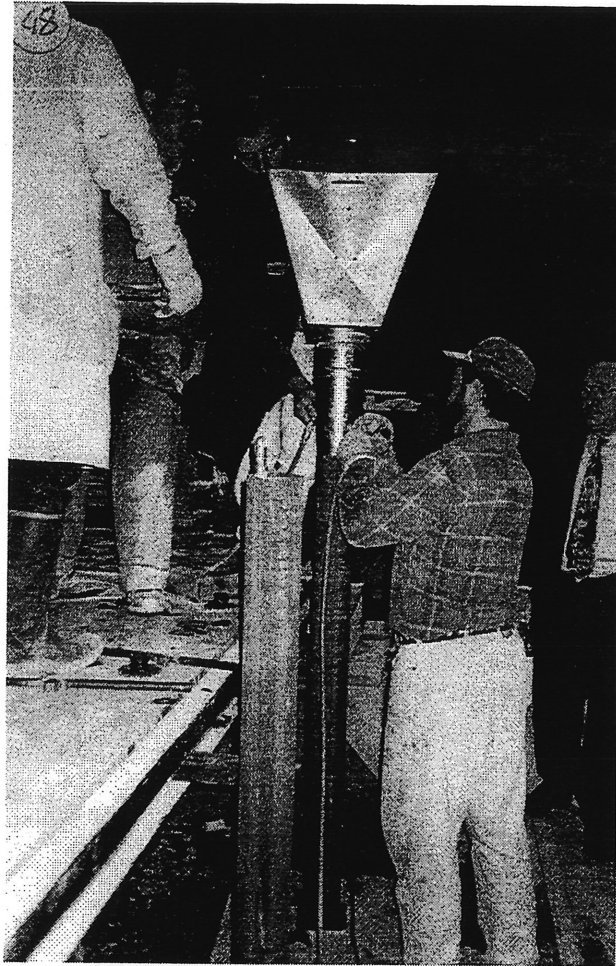


Figure 5.12a BPR confiné en usine, dans deux tubes d'acier de 3 mm d'épaisseur, et vibré avec l'aiguille vibrante

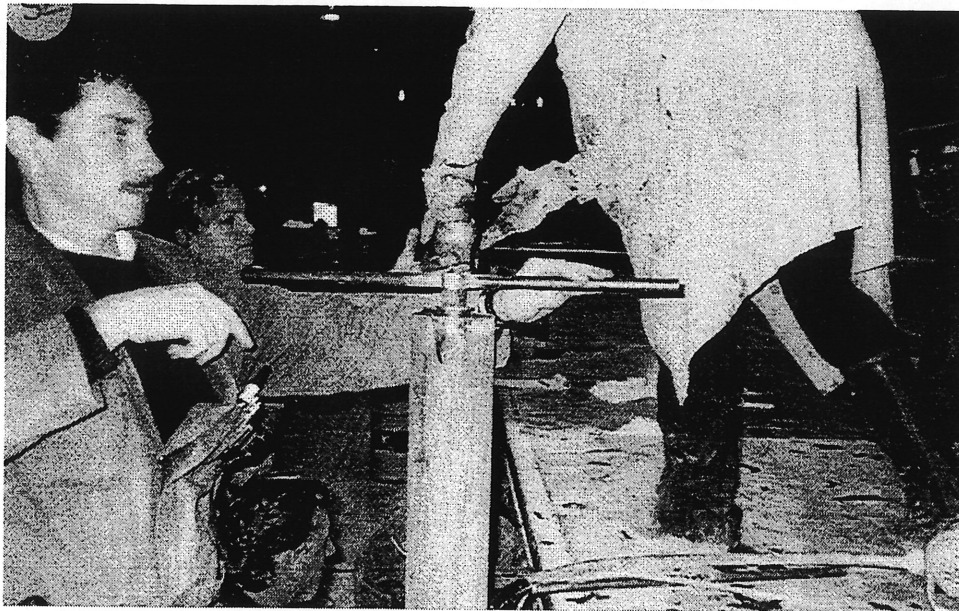
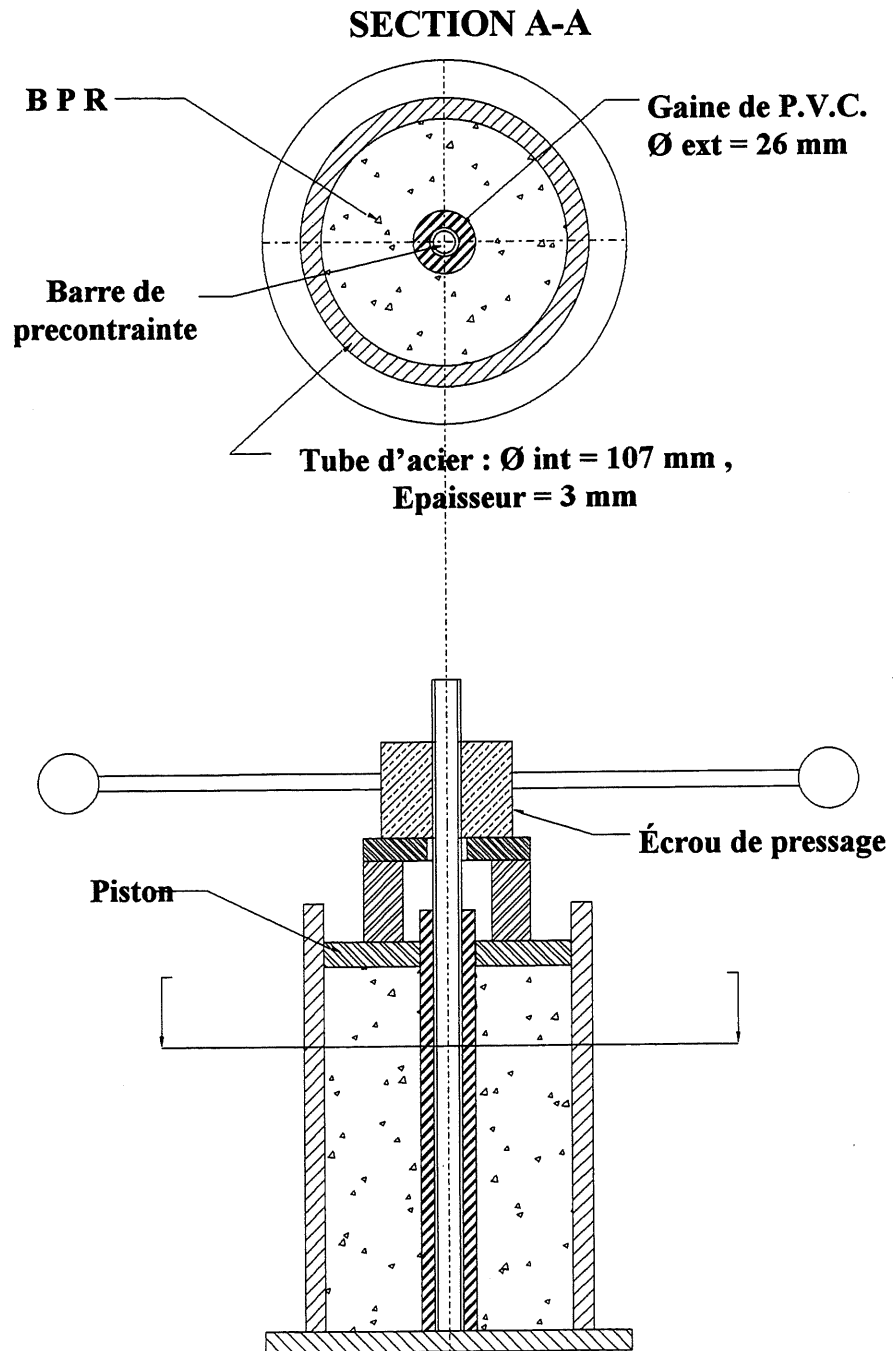


Figure 5.12b Pressage par serrage du BPR 3 confiné en usine



**Figure 5.12 BPR confiné en usine
mécanisme de serrage et de pressage**

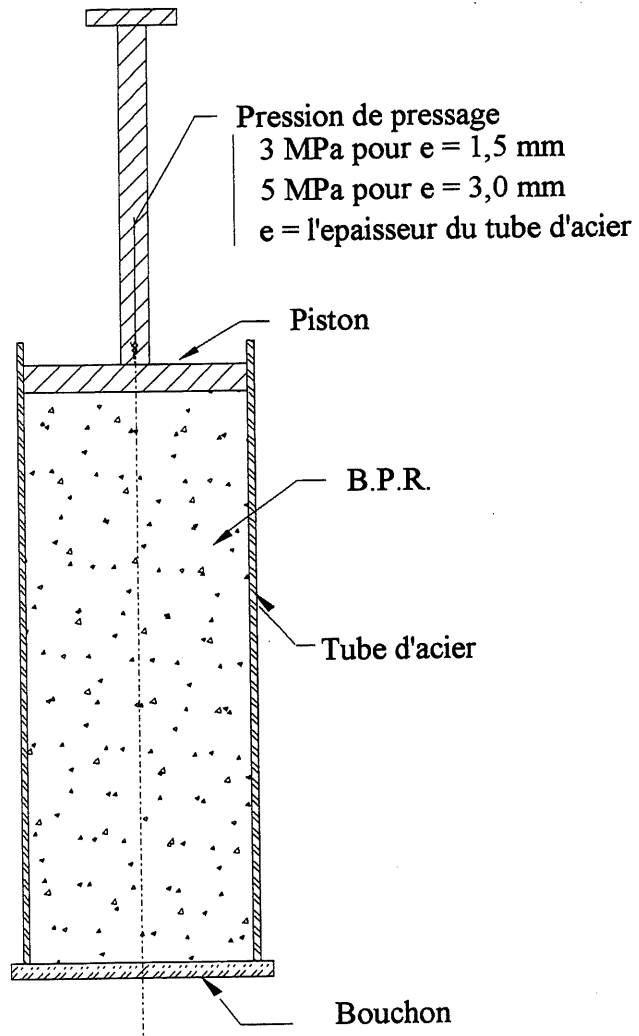


Figure 5.13 Mécanisme de pressage et de confinement utilisé au laboratoire

CHAPITRE 6

ESSAIS SUR LES BPR FABRIQUÉS EN CAMION-MALAXEUR ET À L'USINE

Pour beaucoup d'ingénieurs et gens de la pratique, la résistance en compression d'un matériau contenant du ciment Portland est encore perçue comme étant proportionnelle à la quantité de ciment qui l'on y incorpore.

Cependant, déjà à la toute fin du siècle dernier, Feret avait pu déjà démontrer qu'un des facteurs déterminant la résistance d'un matériau à base de ciment Portland était essentiellement sa porosité [21].

Si on va plus loin dans la compréhension des principes qui gouvernent la résistance mécanique des matériaux à base de ciment Portland, on peut appliquer au béton les principes fondamentaux qui gouvernent le comportement des matériaux fragiles tels les céramiques qui présentent de nombreuses similitudes microstructurales avec le béton [22].

Les études sur la relation qui existe entre la microstructure et la résistance dans le domaine des céramiques ont démontré aussi que la dimension des micrograins et le manque d'homogénéité sont des facteurs qui contrôlent la résistance en traction.

Il est bien connu que la résistance à la compression des matériaux fragiles est plus grande que leur résistance en traction ce qui s'explique par la propagation rapide d'une simple microfissure dans un matériau soumis à un effort en tension. Par contre il faut qu'un certain nombre de fissures de tension se rejoignent pour causer une rupture en compression.

En appliquant la théorie de Griffith sur la rupture en tension et les lois de la mécanique des milieux continus [21], on peut prédire que la résistance en compression d'un matériau céramique homogène est huit fois supérieure à celle de sa résistance en tension.

L'un des objectifs de cette recherche est l'étude comparative du comportement mécanique d'éprouvettes et d'éléments structuraux, fabriqués en camion-malaxeur et à l'usine, en incorporant des microfibrilles d'acier, ou en le confinant dans une mince enveloppe métallique de différentes épaisseurs.

Il est connu que le confinement latéral dans une mince enveloppe métallique peut modifier le comportement fragile du béton, en apportant une augmentation considérable de la résistance du

coeur confiné de même que l'augmentation de la déformabilité longitudinale à la contrainte maximale du béton, rendant ainsi la rupture plus graduelle et plus ductile (adoucissement de la pente de la partie post-pic de la courbe contrainte-déformation)[15].

Par confinement du BPR et par pressage, en appliquant une pression importante on peut acquérir une augmentation de la densité relative en réduisant la quantité d'air occlus et par essorage de l'eau [23].

6.1 Essais mécaniques

Les caractéristiques en compression et flexion du BPR, renforcé ou non de fibres d'acier, sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques de dimension 100x200 mm et des poutres de 100x100x300 mm (tableaux 5.4 et 5.5). Les essais sont effectués en conformité respectivement avec la norme ASTM C 39 et la norme ASTM C1018.

6.1.1 Influence de la compacité du BPR sur la résistance en compression du BPR

Trois éprouvettes de BPR 3 (fabriqué en usine) ont été testées en compression au démoulage soit 22 heures après leur fabrication. La compacité a été déterminée à ce moment là. Il y a lieu de remarquer que le démoulage s'est fait facilement à 14 heures et ce grâce au superplastifiant à base naphthalène [24].

Le tableau 6.1 suivant, présente les résultats de ces essais :

TABLEAU 6.1 RÉSISTANCE EN COMPRESSION ET COMPACITÉ
DU BPR 3 FABRIQUÉ EN USINE APRÈS 22 HEURES

Éprouvettes	No.ref	Densité d_o	Densité d_s	Compacité d_o/d_s	$f_c^{(*)}$ (MPa)
cylindriques BPR (100X300)	10	2,422	2,828	0,856	33
	11	2,425	2,829	0,857	34,5
	12	2,432	2,829	0,860	35,5

(*) Il y a lieu de remarquer que 22 heures après leur fabrication, les éprouvettes ont testé de l'ordre 34 MPa en compression.

Comme on le constate dans le tableau 6.2 suivante, des compacités moins élevées expliquent la plupart du temps la baisse de la résistance en compression d'un échantillon.

**TABLEAU 6.2 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION
EN FONCTION DE LA COMPACITÉ**

Éprouvettes cylindrique (100 x300)	No. ref.	Compacité d_0/d_3	Âge jours	f_c MPa	f_c Moyen
BPR 2A non fibré	4	0,856	16	164	163
	5	0,859	16	159	
	6	0,859	16	167	
BPR 2 fibré	1	0,867	16	228	217
	2	0,866	16	206	
	3	0,869	16	218	
BPR 3 fibré	1	0,856	14	202	197
	7	0,857	14	203	
	3	0,854	14	187	

Les éprouvettes BPR 2A et BPR 2 sont issues d'un même gâchée (camion malaxeur). La première éprouvette ne contenant pas de fibres d'acier mais la seconde oui. Les éprouvettes ont été mûries dans l'eau à 20°C pendant 7 jours, puis dans l'eau à 90°C pendant 7 jours (tableau 4.4). Le BPR 3 a été mûri dans l'eau à 90°C pendant 3 jours seulement. Les compacités des éprouvettes ont été mesurées après le mûrissement.

Le BPR 2 fibré présente une meilleure compacité, a été plus homogène, plus fluide et a présenté une meilleure maniabilité que le BPR 2A lors de sa mise en place. Il semble que les fibres ont amélioré l'homogénéité du BPR par effet de cisaillement des grumeaux se formés dans le BPR 2A.

La compacité moins élevée du BPR 3 s'explique par le fait que lors de sa fabrication en usine, on a utilisé moins d'eau et de superplastifiant que le BPR 2 et que les échantillons de BPR 3 ont été confectionnés longtemps après le fin du malaxage.

6.1.2 Essais en compression sur carottes

Des essais en compression ont été effectués sur deux éprouvettes cylindriques de 95x190 mm qui ont été obtenues par carottage d'une poutre de 200x200x3000 mm de BPR fabriqué dans le camion-malaxeur.

Les carottes ont été prélevées à chaque extrémité de la poutre, après 35 jours de mûrissement à l'air ambiant et 3 jours de mûrissement dans l'eau à 90 °C.

