

AVANT PROPOS

Le présent travail a été au sein de l'équipe de recherche « étude et recherche sur les matériaux » du laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions, du département de Génie Civil de Constantine, auquel j'exprime ma profonde gratitude de tous les membres de l'équipe dynamique et aimable.

Je tiens à exprimer ici tous mes remerciements à monsieur HOUARI HACENE Professeur, qui en tant que directeur de thèse, a permis l'aboutissement heureux en un temps record, pour sa supervision efficace et éclairée, et ses conseils précieux tout au long de ce travail. J'ai eu besoin, et il me l'a accordé, de sa confiance, de son soutien et de sa disponibilité tout au long des mois. Il a su me responsabiliser et me permettre de m'épanouir en travaillant avec lui. Merci spécial pour tous les soins prodigués.

Monsieur : N.CHIKH m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de jury.

Je remercie également Monsieur : BELACHIA .M Maître de conférences , Monsieur GUETTECHE.Med.N . Maître de conférences d'avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse et de participer au jury

j'exprime toute ma reconnaissance à ma mère et mon père, pour leurs soutiens, à mon mari M^r LAIB SAMIR pour son soutien et de sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de ce travail, à toute ma famille Chafi et Khellaf pour leurs aides, à M^{me} Z.Toumi, à M^{me} M.Bentalha, à M^r Kahia [Sétif] et M^{me} Bendris [Sétif] pour leurs contributions , à M^r K.Abdou , à M^{me} M.Chibane, aux étudiants de DEUA fin d'étude Khaldi .B et Ouafek .K , aux techniciens du LTPEst, , sans oublier mes collègues Chahinez , Najoua.....

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	V
Introduction générale.....	1
Chapitre :01 Le béton de fibres.....	6
1.1. Introduction.....	7
1.2. le béton de fibres.....	7
1.3. Natures des fibres.....	10
1.4. Formulation du béton de fibres.....	11
1.5. Mise en œuvre du béton de fibres.....	21
1.5.1. Composition du béton de fibres.....	21
1.5.2. Appareils recommandés pour l'étude de la mise en œuvre du béton de fibres.....	21
1.5.3. Fabrication du béton de fibres.....	22
1.5.4. Les facteurs influençant la mise en œuvre du béton et mortier de fibres.....	25
Chapitre :02 propriétés mécaniques et domaine d'utilisation.....	30
2.1. Introduction.....	31
2.1.1. compression.....	31
2.1.2. traction.....	32
2.1.3. flexion.....	34
2.1.4. courbes effort –déformation.....	41
2.1.5. résistance au choc.....	44
2.1.6. résistance à l'usure.....	45
2.1.7. agent extérieurs.....	45
2.1.8. retrait.....	45
2.1.9. fluage.....	47
2.1.10. résistance à la fatigue.....	48

2.1.11. conductivité électrique du béton de fibres d'acier.....	48
2.2.. applications de béton de fibres.....	50
2.2.1. introduction.....	50
2.2.2. diverses applications	50
2.2.2.1.exemples de réalisations en béton de fibres d'acier.....	52
2.2.2.2. fibres de polypropylène.....	66
2.2.2.3. fibres de verre.....	67
2.2.3. avantage du béton de fibres.....	71
2.3. conclusion.....	72
Chapitre :03 matériaux utilisés et méthodologie d'essais	74
3.1. Introduction	75
3.2. Programme expérimental.....	76
3.3. Types des éprouvettes utilisées.....	79
3.4. Matériaux utilisés.....	79
3.4.1. Les granulats.....	79
3.4.2. Le ciment.....	80
3.4.3. L'eau de gâchage.....	82
3.4.4. Les fibres.....	84
3.5. Confection du mortier.....	88
3.5.1. Malaxage.....	88
3.5.2. Analyse à l'état frais.....	88
3.5.2.1. mesure de l'affaissement.....	88
3.5.2.2. mesure du temps d'écoulement :Maniabilimètre.....	90
3.5.2.3. mesure de la densité réelle du mortier frais.....	91
3.5.3. Confection des éprouvettes.....	91
3.6. Essais mécaniques.....	92
3.7. mesure l'absorption capillaire et de perte en poids.....	94
3.7.1. mesure l'absorption capillaire	94
3.7.2. mesure de la perte en poids.....	94
3.8. conclusion.....	96