Le tableau 6.3 suivant, présente les résultats de la résistance en compression obtenus pour les deux carottes de BPR fabriqué dans le camion-malaxeur.

TABLEAU 6.3 RÉSISTANCE EN COMPRESSION DES CAROTTES DE BPR

	No. ref.	Mûrissement à l'air	en jours 90°C	Âge (jours)	f _c (MPa)	f _c moyenne (MPa)
BPR 2fibré carottes	1	0	3	38	218	211
	2	0	3	38	204	

6.1.3 Module d'élasticité et coefficient du Poisson

Le module d'élasticité longitudinal est calculé à partir de la pente à l'origine de la courbe effort-déformation en sollicitation monoaxiale dans sa partie linéaire. Avant de procéder à l'essai de compression uniaxiale avec asservissement en déformation sur cylindres, quatre séries de chargement-déchargement ont été effectuées.

Le niveau maximum atteint par la charge est fixé à 40% de la résistance mesurée sur les cylindres normalisés de 100 mm de diamètre par 200 mm de longueur afin d'éviter l'endommagement des éprouvettes. Les premiers et deuxièmes chargements permettent d'assurer une bonne assise du cylindre sur les plateaux de la presse et de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesure. Les valeurs mesurées lors du troisième et quatrième chargements servent au calcul du module d'élasticité en compression et du coefficient de Poisson. Les chargements se font en asservissant la charge à un taux de 0,3 MPa/s, qui correspond au taux spécifié par la norme ASTM C 469 (Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression)

Les résultats obtenus pour le module d'élasticité et le coefficient du Poisson sont présentés dans le tableau 6.4 suivant :

TABLEAU 6.4 MODULE D'ELASTICITÉ ET COEFFICIENT DU POISSON

Eprouvettes cylindriques (100x200)	No. ref :	Module E_c	Coefficient Poisson
BPR 2A non fibré	7	46	0,18
	8	45	0,18
BPR 2 fibré	5	48	0,19
	6	49	0,19
BPR 3 fibré*	6	49	0,19

(*)Une seule éprouvette testée

6.1.4 Compression uniaxiale avec asservissement en déformation

Les essais ont été effectués sur une presse MTS d'une capacité de 5000 kN dont le schéma est présenté dans la figure 6.1 (à la page 83). Un système d'acquisition de données permet un enregistrement en continu des valeurs (des signaux provenant des appareils de mesure) de la charge appliquée et de la déformation de l'échantillon.

Les résultats obtenus pour les deux mélanges BPR 2 et BPR 3 fibré sont présentés dans le tableau 6.5 et la courbe contrainte-déformation pour BPR 2 éprouvette 7 est présentée dans la figure 6.3.

L'éprouvette de référence BPR 2 (échantillon 8) se fissure selon un plan traversant l'échantillon en diagonale.

Lorsque la matrice du BPR (figure 6.3) est entièrement rompue (dans le plan de fissure), seules les fibres reprennent l'effort. L'arrachement progressif des fibres est la cause de cette grande ductilité.

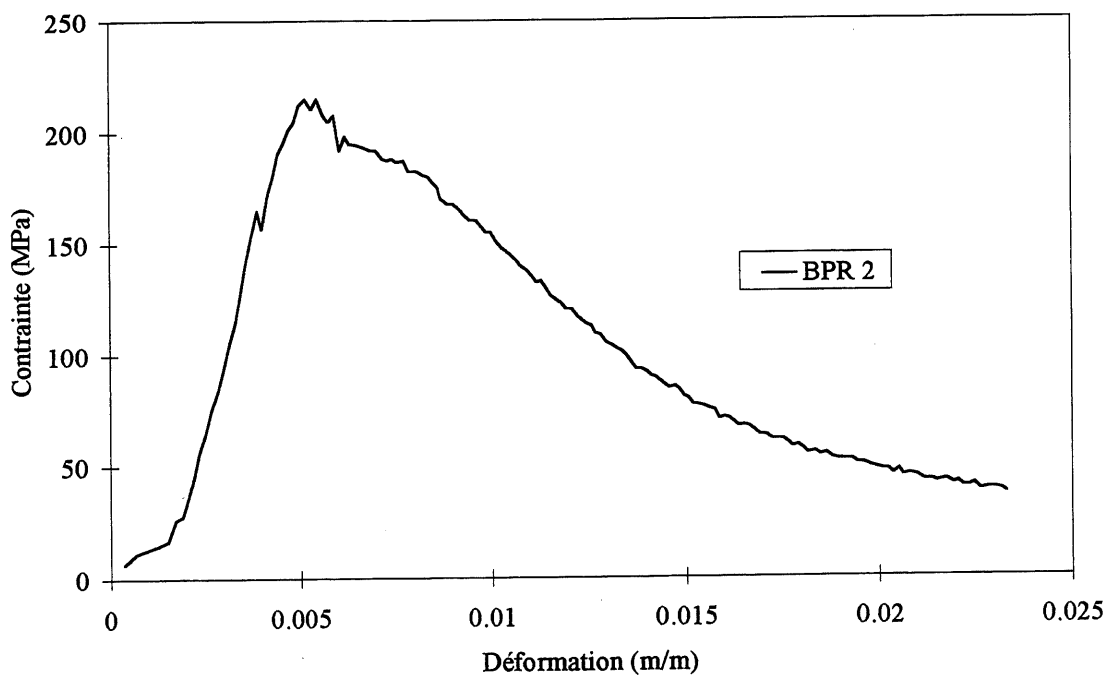


Figure 6.3 Courbe contrainte-déformation BPR 2 (7)

TABLEAU 6.5 COMPRESSION AVEC ASSERVISSEMENT EN DÉFORMATION

	No. ref.	Module E_c (GPa)	Contrainte et Déformation au Pic	
			Contrainte MPa	Déformation 10^{-3} m/m
BPR 2 (**)	7	42	215	5,5
(camion malaxeur)	8	42	215	5,5
BPR 3	5	40	191	4,9
(usine)	6	40	191	4,9

(**) Pendant les essais, il n'y a eu aucune rupture brutale au pic, grâce à la présence des fibres.

6. 1. 5 Flexion sur poutre

Les essais de flexion ont été exécutés conformément à la norme ASTM C1018 sur poutres de 100 x 100 x 300 mm.

L'évaluation des indices de tenacité en flexion implique des mesures simultanées de la charge appliquée et de la déflexion correspondante de la poutre. Comme la norme le stipule, il est

primordial de pouvoir exclure de la mesure de la déflexion les déformations de la poutre testée. Cette recommandation est émise par plusieurs chercheurs [27].

Pour parvenir à mesurer la deflexion de la poutre, l'utilisation d'un montage tel que présenté à la figure 6.2.a.(à la page 85) est nécessaire. Un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) est fixé à un cadre qui demeure constamment parallèle à l'axe neutre de la poutre puisqu'il est maintenu sur la poutre par quatre vis à bout pointu qui s'appuient aux intersections de l'axe neutre et des axes normaux aux appuis inférieurs. Pour sa part, la pointe mobile du LVDTs'appuie sur une tige qui suit la déflexion de l'arrête supérieure centrale de la poutre.

Les poutres sont testées sur une presse MTS d'un capacité de 5000 kN (figure 6.1 et 6.2.a; à la page 84 et 85) modifiée par l'ajout d'une cellule de charge d'un capacité de 250 kN. La précision des traducteurs de déformations longitudinales (LVDT) utilisées est de 0,001 mm. L'asservissement des essais se fait sous contrôle du déplacement des plateaux de la presse, à un taux de 0,05 mm/min, qui correspond à la limite inférieure prescrite par la norme ASTM C1018. Un système d'acquisition de données permet un enregistrement en continu des valeurs de la charge appliquée et de la déflexion de la poutre.

Les résultats des essais ont été portés sur le tableaux 6.6 et les courbes charge-déformation sont présentées dans la figure 6.5.

TABLEAU 6.6 FLEXION EN 4 POINTS SUR BPR

Éprouvettes prismatiques: 100x100x300 mm	No. ref.	Contrainte Max. (MPa)	Flèche au Pic (mm)
BPR 2 A non fibré	1	7	0,03
	2	10	0,04
BPR 2 fibré	1	22	0,94
	2	37	(***)
BPR 3 fibré	1	15	0,28
	2	16	0,23

(***) L'interruption de données due à une saturation en sortie sur la voie enregistrant l'effort (nous nous situons à la limite de la capacité de la cellule externe de force, soit 25 MPa dans les conditions d'essais et la contrainte maximale a été prise sur la cellule interne de la presse).

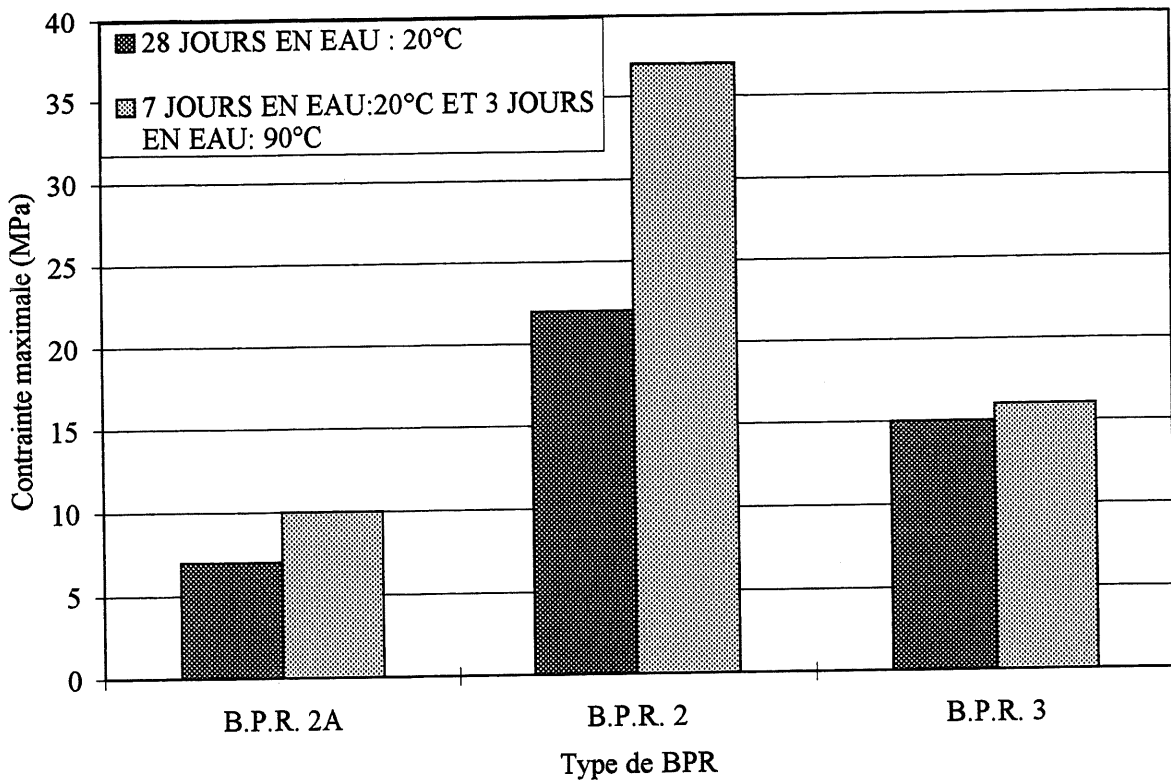


Figure 6.4 Influence du mûrissement sur la contraite maximale en flexion

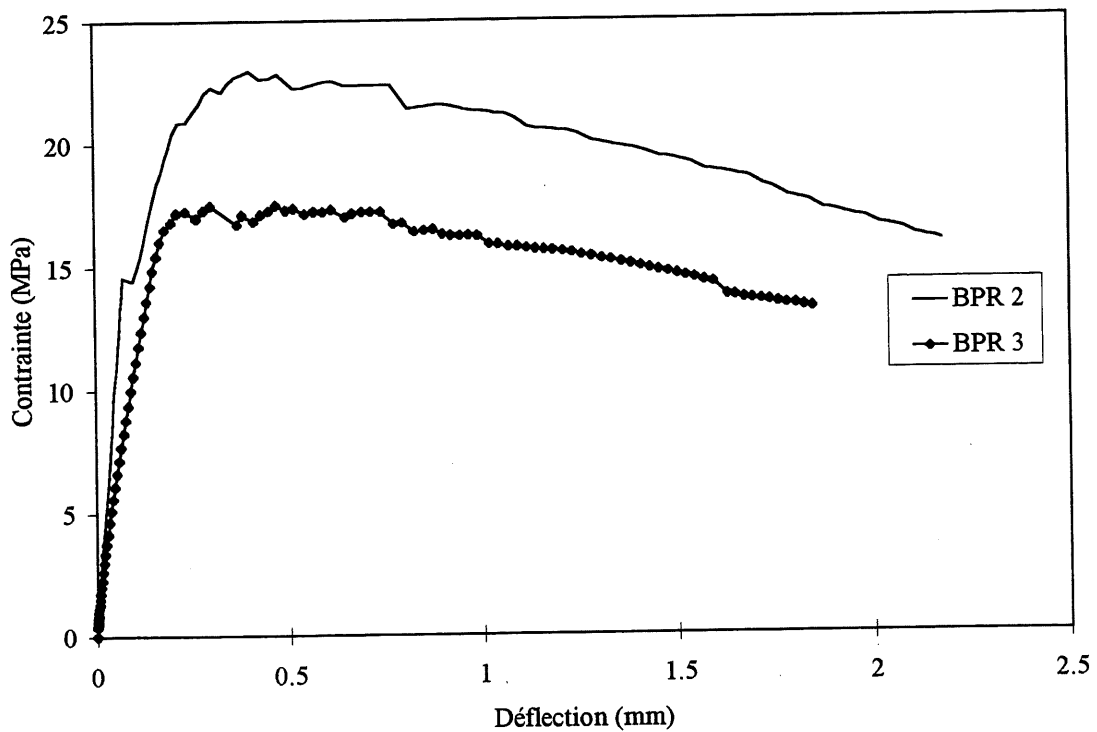


Figure 6.5 Contraite-Déflexion pour BPR 2 (camion-malaxeur) et BPR3(usine)

Le mûrissement a été de 28 jours dans l'eau à 20°C pour les éprouvettes de référence 1 et de 7 jours en eau à 20°C suivis de 3 jours en eau à 90°C pour celles de référence 2. L'influence du type de mûrissement sur la contrainte maximale en flexion est présentée dans la figure 6.4.

Avant la première fissuration, les BPR fibrés possèdent le même module d'élasticité que leurs homologues non fibrés (obtenu par superposition des courbes contrainte-déflexion).

Quelle que soit le type de mûrissement, le BPR 2 est le seul qui a présenté une rupture avec multifissuration, ceci a permis une meilleure répartition de la charge.

La bonne ductilité obtenue par l'utilisation de fibres est considérablement améliorée grâce au mûrissement de 3 jours dans l'eau à 90°C.

6.2 BPR confiné

Le programme expérimental réalisé en laboratoire et en usine sur les BPR confinés s'est limité à des essais sur des éprouvettes (108 x 220 mm) confinées de la façon suivante :

- par des tubes d'acier de 3 mm d'épaisseur à l'aide d'une barre de précontrainte pour effectuer un pressage, à l'usine (figures 5.12, 5.12a. et 5.12b.)
- par des tubes d'acier d'épaisseur 1,5 mm et/ou 3 mm , à l'aide d'un montage pour les essais de fluage, en laboratoire (figure 5.13)
- par compression appliquée pendant 24 heures sur la pâte fraîche du BPR confiné par les tubes d'acier précédents.
- en utilisant le mélange du BPR 3 fibré pour le béton confiné en usine.
- en utilisant deux mélanges du BPR 2 : un avec fibres d'acier et l'autre sans fibres d'acier en laboratoire.
- pour un mûrissement de 3 jours dans l'eau à 90°C pour le BPR confiné à l'usine et 7 jours en eau à 20°C suivi de 3 jours en eau à 90°C pour le BPR confiné au laboratoire.