4.1. Introduction	98
4.2. Etude de l'influence de l'introduction des billes de polystyrène sur le comportement des mortiers	101
4.2.1. Introduction.....	101
4.2.2. L'ouvrabilité	102
4.2.3. La masse volumique apparente.....	104
4.2.4. Absorption capillaire.....	106
4.2.5. Perte en poids.....	108
4.2.6. performances mécaniques.....	110
4.2.6.1. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques.....	111
4.2.6.2. Résistance à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	115
4.2.7. Bilan	117
4.3. Etude de l'influence de l'introduction des billes de copeaux d'acier sur le comportement des mortiers	119
4.3.1. Introduction.....	119
4.3.2. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques.....	119
4.3.3. Résistance à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	122
4.3.4. Bilan	124
4.4. Etude de l'influence de l'introduction des billes de copeaux de bois sur le comportement des mortiers	126
4.4.1. Introduction.....	126
4.4.2. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques.....	126
4.4.3. Résistance à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	130
4.4.4. Bilan	132
4.5. Etude de l'influence de la nature de fibres sur les performances mécaniques de bois sur le comportement des mortiers	134
4.5.1. Dosage des fibres 1%.....	134
4.5.2. Dosage des fibres 2%.....	138
4.5.3. Bilan	142
4.6. conclusion.....	144

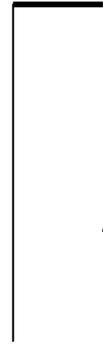
<i>Conclusion générale</i>	147
<i>Annexes</i>	152
<i>Bibliographie</i>	164

Liste des figures

Fig.1.1. Effet des fibres incorporé dans un béton sur son affaissement [27].....	13
Fig.1.2.Effet de la teneur en fibres d'acier et de leur élancement sur l'ouvrabilité Ve-Be (d'après J.E.Edgington et al.)[17].....	13
Fig.1.3. Encadrement d'un granulats [27].....	14
Fig.1.4.teneur maximale en fibres en fonction de la teneur en gros granulats[27].....	14
Fig.1.5. Affaissement au cône en fonction du module de finesse[41].....	15
Fig.1.6.abagues reliant la composition granulatoire optimale du béton au pourcentage en fibres[41].....	15
Fig.1.7- Abaque permettant d'établir une formulation de béton de fibres[41].....	16
Fig.1.8. Exemples de l'influence de la longueur des fibres et du pourcentage incorporé sur la quantité de pâte de ciment nécessaire au BFM (d'après Rossi, 1991) [35].....	17
Fig.1.9. Exemples de l'influence de la longueur des fibres et du pourcentage incorporé sur le rapport S/G du BFM (d'après Rossi, 1991) [35].....	17
Fig.1.10.Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM comparé à celui d'un béton non fibré [35].....	19
Fig.1.11. exemple de la compacité optimale d'un BFM obtenus par la méthode de Baron-Lesage [15].....	21
Fig.1.12. appareil VB[15].....	22
Fig.1.13. Maniabilimètre- Lesage[15].....	22
Fig.1.14. cône inversé[15]... ..	22
Fig.1.15.effet du rapport de l'aspect L/D sur l'ouvrabilité d'un mortier renforcé de fibres[17]	24
Fig.1.16.ouvrabilité Ve-Be en fonction de la teneur en fibres, pour différentes matrices. [17].....	24
Fig.2.1. Influence de la longueur et du pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé[10]	31
Fig.2.2.Courbes " contrainte-déformation" en compression [Houari] [26]	32
Fig. 2.3. Résistance à la traction du ciment armé de fibres de verre en fonction du pourcentage en volume de fibres Vf et pour différentes longueurs de fibres (d'après Majumdar) [27]	33
Fig.2.4.Courbes " contrainte-déformation" en traction [Houari] [26]	33
Fig. 2.5 .Equation (A) confrontée avec les résultats d'essais (d'après R.N.Swamy)[15]... ..	34
Fig.2.6. Augmentation de résistance en flexion en fonction de l'élancement [13].....	35
Fig. 2.7.Augmentation de la résistance en flexion pour des fibres d'acier à crochets, en fonction de l'élancement et du pourcentage de fibres[13].....	35
Fig.2.7.b- Résistance à la flexion du ciment armé de fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres. [27].....	36
Fig.2.8.- Influence de la longueur et du pourcentage de fibres sur la résistance à la traction flexion du béton renforcé. [10]	37
Fig.2.9.Evaluation de la flèche en fonction du temps Pour différents types de mortier sous un taux de chargement de 70% F _f [Houari.1993] [26]	38
Fig.2.10. Courbe effort- déformation en compression[41]	41
Fig.2.11.Courbes effort- déformation en traction[41].....	41