6.2.1 BPR confiné en usine

Pour étudier l'influence du confinement sur la résistance en compression et sur la ductilité nous avons coulé du BPR dans deux tubes d'acier, de 108 mm de diamètre, de 1400 mm de longueur et de 3 mm d'épaisseur de paroi.

Les deux tubes ont été coulés une heure après la fin du malaxage, avec une pâte devenue cohésive, mais suffisamment thixotropique pour la mise en place par vibration. Le BPR confiné a subi une vibration puissante à l'extérieur et à l'intérieur à l'aide d'une aiguille vibrante.

Un tube de BPR confiné a subi une compression pendant 24 heures qui a vu le piston du tube comprimé descendre de 100 mm pour une hauteur de béton de 1400 mm (7%). Les caractéristiques du montage utilisé pour le pressage sont présentées dans la figure 5.12.

Pour effectuer les essais en compression sur BPR confiné en usine, les tubes ont été découpés en deux éprouvettes d'une hauteur 220 mm à chaque des extrémités du tube.

Les essais ont été effectués en conformité avec la norme ASTM C 39 sur une presse MTS d'une capacité de 5000 kN qui est schématisée dans la figure 6.1. La charge en compression a été appliquée juste sur la surface de béton en enlevant un anneau de 1 mm à chaque extrémité du tube d'acier.

L'effort longitudinal a été mesuré en utilisant des traducteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer) placés autour des colonnes. Des jauges tensiométriques ont été collées sur la surface extérieure des tubes d'acier pour mesurer les efforts latéraux et ajuster le niveau de pression.

Les résultats sont présentés dans la figure 6.6, suivante, et les courbes contrainte-déformation sont présentées dans la figure 6.7.

Le pressage par serrage a permis d'éliminer une partie de l'eau contenue dans le BPR confiné (par essorage) ce qui a diminué le rapport E/C et a augmenté la compacité.

Le pressage a permis de plus un meilleur contact entre la pâte de BPR et l'acier.

La bonne ductilité obtenue par l'utilisation de fibres est considérablement améliorée grâce au confinement dans une enveloppe métallique.

Sur le BPR non pressé, nous avons observé la présence de bulles d'air d'environ 3 mm alors qu'elles étaient totalement absentes dans les BPR 3 pressés. Le pressage permet de refermer une partie de la porosité qui apparaît lors de la mise en place finale.

Le BPR 3 non confiné présente une très bonne ductilité avec l'utilisation de fibres d'acier. Cette ductilité peut être considérablement améliorée par confinement dans une enveloppe métallique qui assure un gain important de la résistance, puisque la contrainte maximale est directement liée au seuil de plasticité de l'acier.

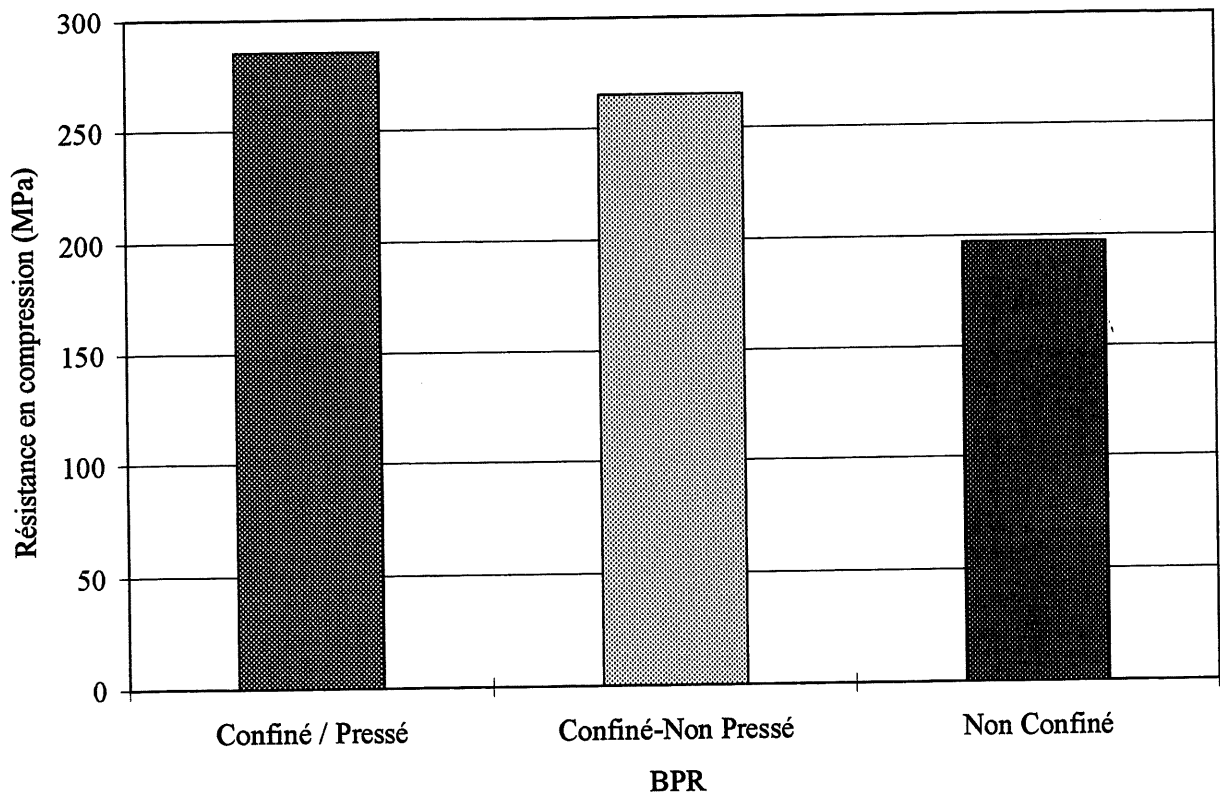


Figure 6.6 BPR 3 confiné - Résistance en compression en fonction du pressage

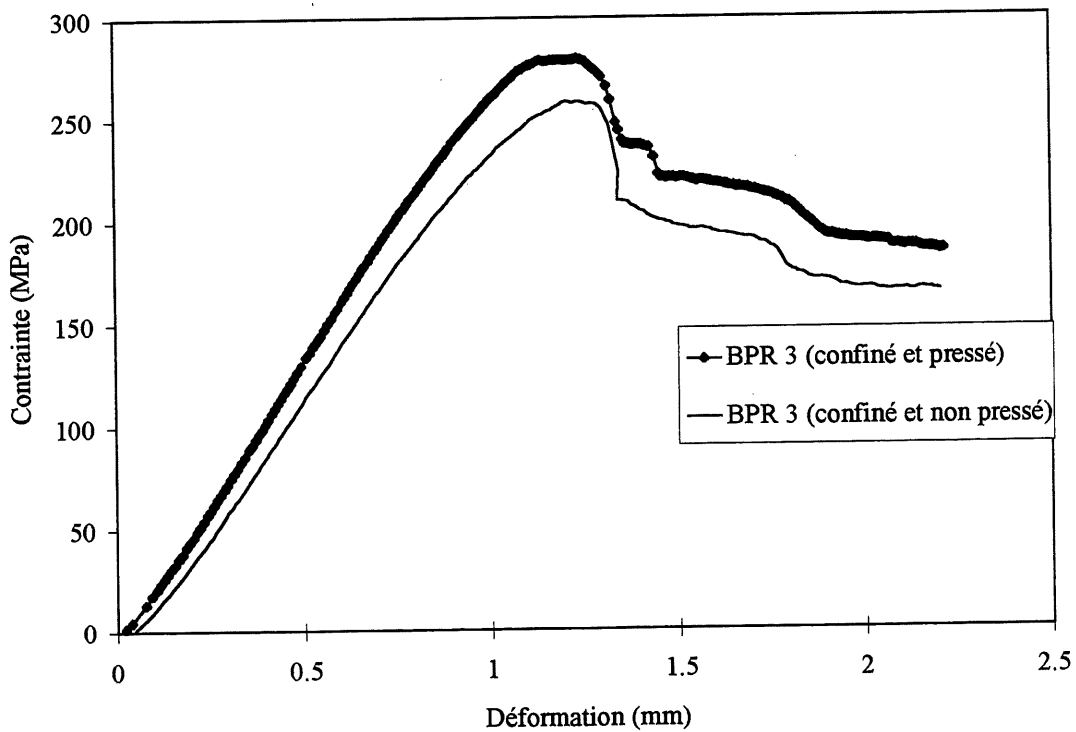


Figure 6.7 Courbes contrainte-déformation BPR 3 : confiné, pressé et non pressé

6. 2. 2 BPR confiné au laboratoire

Les essais ont été effectués en conformité avec la norme ASTM C 39 sur une presse MTS d'une capacité de 5000 kN qui est schématisée dans la figure 6.1(à la page 84). La charge en compression a été appliquée sur la surface de béton en enlevant un anneau de 1 mm de chaque extrémité du tube d'acier.

L'effort longitudinal a été mesuré en utilisant des transducteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer) placés autour des colonnes.

Des jauges extensométriques ont été collées sur la surface extérieure des tubes d'acier, pour mesurer les efforts latéraux et ajuster le niveau de pression.

Les caractéristiques du montage utilisé pour le BPR confiné au laboratoire sont présentées dans la figure 5.13. Le BPR a été confiné dans 6 tubes d'acier de 108 mm de diamètre, 500 mm de longueur, deux tubes d'une épaisseur des parois de 1,5 mm et/ou 4 autres tubes d'une épaisseur des parois de 3 mm, pour étudier l'influence de l'épaisseur des parois et du pressage. Le BPR a été mis en oeuvre en 5 couches de même épaisseur consolidées par 25 coups de pilons par couche.

Quatre tubes de BPR confiné ont été soumis à un effort de compression pendant 24 heures. Pendant ces 24 heures on a vu le piston du tube comprimé descendre de 7 à 8 % pour les deux tubes du BPR non fibré et de 6 à 7 % pour les deux tubes du BPR fibré et ce pour une hauteur de béton de 500 mm .

Pour les essais, nous avons coupé un échantillon de 220 mm de longueur à chaque extrémité du tube confiné, et ce pour tous les six tubes d'acier confiné .

Les résultats sont présentés dans les figures 6.8 et 6.9.

Les courbes typiques d'effort-déformation obtenues sur BPR renforcé de fibres et sur BPR non fibré pour plusieurs groupes d'échantillons sont présentés dans les figures 6.10 (a,b,c,d).

On remarque que la résistance augmente considérablement quand le béton est confiné, et quand il est de plus, pressé. La résistance à la compression augmente de près 100 MPa quand on applique une pression de serrage de 5 MPa et de plus que 150 MPa par rapport à un BPR non confiné.

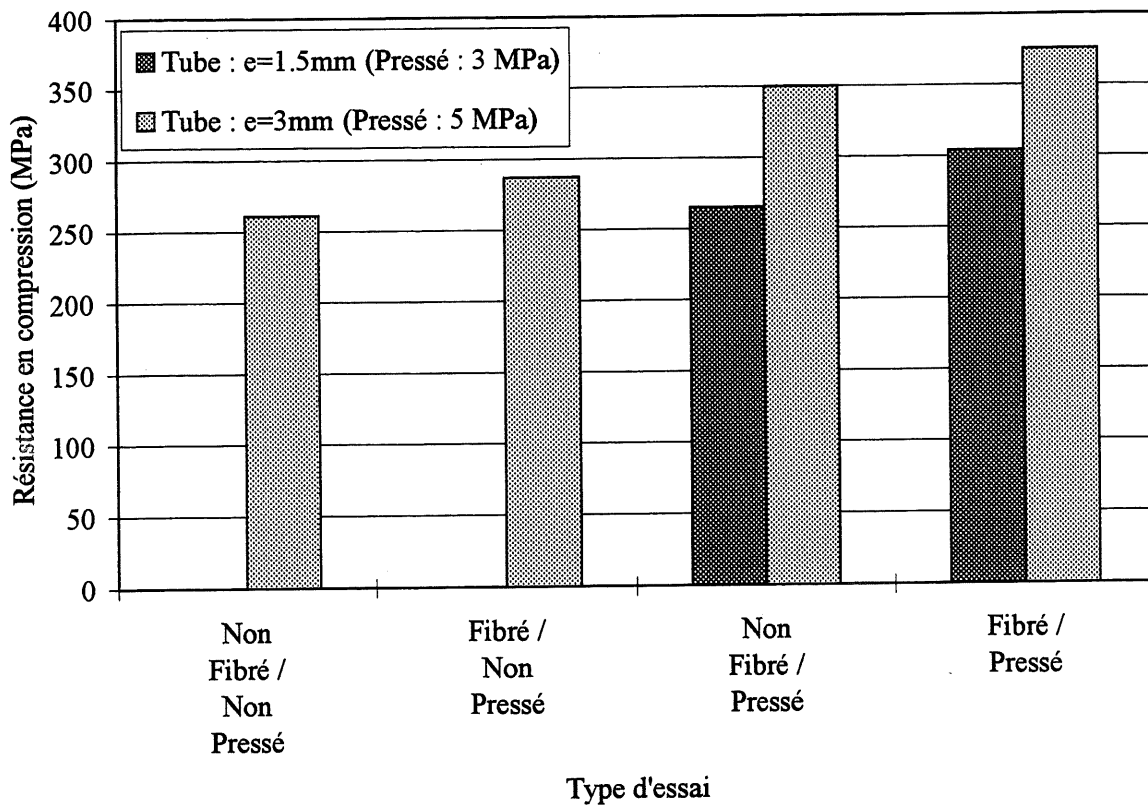


Figure 6.8 Résistance en compression du BPR confiné en fonction de la présence de fibres et du pressage

Il y a lieu de remarquer que l'influence des fibres sur la valeur de la résistance en compression est plus faible (augmentation approximative de 25 à 40 MPa) que celle du confinement (augmentation approximative de 80 MPa) et au pressage (augmentation approximativement de 100 MPa). Il est également intéressant de remarquer qu'en augmentant la pression de serrage de 3 à 5 MPa et de l'épaisseur de parois du tube de 1,5 à 3 mm, on augmente la résistance en compression de 90 MPa. On peut donc dire que la pression de serrage et le confinement d'un BPR sont des facteurs déterminants pour augmenter ses performances.

Notons toutefois que la présence des fibres dans un BPR non confiné est bénéfique, car les fibres contribuent à l'augmentation de sa résistance de 163 MPa à 217 MPa (tableau 6.2).

En conclusion, le confinement du BPR dans des tubes d'acier peut constituer une manière de réduire les coûts associés à l'utilisation des micro-fibres et des constructions auxiliaires qui accompagnent la mise en oeuvre d'un béton fibré.

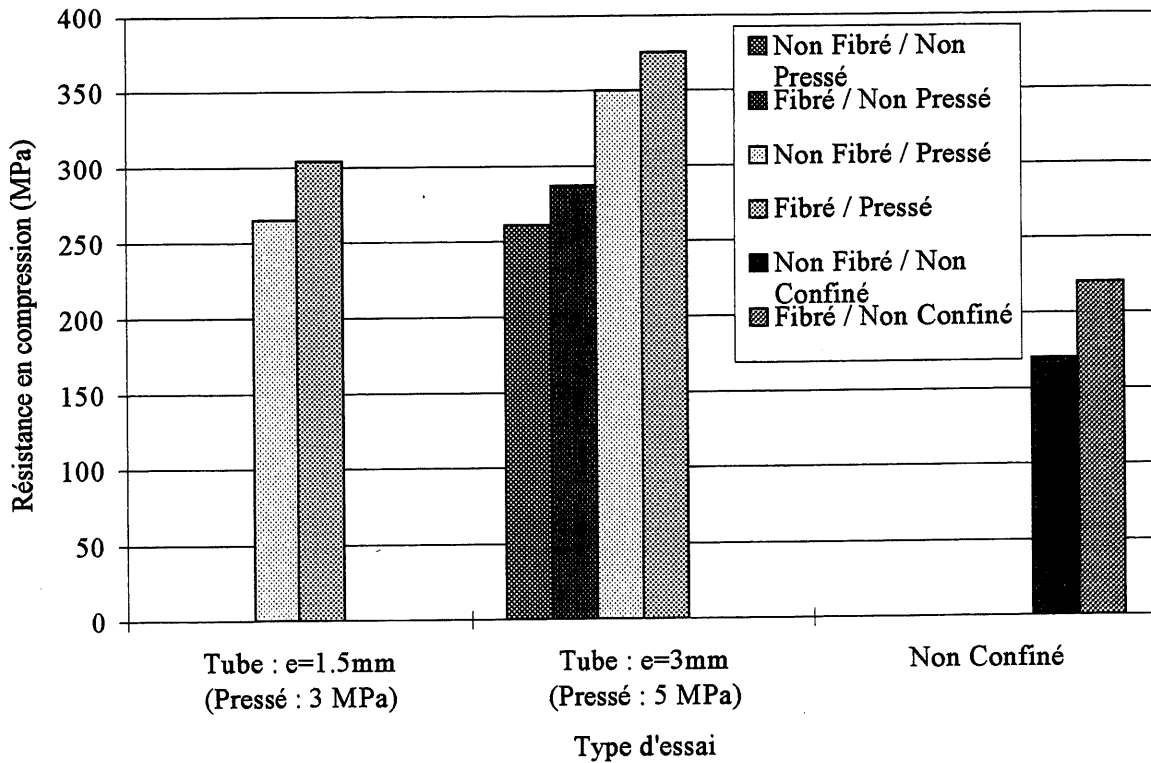


Figure 6.9 Résistance en compression en fonction du confinement et de la présence de fibres

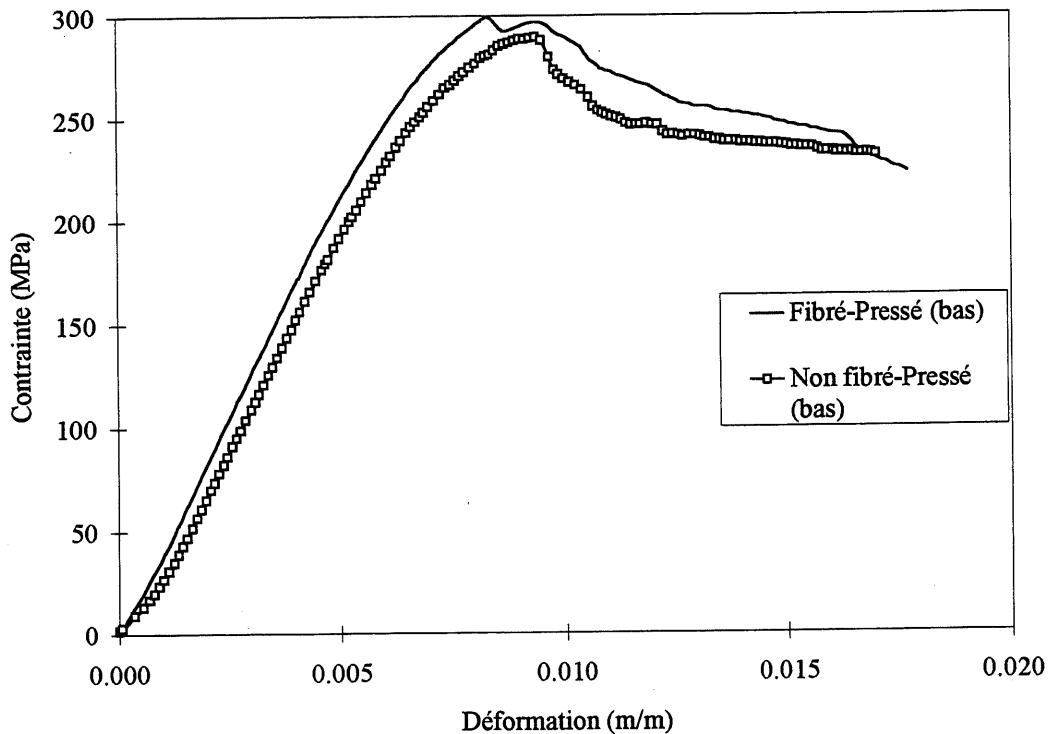


Figure 6.10(a) BPR confiné et pressé, fibré et non fibré (Tube e = 1,5 mm - bas)

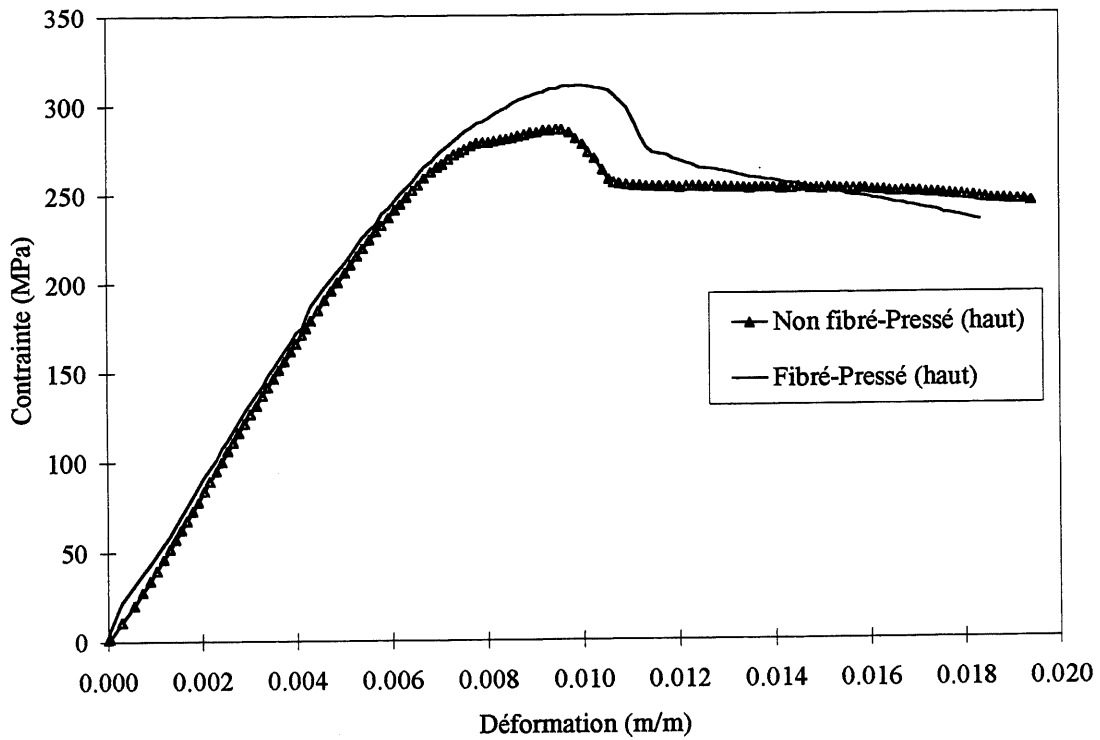


Figure 6.10 (b) BPR confiné et pressé, fibré et non fibré (Tube e = 1,5 mm - haut)

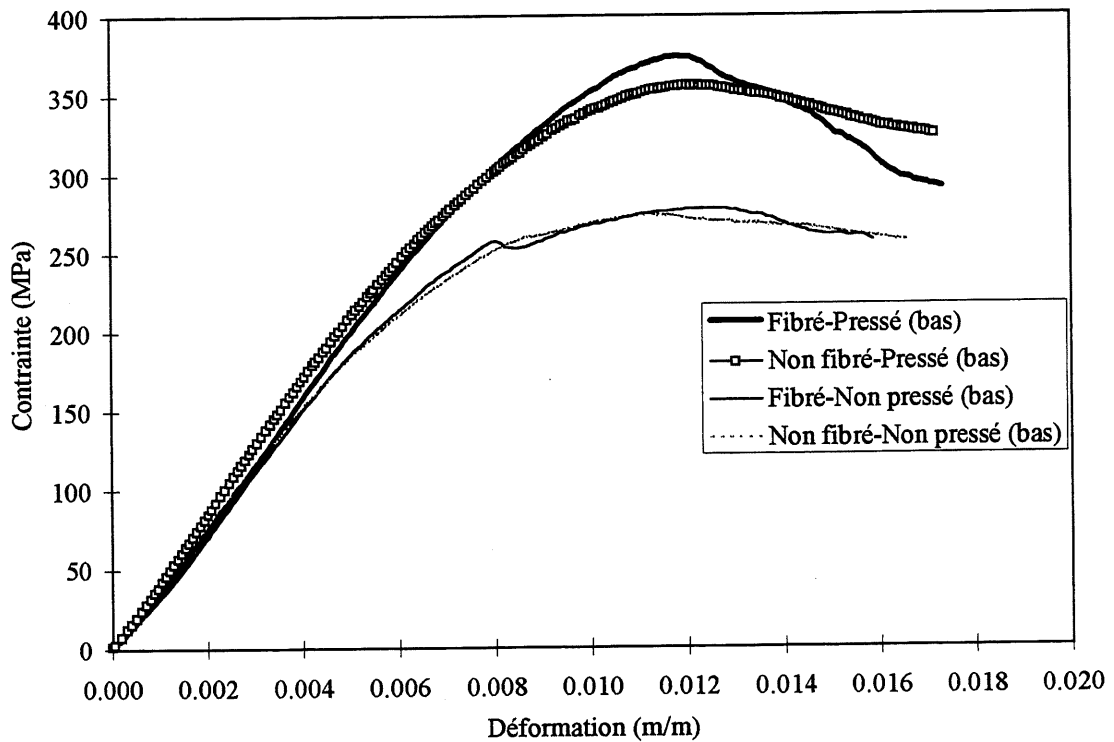


Figure 6.10 (c) BPR fibré et non fibré pressé et non pressé (Tube e = 3,0 mm - bas)

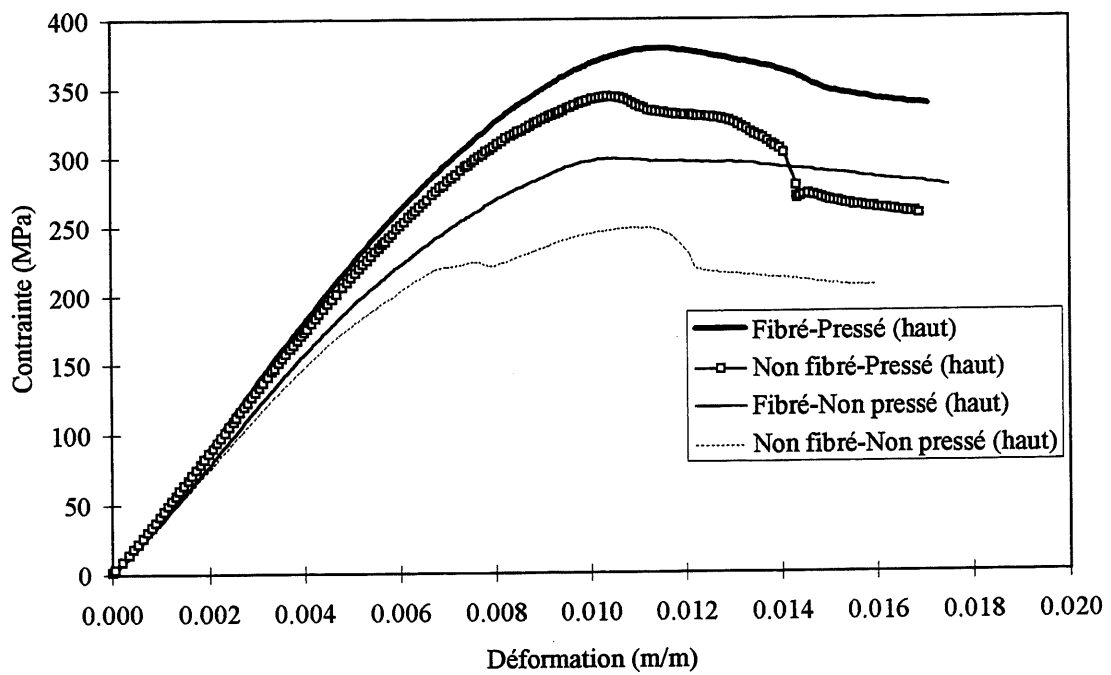


Figure 6.10 (d) BPR fibré et non fibré pressé et non pressé (Tube e = 3,0 mm - haut)