Fig.2.12.Courbe charge –flèche (flexion) [41]	42
Fig.2.13.Flèche en fonction de la charge pour les bétons armé de fibres d'acier de différentes compositions relevées sur éprouvettes 10cm x10cm x500cm chargées au tiers de la longueur ($V_f=0$ à 3%) (d'après R.N.Swamy) [27].....	42
Fig.2.14.Flèche en fonction de la contrainte de flexion pour un ciment armé de fibres de verre (d'après R.N.Swamy) [27].....	43
Fig.2.15.Courbes " charge-flèche " en flexion [Houari] [26]	43
Fig.2.16.Courbes contrainte-charge dynamique[Houari] [26]	44
Fig.2.17 Evaluation des contraintes retrait en fonction de l'âge du béton[15]	46
Fig.2.18.Retrait libre à partir de 24 heures sur différents mortiers [Houari] [26]	46
Fig.2.19.Fluage apparent en traction pour mortier renforcé de fibres sous une contrainte de 1.2 Mpa [Houari] [26]	47
Fig.2.20. Coulis de ciment[44].....	62
Fig. 2.21.Treillis soudé pour murs de cave dans la construction de logements[44]	62
Fig. 2.22.Treillis posé sur un sol de cave[44].....	63
Fig.2.23.Le béton à fibres d'acier et de polypropylène est confectionné à l'usine à béton prêt à l'emploi... [44].....	63
Fig.2.24. Domaine d'utilisation de fibres dans le béton[44]... ..	64
Fig.2.25. Coulage d'une dalle de cave avec du béton à fibres Fortius[44].....	65
Fig.2.26.Coulage de béton à fibres d'acier Fortius dans un coffrage de mur de cave[18]	65
Fig.2.27. Polypropylène Fibril[46]... ..	66
Fig.2.28.Barres d'armature en fibre [47].....	67
Fig. 2.29. brise-lame renforcé de fibre[47].....	69
Fig. 2.30. balcon renforcé de fibre de verre[47].....	69
Fig.2.31. Chevauchement, raccordement et tension par d'armature en fibre de verre[47].....	69
Fig.3.1.Sable.....	79
Fig.3.2.Ciment utilisé.....	82
Fig.3.3.Copeaux d'acier utilisés.....	85
Fig.3.4.Copeaux de bois utilisés	86
Fig.3.5.polystyrène utilisé	87
Fig.3.6. malaxeur utilisé.....	88
Fig.3.7. Cône d'Abrams.....	89
Fig.3.8. Vibration des éprouvettes.....	91
Fig.3.9. Conservation des éprouvettes à 20°C.....	91
Fig. 3.10. Essais de compression sur éprouvette $\bar{A}E16x32$ réalisés dans notre recherche.....	92
Fig.3.11. machine de flexion utilisée.....	93
Fig.3.12.Dispositif de rupture en traction par flexion.....	93
Fig.3.13 Dispositif de rupture en compression.....	94
Fig.3.14. Balance utilisée pour la mesure des variations en poids.....	95
Fig.4.1.maniabilité du mortier en fonction du pourcentage de polystyrène	106

<i>Fig.4.2. masses volumiques en fonction du pourcentage des billes de polystyrène</i>	<i>108</i>
<i>Fig.4.3.courbes d'absorption capillaire en fonction du temps pour de différents mélanges (MT, MP5, MP10).....</i>	<i>108</i>
<i>Fig. 4.4. Evolution de la perte en poids a partir du décoffrage (polystyrène).....</i>	<i>116</i>
<i>Fig.4.5. Histogramme de la résistance à la compression pour des différents pourcentages de polystyrène [0, 1 et 3 %].....</i>	<i>112</i>
<i>Fig.4.6. Histogramme de la résistance à la compression pour des différents pourcentages de polystyrène</i>	<i>113</i>
<i>Fig.4.7.Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène</i>	<i>113</i>
<i>Fig.4.8.Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène.....</i>	<i>115</i>
<i>Fig.4.9. Histogramme de la résistance à la traction par flexion pour des différents pourcentages de polystyrène.....</i>	<i>116</i>
<i>Fig.4.10. Résistance à la compression d'un mortier renforcé de copeaux d'acier.....</i>	<i>120</i>
<i>Fig.4.11. courbes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux d'acier</i>	<i>122</i>
<i>Fig.4.12. Histogrammes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux d'acier</i>	<i>123</i>
<i>Fig.4.13. Résistance à la compression d'un mortier renforcé de copeaux de bois</i>	<i>127</i>
<i>Fig.4.14. Résistance à la compression d'un mortier renforcé de copeaux de bois en fonction du pourcentage de fibres.....</i>	<i>128</i>
<i>Fig.4.15. courbes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux de bois en fonction du pourcentage de fibres.....</i>	<i>130</i>
<i>Fig.4.16.Histogrammes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux de bois....</i>	<i>131</i>
<i>Fig.4.17. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 1% en masse</i>	<i>134</i>
<i>Fig.4.18. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 1% en masse</i>	<i>135</i>
<i>Fig.4.19. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 1% en masse</i>	<i>136</i>
<i>Fig.4.20. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 1% en masse</i>	<i>136</i>
<i>Fig.4.21. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 2% en masse</i>	<i>138</i>
<i>Fig.4.22. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 2% en masse</i>	<i>139</i>
<i>Fig.4.23. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 2% en masse</i>	<i>140</i>
<i>Fig.4.24. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 2% en masse</i>	<i>140</i>



Introduction générale

Introduction

Par ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions nouvelles. Non seulement, il peut être moulé dans les formes les plus diverses, mais il a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est peu combustible et peu toxique.