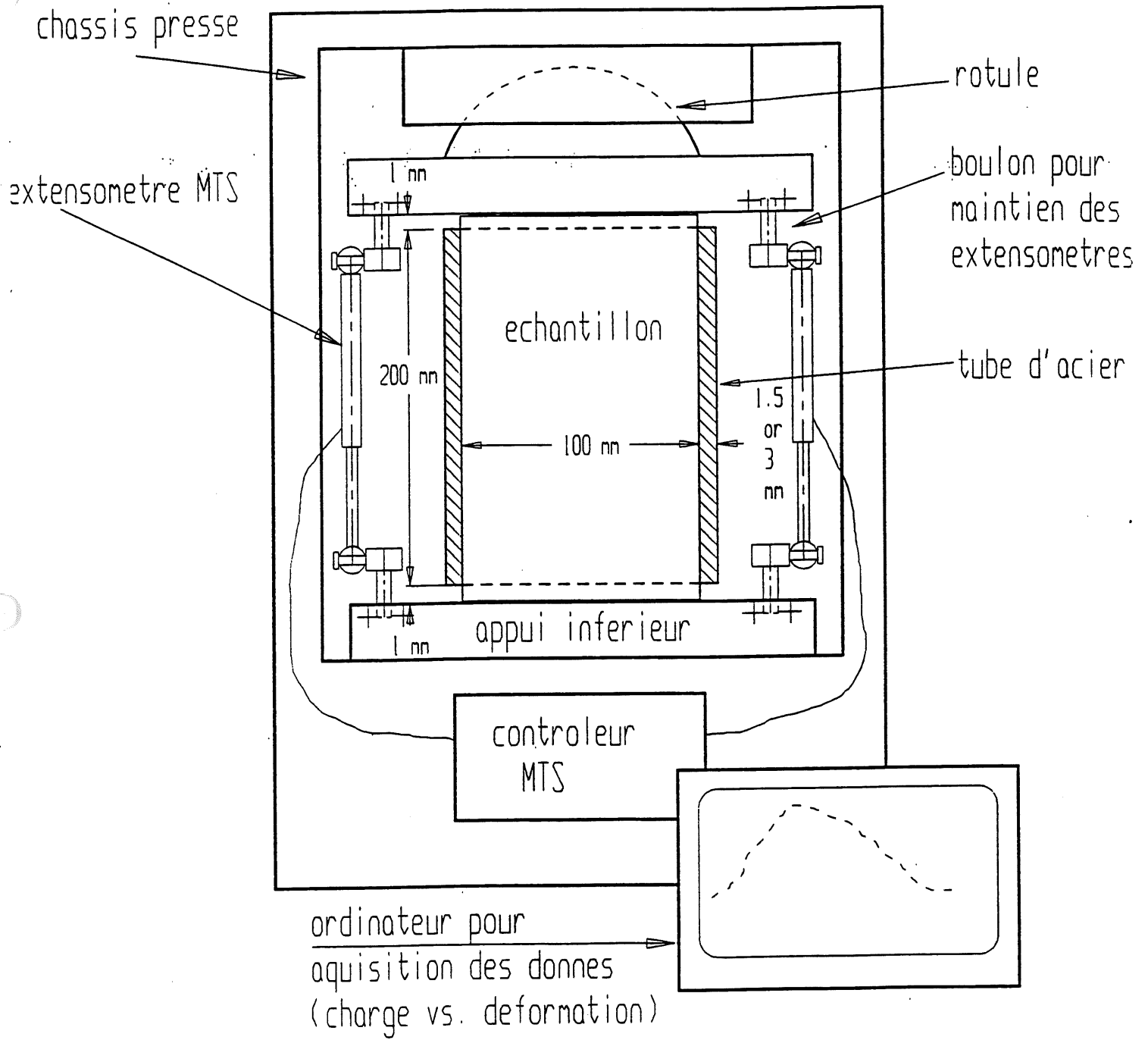


FIGURE 6.1 : PRESSE M.T.S. DE 5000 kN

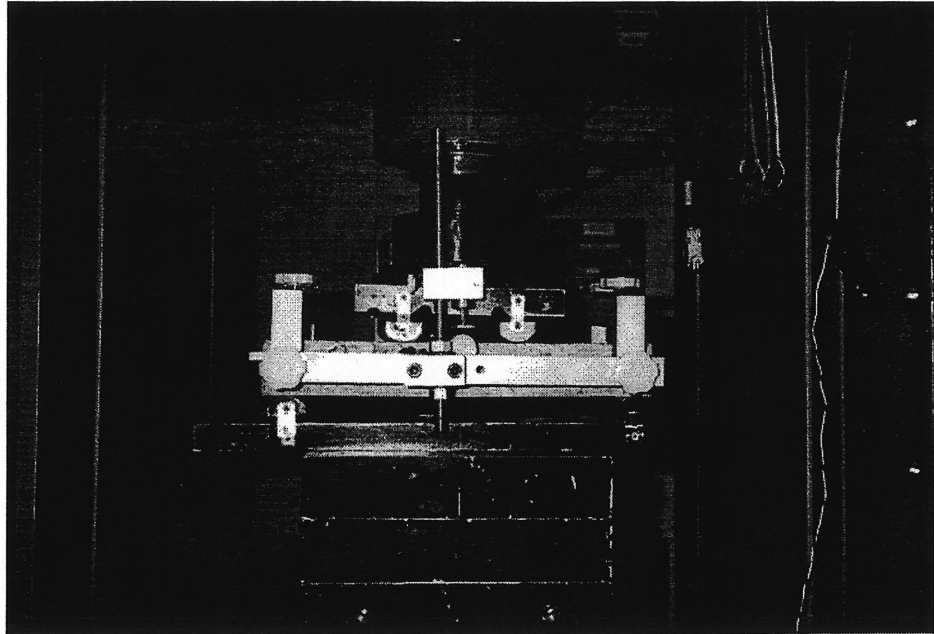


Figure 6.2 Montage utilisé lors des essais en flexion

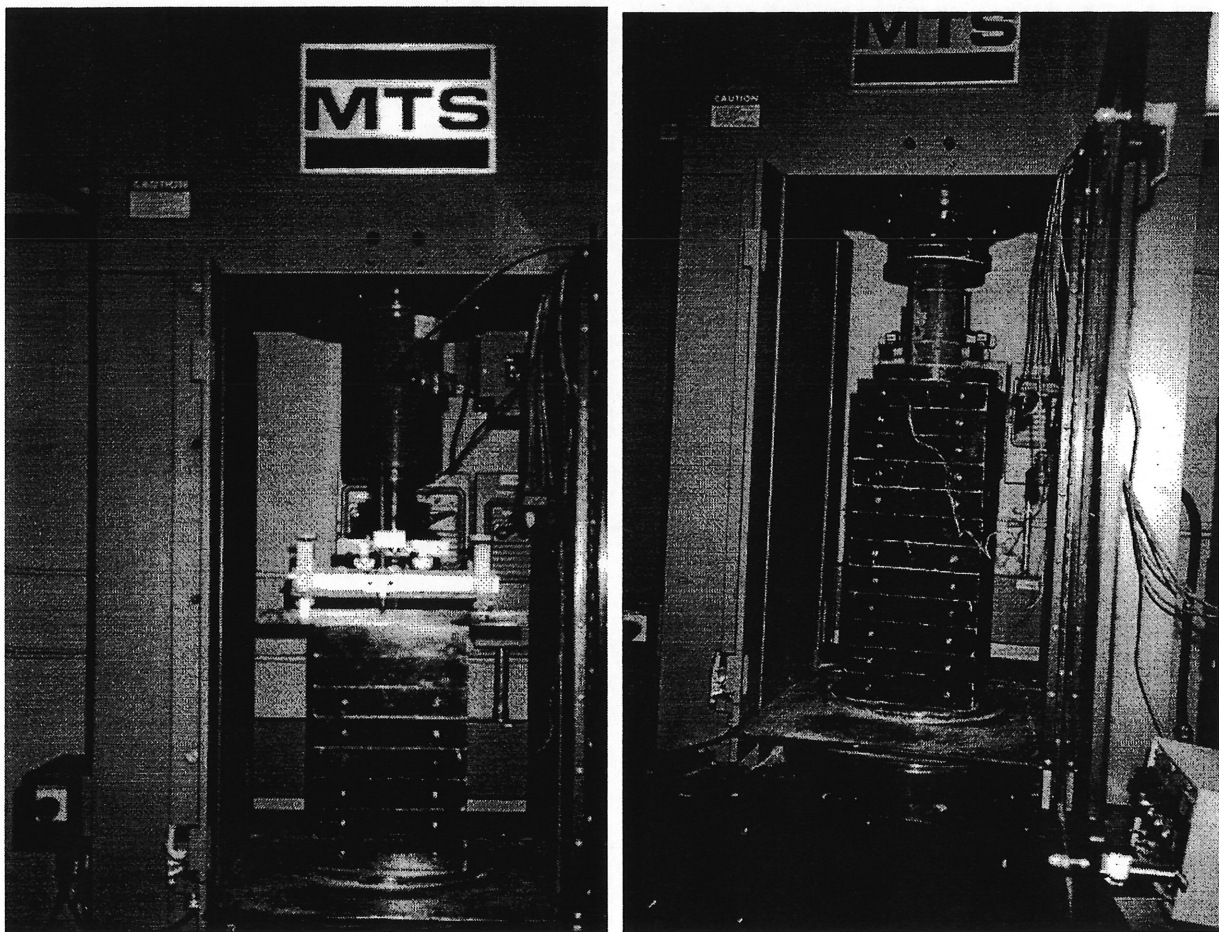


Figure 6.3 Montage utilisé lors des essais en compression (droite) et en flexion (gauche)

CHAPITRE 7

RÉSULTATS ET ANALYSES DES ESSAIS DE DURABILITÉ

7.1 Perméabilité aux ions chlore

C'est devenu un lieu commun que d'affirmer que la durabilité du béton est étroitement liée à sa perméabilité. La perméabilité est la propriété d'un corps à se laisser traverser par un fluide. Pour une pâte de ciment hydraté, elle est liée à sa porosité. La perméabilité d'une pâte de béton croît avec l'augmentation du rapport E/C et décroît avec la durée du mûrissement [23]. On remarque que le coefficient de perméabilité d'un béton est toujours largement supérieur à celui d'une pâte de ciment hydraté à cause de la suppression des gros granulats et de l'optimisation de la composition granulaire. De plus, la fumée de silice a un effet réducteur très marqué sur la perméabilité aux ions de chlore du béton [26].

L'essai de perméabilité aux ions chlore a été réalisé selon les spécifications de la norme ASTM C 1202 91. Il consiste à déterminer la quantité de courant électrique qui traverse une carotte de béton de 95 mm de diamètre et de 51 mm d'épaisseur, dont une face est immergée dans une solution de chlorure de sodium et l'autre dans une solution de soude. Une différence de potentiel de 60 V est maintenue durant 6 heures entre les deux extrémités de la carotte. La charge totale écoulée, exprimée en Coulombs donne un indice de la perméabilité aux ions de chlore et de la résistivité électrique du béton. L'essai de perméabilité aux ions de chlore se mesure sur deux échantillons d'un même béton; le résultat final étant obtenu à partir de la moyenne des résultats obtenus sur les deux échantillons.

Nous avons effectué l'essai de perméabilité aux ions chlore sur deux échantillons de BPR fabriqués dans le camion-malaxeur. L'un des échantillons de BPR renfermait des fibres métalliques. Comme les métaux sont conducteurs d'électricité, par conséquent on pourrait craindre que la mesure effectuée sur cet échantillon n'est pas tout à fait correcte.

Les résultats des essais effectués sont présentés dans le tableau 7.1.

TABLEAU 7.1 : ESSAIS DE PERMÉABILITÉ AUX IONS DE CHLORE

	Charge totale (Coulombs)	Courant (mA)
BPR non fibré	6	0
	7	0
BPR fibré	6	1
	9	1

Les résultats obtenus montrent la très grande imperméabilité des BPR. La présence de fibres n'a pas affecté les résultats de l'essai si bien qu'on peut affirmer que les fibres ne sont pas jointives. Le coefficient de perméabilité aux ions de chlore est négligeable d'après l'échelle de perméabilité proposée par Whiting, telle que présentée dans le tableau 7.2 :

TABLEAU 7.2 ÉCHELLE DE PERMÉABILITÉ PROPOSÉE PAR WHITING

Charge totale après 6 heures	Niveau de perméabilité
Supérieure à 4000	Forte
Entre 2000 et 4000	Moyenne
Entre 1000 et 2000	Faible
Entre 100 et 1000	Très faible
Inférieure à 100	Négligeable

7.2 Résistance à l'abrasion mécanique

Le but de cet essai est de déterminer la résistance à l'abrasion mécanique du BPR par comparaison de deux mélanges différents de BHP. L'abrasion a été mesurée conformément à la procédure "C" de la norme ASTM C779 (Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces).

La durée de l'essai prescrite par la norme est de 20 minutes, avec une mesure de la profondeur d'abrasion toutes les 50 secondes. Nous avons décidé de porter la durée des

essais de 20 à 40 minutes, tout en maintenant la période de mesure de 50 secondes, sachant à priori que les bétons que l'on devait tester étaient très résistants à l'abrasion. La limite de l'appareil correspond à 3 mm de profondeur d'abrasion.

Les surfaces testées ont été maintenues mouillées lors de cet essai du fait que l'on a utilisé un jet d'eau pour laver les particules qui se détachent de la surface.

Le tableau 7.3 montre les matériaux testés ainsi que le nombre d'échantillons pour chaque béton, de même que l'âge des échantillons lors des essais.

TABLEAU 7.3 : MATÉRIAUX TESTÉS ET MODALITÉS DES ESSAIS

Matériel	Nom de référence	Échantillons testés (nombre)	Age lors de l'essai
BPR	BPR	3	3 jours (*)
BHP avec granulats "trap rock"	BHP	3	12 jours
BHP avec granulats "trap rock" et fibres d'acier	BHP fibré	3	12 jours

(*) : 3 jours dans l'eau à 90 °C

Ces essais ont été réalisés pour le BPR sur la base de la formulation des BPR fabriqués dans le camion-malaxeur présentée dans le tableau 4.1 (Chapitre 4) et désigné par BPR 2. Tandis que pour les deux BHP, la formulation est présentée dans le tableau 7.4.

TABLEAU 7.4 FORMULATION DES BHP EN % MASSIQUES AVEC ET SANS FIBRES D'ACIER

	BHP sans fibres	BHP avec fibres
Ciment avec fumée de silice	1	1
Sable	1,27	1,27
Pierre	2,12	2,12
Retardateur	0,86	0,86
Superplastifiant	0,018	0,018
Eau	0,28	0,28
Fibres d'acier	-	0,05

Les résultats des essais d'abrasion sont représentés par les courbes de la figure 7.1. Ces courbes représentent la profondeur d'abrasion mesurée en fonction du temps. Les données qui ont servi à tracer les courbes représentent la moyenne des résultats des essais effectués sur chaque béton.

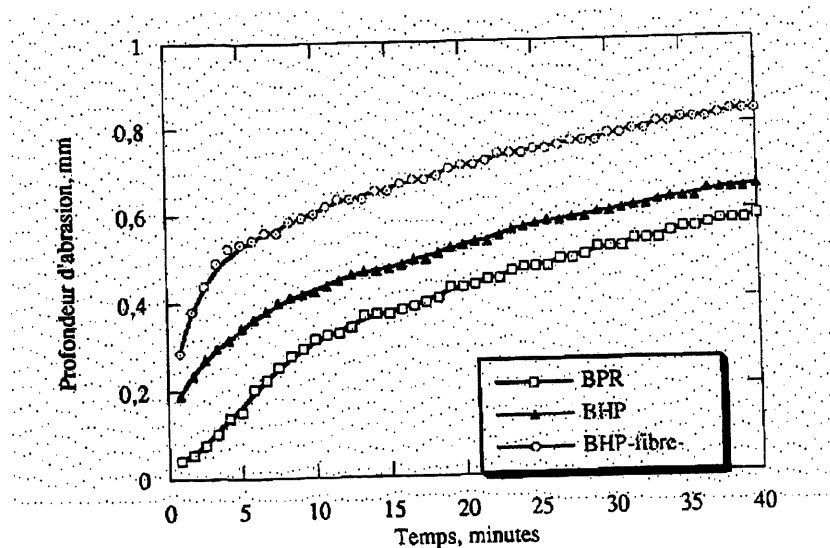


Figure 7.1 : Profondeur d'abrasion en fonction du temps

Les bétons de poudres réactives et les bétons à haute performance avec et sans fibres d'acier ont des comportements semblables. Après 40 minutes, la profondeur d'abrasion moyenne mesurée sur les BHP ne contenant pas de fibres et le BHP fibré est de l'ordre de 0,66 à 0,84 mm tandis que pour le BPR fibré elle est de 0,58 mm comme le montre la figure 7.1.

Le taux d'abrasion élevé des premières minutes s'explique par la plus grande fragilité de la couche de surface des bétons, phénomène qui est surtout associé aux opérations de finition. Une fois que la couche de surface est usée le matériau devient beaucoup plus résistant à l'abrasion.

7.3. Résistance aux cycles de gel et dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel est déterminée conformément à la norme ASTM C666 procédure A sur des éprouvettes de béton de dimensions 75x75x350 mm. Pour une gâchée, on utilise deux échantillons pour mesurer l'évolution de l'allongement

relatif, la perte de masse et la vitesse de propagation sonore en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. La durée d'un cycle de gel-dégel est d'environ 4 heures.

Le programme de mûrissement pour les essais de résistance aux cycles de gel-dégel est présenté dans le tableau 5.4. Le facteur de durabilité relative a été calculé après 300 cycles de gel et dégel, de même que la perte de la masse et l'évolution de l'allongement relatif. Les résultats montrent que les différents BPR n'ont subi aucune endommagement.

Les résultats concernant le facteur de durabilité relative des différents BPR sont présentés dans le tableau 7.5 suivant.

TABLEAU 7.5 FACTEUR DE DURABILITÉ DES BPR

	BPR 2A		BPR 2		BPR 3	
No. de spécimen	1	2	1	2	1	2
Facteur de durabilité (%)	100	100	102	101	101	101

Si on se réfère au tableau 7.6 établi par Neville, on peut affirmer que les différents BPR, après 300 cycles de gel-dégel, n'ont subi aucun endommagement et que leur résistance aux cycles de gel-dégel est même très satisfaisante.

TABLEAU 7.6 RÉSISTANCE AU CYCLE DE GEL ET DÉGEL EN FONCTION DU FACTEUR DE DURABILITÉ RELATIVE APRÈS 300 CYCLES (NEVILLE)

FD après 300 cycles de gel-dégel	Résistance du béton au cycles de gel-dégel
> 60 %	Satisfaisant
40 à 60 %	Douteuse
< 40 %	Insatisfaisant

7.4 Résistance à l'écaillage

L'essai de résistance à l'écaillage a été réalisé conformément à la norme ASTM C 672 sur deux échantillons prismatiques pour chaque formulation de béton. Les échantillons ont eu un mûrissement humide de 14 jours et un mûrissement à l'air sec de même durée. À

la fin du mûrissement, les surfaces supérieures sont recouvertes d'une solution de chlorure de calcium concentrée à 4 %.

Nos essais de résistance à l'écaillage ont été réalisés conformément à la norme ASTM C 672 avec toutefois une exposition des échantillons à 150 cycles de gel-dégel au lieu de 50 cycles. Les résultats de la résistance à l'écaillage sont présentés dans le tableau 7.7 suivant :

TABLEAU 7.7 RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE DU BPR

No. de spécimen	BPR 2 A		BPR 2		BPR 3	
	1	2	1	2	1	2
Masse de résidus (g/m ²)	8	8	5	8	28 ^(*)	8
Masse moyenne (g/m ²)	8		7		18	

(*) La mise en place du BPR 3 a été faite une heure après la fin du malaxage .

Les résultats montrent que la masse de résidus arraché aux trois BPR est extrêmement faible (moins de 0,03 Kg/m²). L'attaque des sels de déverglaçage est très superficielle. Les BPR sont par conséquent très résistants à l'écaillage .

En conclusion on peut dire que les BPR ont une microstructure très dense qui leur confère de bonnes propriétés d'étanchéité et de durabilité, ce qui rend leur utilisation intéressante dans le stockage de déchets industriels et radioactifs, et autres applications.

CHAPITRE 8

LA MICROSTRUCTURE DU BPR EXAMINÉE AU MEB

8.1 Microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage utilise les informations provenant des électrons secondaires rétrodiffusés. Il comprend quatre parties essentielles à savoir :

- Une colonne ayant un canon à électron, un système de condenseur (deux lentilles en général) qui donne une image très réduite du “cross-over”. Cette image est projetée sur l’objet par une autre lentille électromagnétique appelée lentille objectif. Généralement, la taille de la sonde à la surface de l’échantillon peut être inférieure à 2 nanomètres.
- Une chambre de l’échantillon qui comprend la platine goniométrique permettant le déplacement de l’échantillon suivant divers mouvements de translation et de rotation, le système d’introduction de l’échantillon et les différents détecteurs.
- Un système de pompage qui permet d’éviter la dispersion et l’absorption des électrons. La colonne ainsi que la chambre de l’échantillon sont sous un vide secondaire (10^{-5} à 10^{-6} torr). En général, on utilise des pompes à diffusion de vapeur d’huile, mais pour des problèmes de contamination par la vapeur d’huile, on utilise parfois des pompes turbomoléculaires ou des pompes de diffusion avec trappe d’azote liquide.
- Une électronique de contrôle dont le système de balayage permet de déplacer la sonde, le nombre de lignes pouvant varier de 50 à 160, et la durée de balayage de 10^{-3} secondes à 5 secondes. L’appareil comporte deux oscilloscopes dont le balayage est synchronisé avec celui de la photographie, on utilisera un écran à faible rémanence.

La figure 8.1 illustre la schéma de principe du microscope électronique à balayage. La caractéristique principale d’un appareil muni d’une sonde électronique est qu’il y a seulement une “correspondance point par point” entre un objet et son image à une période précise. Dans ce sens, l’objet et son image sont divisés en plusieurs images élémentaires. Cette

correspondance point par point couvrira l'objet et son image en plusieurs séries de temps signifiant ainsi un balayage de l'échantillon par la sonde électronique et un balayage simultané du faisceau électronique sur la surface du tube de rayon cathodique [28].

Les informations quantiques produites par les interactions entre les électrons incidents et l'échantillon sont des ondes électromagnétiques telles que les Rayons-x et la cathodoluminescence. Ces informations incluent les électrons rétrodiffusés, les électrons transmis, les électrons secondaires, les électrons absorbés, les électrons Auger est autres. Les informations que l'on peut obtenir en irradiant un échantillon par un faisceau d'électrons sont présentées à la figure 8.2.

Enfin, pour être observable au MEB, l'échantillon doit être conducteur d'électricité. Donc, on doit préalablement métalliser la pâte hydratée pour l'analyser.

Cette méthode permet d'analyser une échantillon sous un grossissement pouvant aller jusqu'à 300 000 X. Ainsi c'est un bon moyen pour faire une analyse de la texture et de la morphologie d'une pâte de liant hydratée.

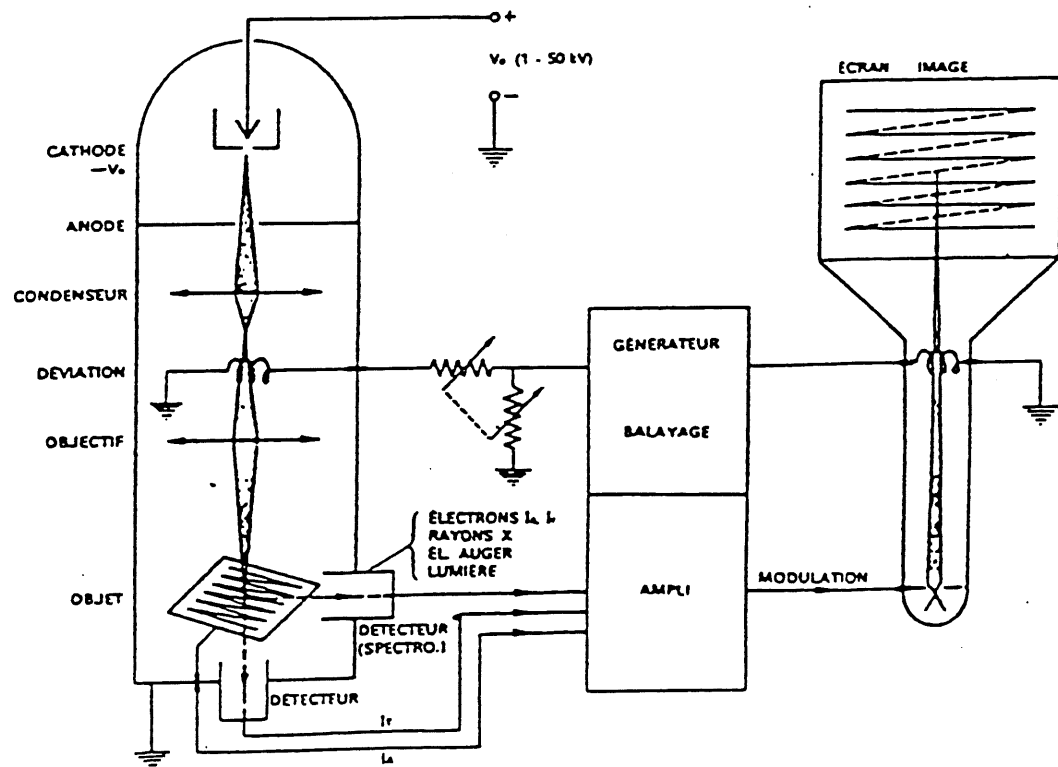


Figure 8.1 Représentation schématique du MEB

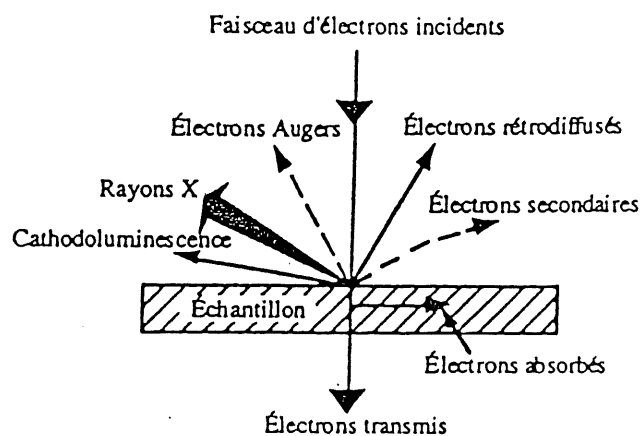


Figure 8.2 Représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface (l'irradiation) d'un échantillon.

8.2 Analyse au MEB de la pâte durcie du BPR

Le programme d'analyse au MEB s'est limité à évaluer la texture et la morphologie d'une pâte de BPR, à l'âge d'environ 28 jours.

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la pâte de liant durci correspondant au mélange du BPR 2 (camion-malaxeur) dans les quatre hypothèses, suivantes :

- ◊ le BPR non pressé
- ◊ le BPR confiné-pressé ;
- ◊ le BPR non pressé-fibré.
- ◊ le BPR confiné-pressé-fibré;

Un échantillon de chacun des BPR fut examiné au MEB à différents grossissements et des photos furent prises.

La texture et la morphologie d'un BPR confiné-pressé ont été évaluées en même temps que celles d'une pâte de BPR non pressé, une deuxième comparaison a été faite entre un BPR

confiné-pressé-fibré et un BPR non pressé-fibré. Les micrographies les plus représentatives sont présentées dans les figures 8.3(a,b) à 8.11(a,b).

Les textures pour les 4 types de pâte de BPR hydratée sont sensiblement voisines. Le gel de C-S-H est très dense et l'interface pâte granulat (sable siliceux) est très compact (grâce à la fumée de silice [4]).

Les figures 8.3(a,b), 8.4(a,b) et 8.5(a,b) présentent la pâte et l'interface pâte granulat d'un BPR confiné-pressé en parallèle avec la pâte d'un BPR non pressé. La différence notable entre les deux BPR est la présence des bulles d'air d'environ 0,8 mm (de maximum) dans l'échantillon de BPR non pressé (figure 8.6b) et concernant la densité du gel de C-S-H, il paraît plus dense pour la pâte d'un BPR confiné-pressé (figure 8.6a).

Le BPR confiné-pressé et le BPR confiné-pressé-fibré présentent une pâte hydratée d'une densité exceptionnelle (figures 8.3a. et 8.6a.)

Pour le BPR confiné-pressé et le BPR confiné-pressé-fibré, l'ensemble des effets produits par le pressage et le traitement thermique est un moyen d'améliorer leurs performances, et permettre d'atteindre des densités relatives très élevées (0,90), par pressage et/ou de modifier la structure cristalline par la forte réaction pouzzolanique de la fumée de silice à une température comprise entre 65°C et 90°C, lors du traitement thermique [4].

Les figures 8.7(a,b) et 8.10(a,b) présentent la pâte et l'interface pâte-fibre d'acier d'un BPR confiné-pressé-fibré en parallèle avec la pâte d'un BPR non pressé-fibré. La différence entre les deux BPR (BPR confiné-pressé et BPR non pressé) se voit au niveau de la présence des bulles d'air d'environ 0,67 mm dans l'échantillon de BPR non pressé (figure 8.7b) et le gel de C-S-H, qui paraît plus dense dans le cas de la pâte d'un BPR confiné-pressé-fibré (figures 8.7a. à 8.11a.).

Il faut noter que les fibres d'acier sont très bien ancrées dans la matrice (pâte de liant) du BPR et que la cohésion entre la pâte et les fibres est très bonne. Il n'y a pas de décohésion ou de microfissuration dans la pâte de liant, ni de dépôt des cristaux au fond des traces laissées par la fibre d'acier (pour les deux types de BPR pressé et non pressé) (figure 8.7a., b. à 8.9).

Enfin, la qualité d'une pâte de BPR confiné-pressé vue au microscope électronique à balayage présente certains avantages.

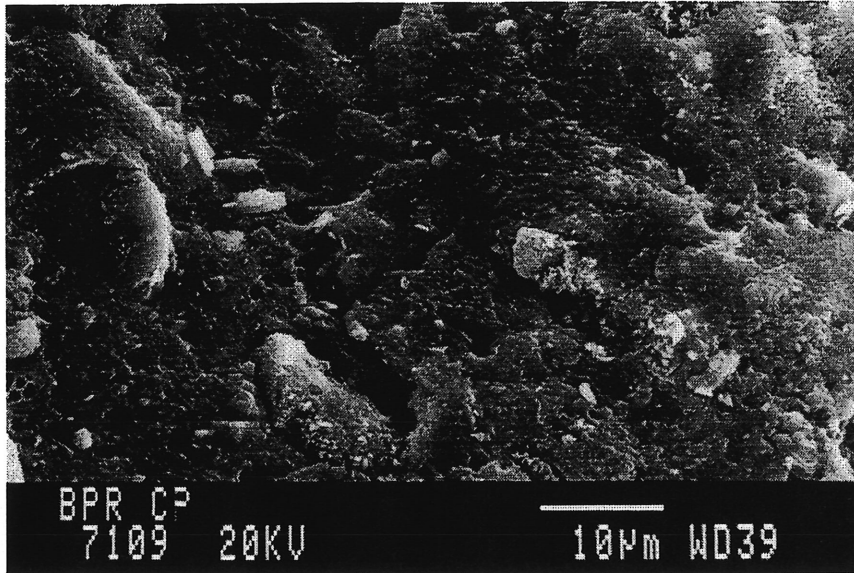


Figure 8.3a (1700X) BPR confiné-pressé : vue de la pâte (gel de C-S-H très dense)

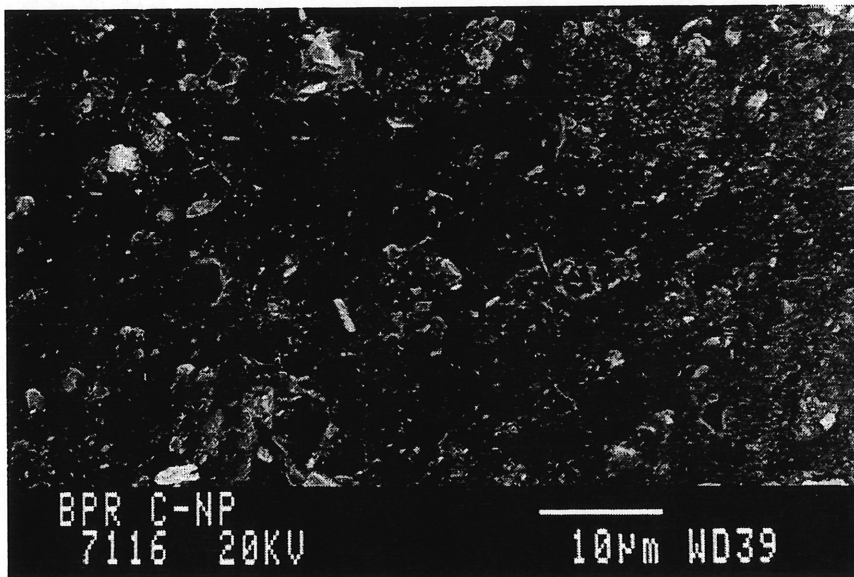


Figure 8.3b (1700X) BPR fibré-non pressé : vue de la pâte

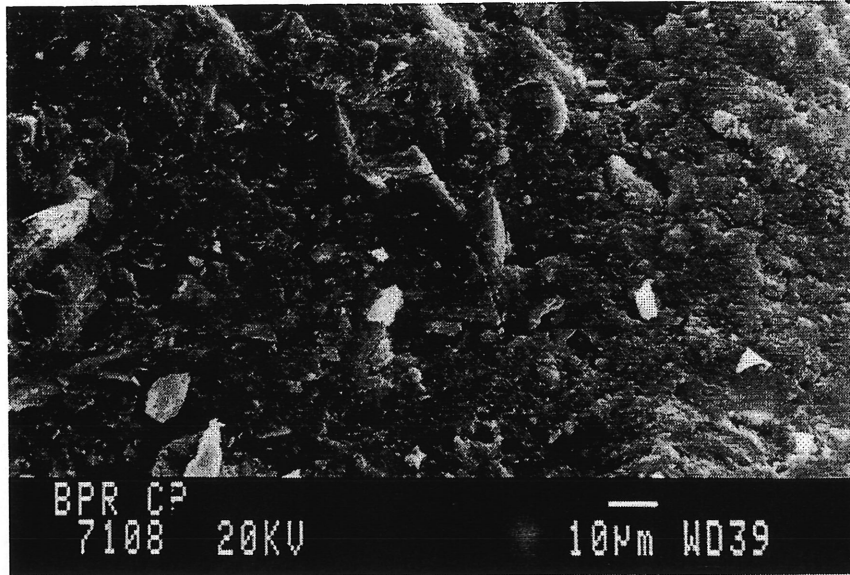


Figure 8.4a (700X) BPR confiné-pressé: vue de la pâte (gel très dense de C-S-H)

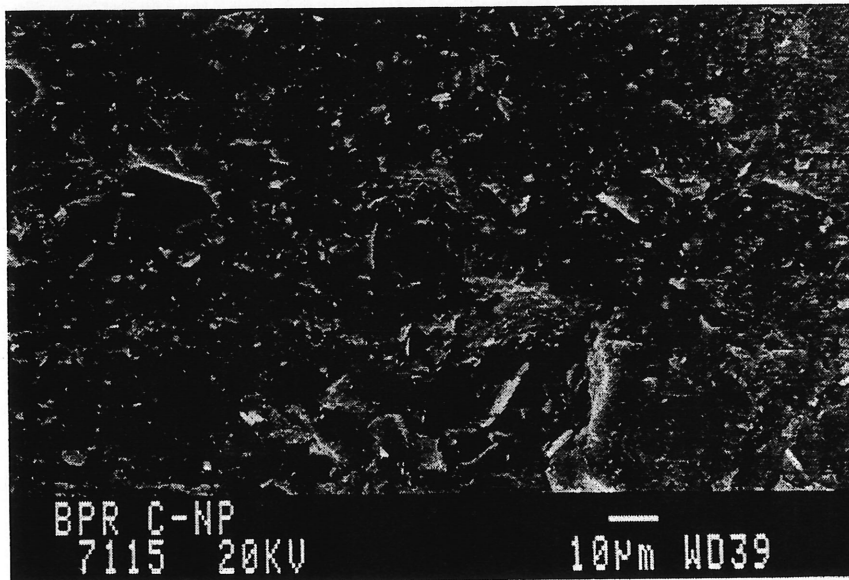


Figure 8.4b (700X) BPR non pressé: vue de la pâte

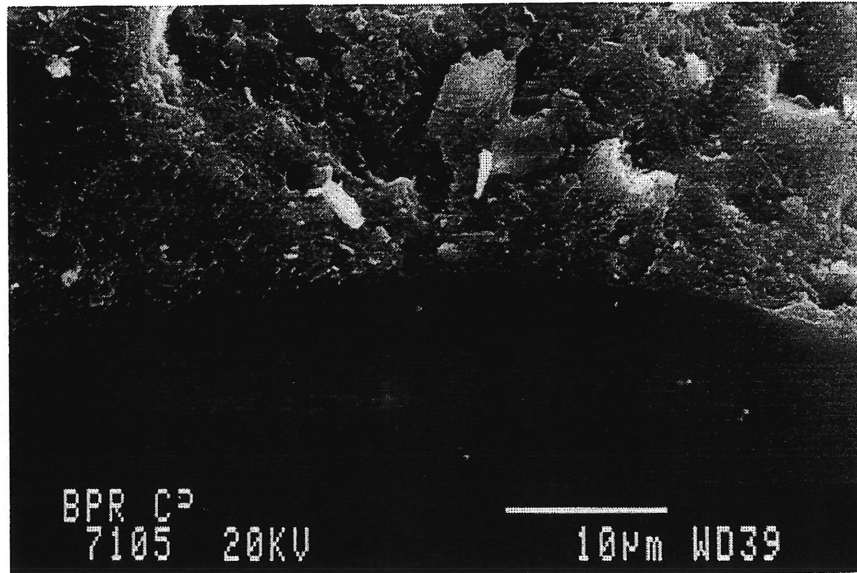


Figure 8.5a (2200X) BPR confiné-pressé : l'interface  te (haut) et grain de sable (bas)

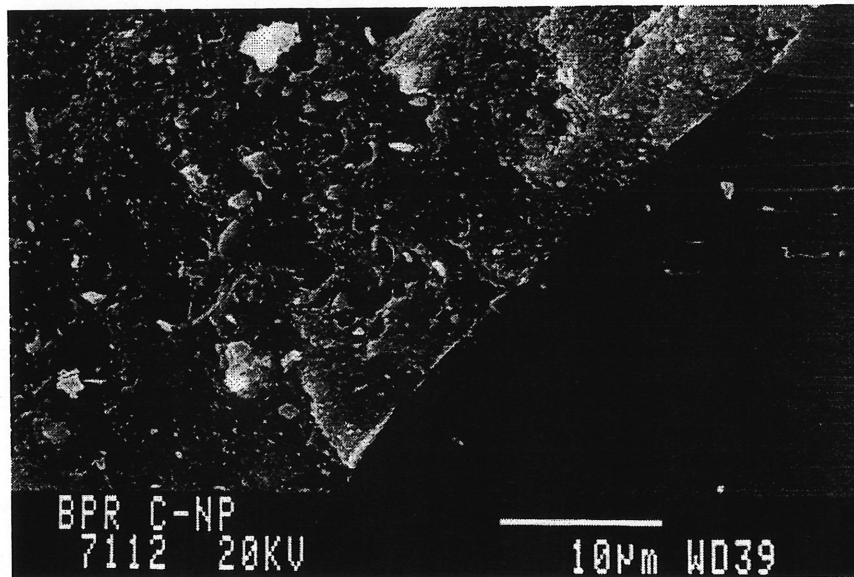


Figure 8.5b (2200X) BPR non pressé : l'interface  te-grain de sable (granulat en bas   droite et gel C-S-H dense en haut   gauche)

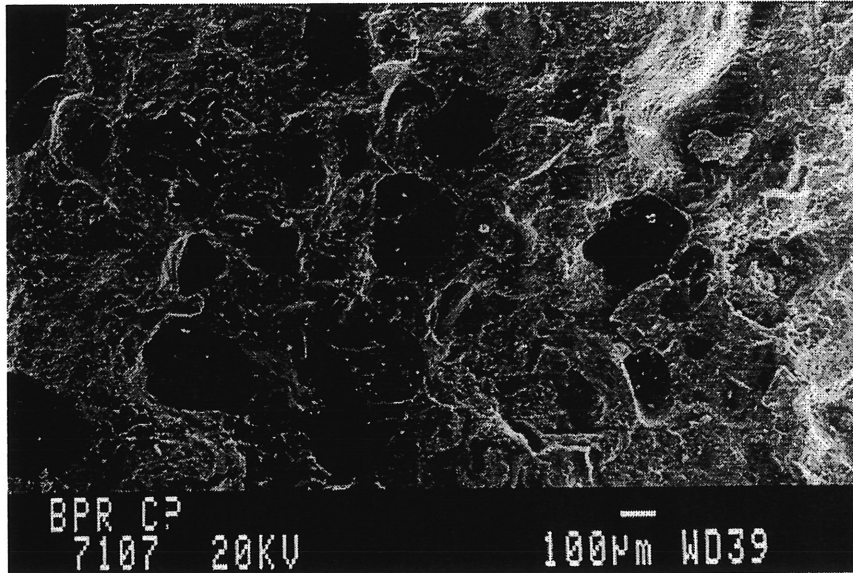


Figure 8.6a (50X) BPR confiné-pressé: vue générale

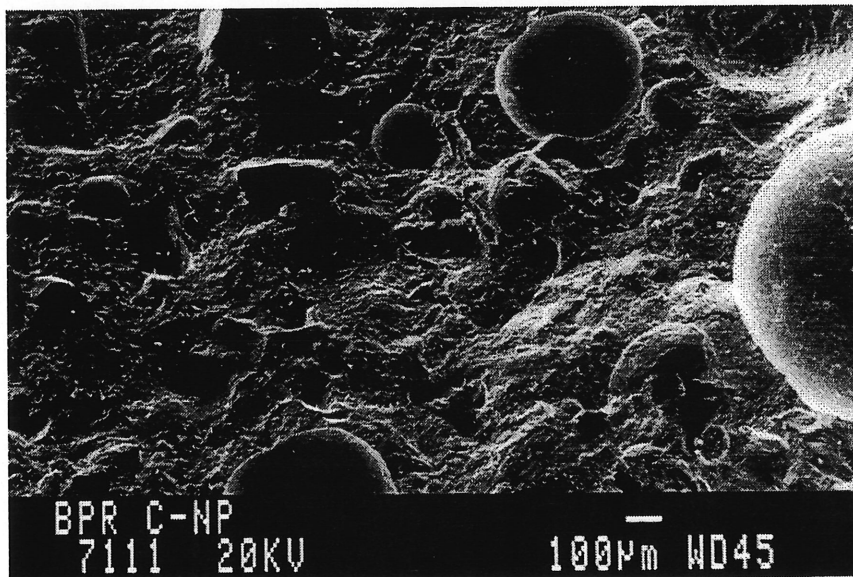


Figure 8.6b (50X) BPR non pressé: vue de la pâte (bulles d'air de 0,8 mm maximum)

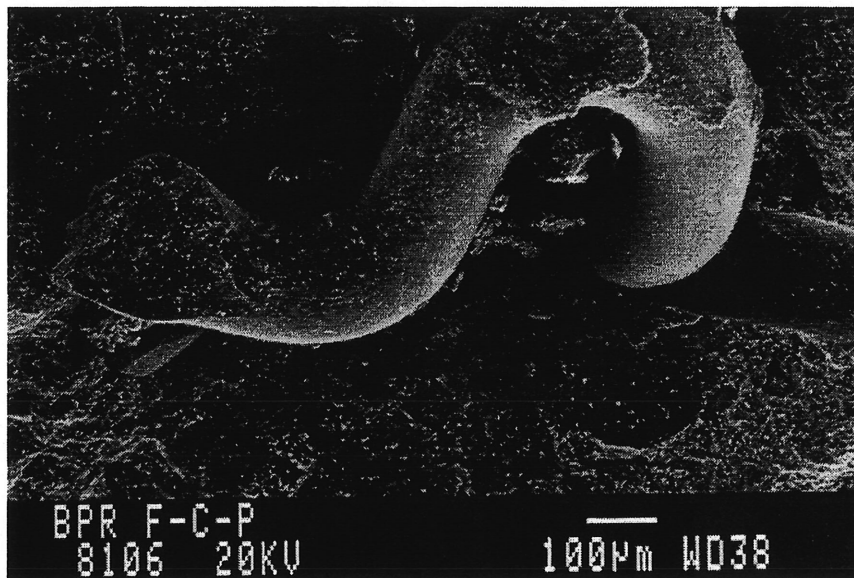


Figure 8.7a (95X) BPR confiné-pressé : l'interface pâte-fibre

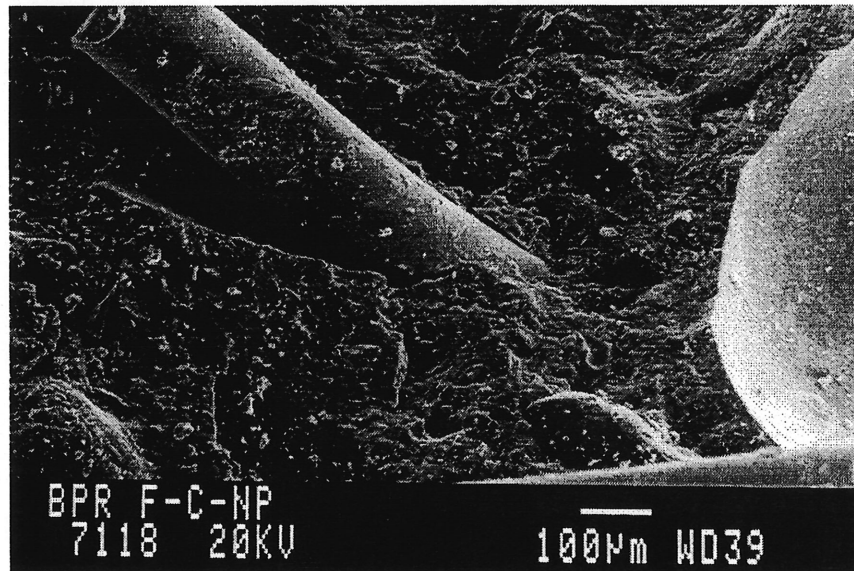


Figure 8.7b (95X) BPR fibré non pressé : vue de l'interface pâte-fibre et bulle d'air de 0,67 mm à droite

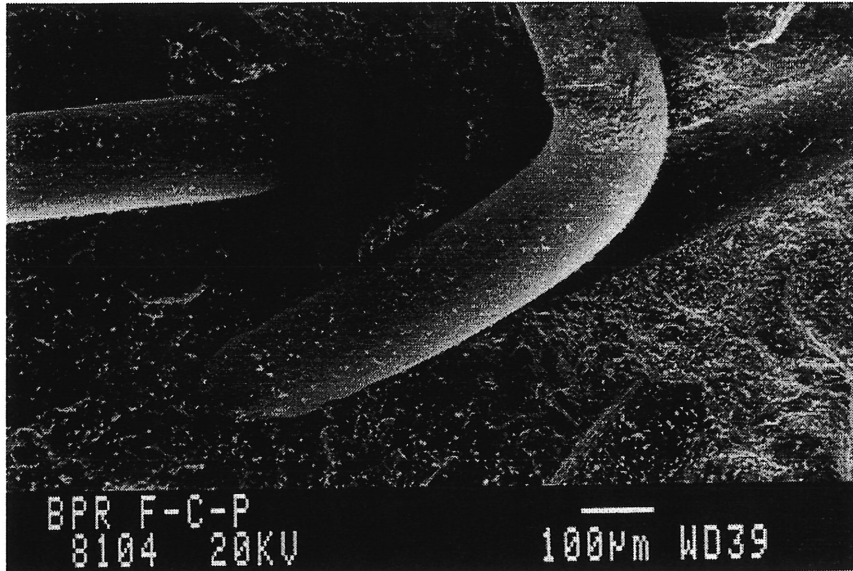


Figure 8.8a (100X) BPR confiné-pressé-fibré : l'interface fibre-pâte (très bonne adhérence entre la fibre et la pâte de BPR)

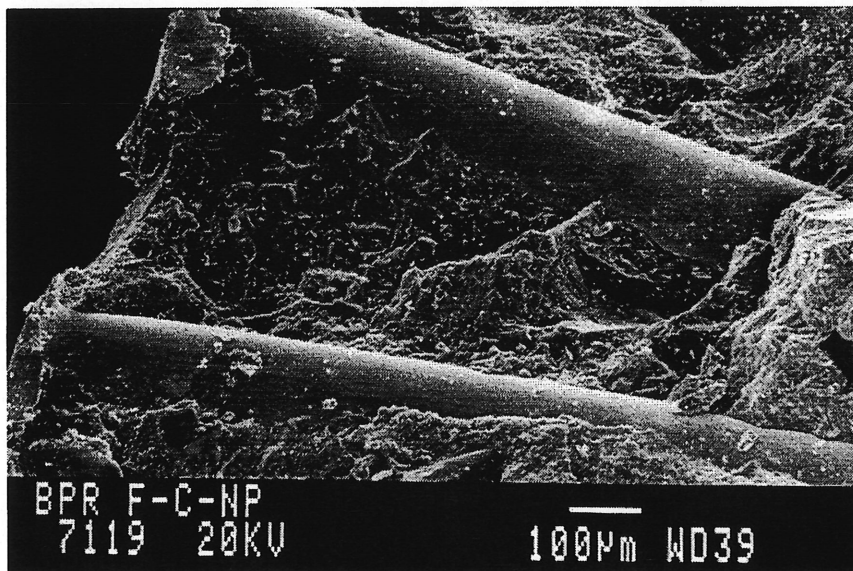


Figure 8.8b (100X) BPR fibré non pressé: l'adhérence fibres-pâte

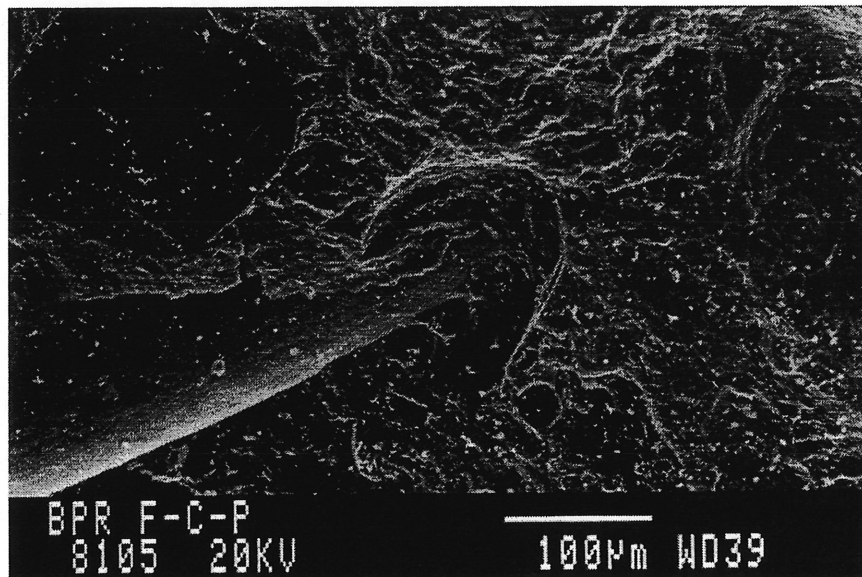


Figure 8.9 (200X) BPR confiné-pressé-fibré : l'interface fibre-pâte

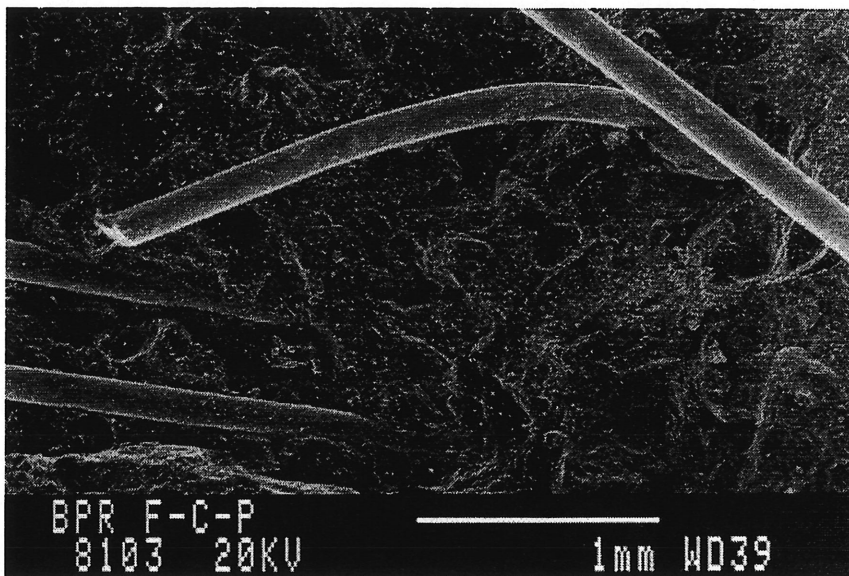


Figure 8.10a (33X) BPR confiné-pressé- fibré : vue d'ensemble

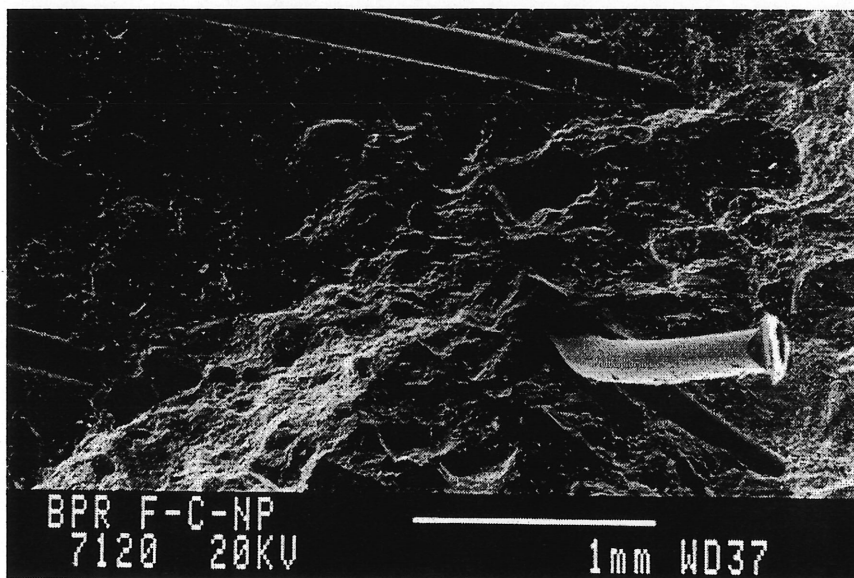


Figure 8.10b (33X) BPR fibré non pressé : vue générale (traces de fibres)

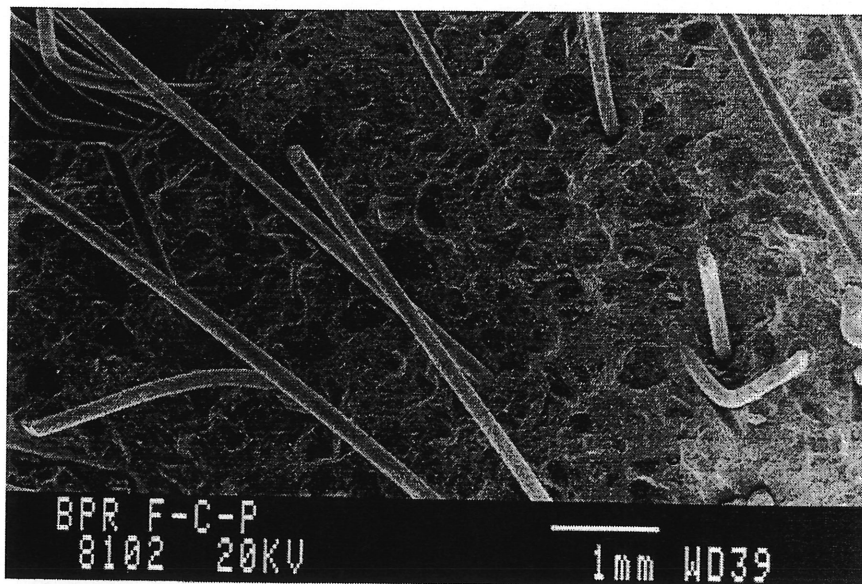


Figure 8.11a BPR confiné-pressé et fibré : vue générale
(grande densité et bonne orientation de fibres dans la matrice de BPR)

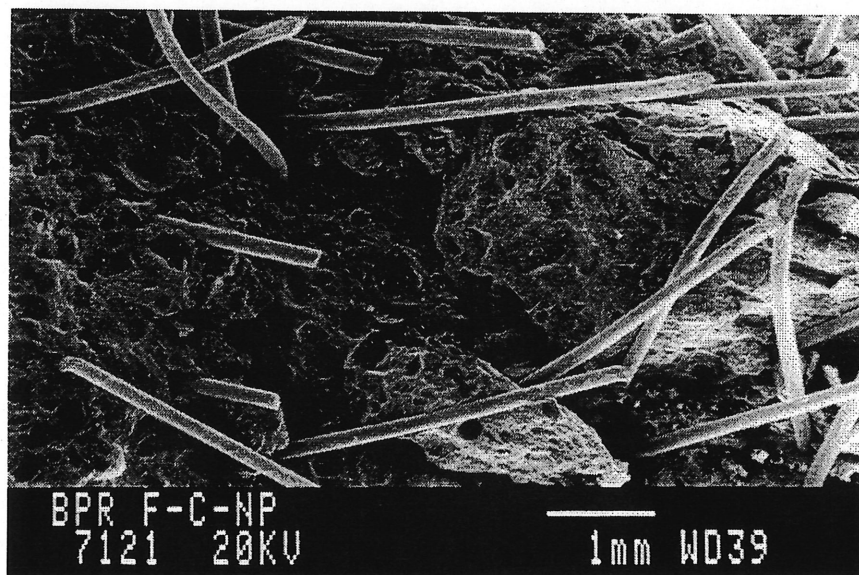


Figure 8.11b (15X) BPR fibré-non pressé: vue générale
(grande densité et bonne orientation de fibres dans la matrice de BPR)

CONCLUSION

Cette étude montre que l'on peut désormais dire que le BPR a passé le stade du laboratoire et qu'il est devenu un produit qui peut être mis en oeuvre industriellement avec des matériaux disponibles commercialement en utilisant un malaxeur efficace pour diminuer le temps de malaxage qui reste toutefois supérieur à celui d'un béton ordinaire.

Les matériaux qui ont été utilisés pour fabriquer les BPR tant au laboratoire qu'en usine sont tous des matériaux qui n'ont rien d'exceptionnel puisqu'ils sont déjà disponibles commercialement. Ce sont surtout leurs caractéristiques granulaires très précises et les proportions dans lesquelles on les mélange pour obtenir une matrice très compacte qui confèrent aux BPR leur propriétés.

La microstructure des BPR est le facteur qui influence surtout les performances mécaniques en compression et en flexion. Pour améliorer ces performances, il suffit d'ajouter au BPR des fibres métalliques, appliquer une pression de serrage avant et pendant la prise et soumettre le BPR à un traitement thermique.

On remarque que la résistance augmente considérablement quand le béton est confiné, et quand il est de plus, pressé. La résistance à la compression augmente de près 100 MPa quand on applique une pression de serrage de 5 MPa et de plus que 150 MPa par rapport à un BPR non confiné. Il y a lieu de remarquer qu'alors l'influence des fibres est négligeable (augmentation approximative de 25 à 40 MPa) par rapport au confinement (approximativement de 80 MPa) et au pressage (approximativement de 100 MPa). Il est également intéressant de remarquer qu'en augmentant la pression de serrage de 3 à 5 MPa, on augmente la résistance en compression de 90 MPa et donc, la pression de serrage et le confinement d'un BPR sont les facteurs déterminants pour augmenter ses performances.

Notons toutefois que la présence des fibres dans un BPR non confiné est bénéfique, car elles contribuent à l'augmentation de sa résistance de 163 MPa à 217 MPa.

En conclusion, le confinement du BPR dans des tubes d'acier peut constituer une manière de réduire les coûts associés aux micro-fibres et constructions auxiliaires qui accompagnent la mise en oeuvre d'un béton fibré.

Les BPR ont une microstructure très dense qui leur confère de bonnes propriétés d'étanchéité, de durabilité et de résistance à l'abrasion, ce qui rend leur utilisation intéressante dans le stockage de déchets industriels et radioactifs, dans la constructions de structures militaires, de fondations de machines et d'équipements lourds, et autres applications.

Pour des applications moins conventionnelles, on peut utiliser le BPR qui contient des fibres, qui est confiné, qui est pressé et qui est soumis à un traitement thermique. On peut alors fabriquer des pièces préfabriquées qui peuvent dans certaines applications remplacer les pièces métalliques.

Enfin, on peut dire que les bétons de poudres réactives constituent une nouvelle famille de matériaux de construction [6] dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires. Les poudres qui composent le BPR ont des diamètres inférieurs à 600 μm et peuvent être mélangées à l'aide des malaxeurs traditionnels sans faire des grandes modifications aux installations de production de béton actuelles. L'absence de ségrégation, la bonne ouvrabilité et l'absence d'armatures passives dans les structures facilitent sa mise en oeuvre et permettent de fabriquer des éléments minces et de géométrie complexe.

Les BPR sont caractérisés par une très grande résistance en compression et une bonne ductilité ce qui en fait un matériau de choix pour la constructions de structures ne comportant pas d'armatures passives. On obtient en même temps une structure trois fois plus légère [22] que celle construite en béton traditionnel. Dans le cas de pièces fléchies ou tendues, on peut compenser la dissymétrie des résistances en traction et compression en utilisant la précontrainte. Les quantités plus réduites de matériaux minéraux et la suppression des armatures constituent des avantages économiques et écologiques.

Bibliographie

- [1] Richard,P., Cheyrezy,M., [1994], "*Les Bétons de Poudre Réactives*", Étude de la Direction Scientifique de Bouygues (accepté pour publication).
- [2] Richard, P., Cheyrezy, M., [1994], "*Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200÷800 MPa Compressive Strength*", A.C.I. Spring Convention , Mars, 14 p.
- [3] Richard, P., [1994], "*De la Poudre dans le Béton*", Interview: MINORANGE, Avril , No. 46.
- [4] Cheyrezy, M. ,Maret, V. , Frouin, L. ,[1994], "*Microstructural Analysis of RPC*", Cement and Concrete Research, Rhône-Poulenc-Recherche, (accepté pour publication).
- [5] Goto, S., Roy ,D., M., [1981] , "*The Effect of W/C Ratio and Curing Temperature on the Permeability of Hardened Cement Past*", Cement and Concrete Research, Vol.11, p.575-580.
- [6] Richard,P.,Cheyrezy,M.,[1995], "*Les Bétons de Poudres Réactives*", Annales ITBTP, No. 532, p.85.
- [7] Dugat , J. , Roux , N. , Bernier ,G. , [1995], "*Etude Experimentale de la Dèformation sous Contrainte et du Comportement à la Rupture du BPR* ", Annales ITBTP, No.532, p.112.
- [8] Detwiler,R.J., Mehta, P.K., [1989], "*Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete* ".
- [9] Khayat, K.H., Aïtcin, P.C., [1992], "*Silica Fume in Concrete : an Overview*" ,Proceedings of ACI 4th International Conference on Fly Ash , Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete ,ACI SP-132 , Vol. II, Istambul, Turkey, p.835-871.
- [10] Nehdi, M., [1995], "*The Microfiller Effect in High Performance Concret*", Department of Civil Engineering, University of British Columbia. (accepté pour publication).
- [11] Cheng-Yi,H.,Feldman, R.F. [1985], "*Hydration Reactions in Portland Cement Silica Fume Blends*", Cement and Concrete Research, Vol. 15,No.4, p.585-592.
- [12] Rossi,P., Belloc, Al.,[1995], "*Les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances*", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Annales ITBTP, No.196, (mars-avril), p.61.
- [13] Feldman, R. J., Beaudoin, J.J., [1976], Cement and Concrete Research, Vol. 6, No. 3, p. 389-400.

- [14] Tailor, H.F.W., [1977], *Discussion*, Cement and Concrete Research.vol.7,(4), p.465-468.
- [15] Lahlou, K., Aïtcin ,P.-C., Chaallal, O., [1992], "*Behavior of High Strength Concrete under Confined Stresses*", Cement and Concrete Composite, Vol. 14, No. 3, p. 185-194.
- [16] Beaulieu, J., [1995], Mémoire de maîtrise, "*Étude de Caractérisation de Bétons Constitués de Ciment Type 20M avec et sans Fumée de Silice*". Université de Sherbrooke.,
- [17] Bentur, A.,Goldman, A., [1989], Materials in Civil Engineerins, ASCE, "*Curing Effects, Strength and Physical Properties of High Strenght Silica Concretes*", Vol.1, No.1, p. 46-48.
- [18] Basham,K.D. [1992], ACI seminar, "*Secrets of Concrete in Hot or Cold Weather*", Montreal, janvier, p 44.
- [19] Mamillan, M.,[1970], "*L'Accélération du Durcissement du Béton par la Chaleur, l'Influence des Conditions de Traitement de la Composition sur la Qualité du Béton*", Annales, ITBTP No.302, p.15-28.
- [20] Alexanderson, J.,[1972],"*Strenghtn losses in Heat Cured Concrete*". *Swedish Cement and Concrete Reserch Institute at the Royal Institute of Technology*, Stocholm, p.132-135.
- [21] Richard, P., Bonneau, O., Poulin, C., Dugat, J., Aïtcin, P-C., [1996], "*Reactive Powder Concretes : From Theory to Practice*", Concrete International, Vol.18, No. 4, p.47-49.
- [22] Mehta, P.K., Aïtcin, P.C., [1990], "*Microstructural Basis of Selection of Mix Proportions for High-Strenght Concrete*", ACI SP 121, p.265-266.
- [23] Perraton, D., Carles-Gibergues A., [1994], *Étude du Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Construction* , INSA-UPS.
- [24] Aïtcin, P.C., Baalbaki,M., [1994], "*Canadian Experience in Producing and Testing High Performance Concrete.*", International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand, ACI, nov.21-22, Editor : Paul Zia., p.295-308.
- [25] Dallaire, É., Bonneau, O., Lachemi, M., Aïtcin, P-C., [1996], "*Mechanicl Behavior of Confined Reactive Powder Concrete Columns*", American Society of Civil Engineers Material Conference, Washington D.C. 10-14 nov.
- [26] Gagné R., Pigeon, M., Aïtcin, P.,C.,[1991],"*Deicer Salt Scaling Resistance of High-Strenght Concretes made with different Cements*", Second International Conference on Durability of concrete , ACI SP-126, Montréal, Vol. 1,p. 185-199.

- [27] Golaparatnam, V.S., Shah, S.P., Batson, G.B., Criswell, M.E., [1991], "*Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete*", ACI Materials Journal, Vol .88, No.4, p.339-353.
- [28] Tamtsil, T., B., [1995], "*Étude de l'Utilisation dans le Béton des Cendres de Boues de la Station d'Épuration des eaux usées de la C.U. de Montréal*", Mémoire de Maîtrise es Sciences Appliquées, (Genie civil), Université de Sherbrooke.