Deux caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation : il est fragile et résiste mal à la traction. Cependant, la récente mise au point de produits composites renforcés de fibres dans les secteurs de l'aérospatiale et des plastiques a offert la possibilité de pallier ces lacunes.

Bien qu'étant un matériau de construction les plus utilisés de nos jours, le béton possède néanmoins une propriété très nocive, pour la sécurité des structures (sa fissuration).

Pour tenter de remédier à cet aspect négatif, on a imaginé plusieurs procédés dont celui d'armer le béton par l'intermédiaire de barre d'acier (Béton armé classique).

Un autre procédé consiste à éviter de faire travailler le béton en traction grâce à une compression préalable : c'est le béton précontraint.

A l'inverse du rôle des armatures passives et de précontraints, il existe actuellement une grande variété de matériaux composites. La plus part sont destinés à des industries de pointe, celles-ci utilisent des composites constitués de fibres de carbone, d'alumines, de Wiskers etc..... dans des matrices qui sont d'origine organique métallique.

Ce pendant, nous rencontrons aujourd'hui plus spécialement dans le bâtiment et travaux publics un produit dont les constituants, le mode de fabrication les propriétés et le comportement

correspondent à ceux des matériaux composites. Il s'agit du béton de fibres composé d'une matrice cimentaire et des fibres apportant une armature à celle-ci .

Le BF est un matériau composite certes (mélange de ciment, granulats, eau et fibres), mais qui doit être considéré comme Homogène (fibres correctement réparties avec orientations aléatoires), comme peut l'être un béton classique, à la différence du béton armé traditionnel dans lequel le positionnement des armatures est défini en fonction des efforts appliqués.

Il ne s'agit donc pas d'un béton armé dans lequel on aurait remplacé l'armature traditionnelle en acier (treillis soudé et barres d'aciers) par des fibres ; de ce fait le béton de fibres ne doit être abordé à partir d'équivalence avec le béton armé tel qu'on le connaît actuellement.

Il s'agit d'un produit nouveau présentant notamment une résistance à la traction encore faible par rapport à la résistance compression, mais toutefois mobilisable dans des conditions normales de sécurité, pour lequel il est nécessaire de :

- définir des prescriptions de fabrication et mise en œuvre pour qu'il y ait effectivement « béton de fibres ».
- étudier les lois de comportement de façon à préciser ses domaines spécifiques d'utilisation et définir des critères de dimensionnement.

De part son originalité, ce sujet concernant l'influence des billes de polystyrène, copeaux d'acier et de bois sur le mortier a constitué notre premier choix. Nous n'avions au départ aucune base de recherche sur ces produits sur laquelle s'appuyer.

En effet, il n'existe pas ou très peu de travail de recherche à ce sujet localement.

Nous avons donc commencé dans un domaine très ouvert Où nous avions pas d'objectif fixe à atteindre.

La première des choses qu'il fallut se fixer était les dosages (teneur) des produits que nous allions étudier ; ce dosage étant un pourcentage du poids du ciment. A partir de là, nous ne savions pas si 4% était peu ou pas assez car il est difficile de se rendre compte du volume que peut représenter cette teneur. Nous avons donc dû rechercher la plage de dosages que nous allions étudier et pour cela, nous avons fabriqué du mortier uniquement pour tester si les dosages étaient réalistes du point de vue du malaxage et de la mise en œuvre. Nous sommes alors arrêtés sur un maximum (au delà duquel par exemple le volume occupé par le polystyrène devenait tellement important qu'il devenait difficile pour le malaxeur de mélanger le tout .(nous commençons à obtenir du polystyrène au mortier...)

De ce fait nous avons décidé d'étudier les pourcentages suivants

Polystyrène : 0.5% ,1% ,1.5% ,2% ,3% et 4%.

Copeaux d'aciers : 1% ,2%.

Copeaux de bois : 1% ,2%.

Ceci pour bien mettre en évidence l'influence de ces produits dans les faibles dosages. Bien que entendu, nous avons pour chaque caractéristique étudiée - comparé nos résultats avec un mortier de référence (témoin) réalisé selon les mêmes procédés de mise en œuvre et dosages en sable, ciment et eau.

Le seul paramètre changeant d'un mélange à l'autre étant le dosage (teneur) en fibres

Les caractéristiques que nous avons étudiées sont les suivantes :

- la maniabilité ;
- La masse volumique ;
- L'absorption capillaire ;
- La résistance à la compression et à la traction par flexion ;
- La perte en poids .

Par conséquent, nous avons cherché dans ce sujet à déterminer les avantages et ou les inconvénients qu'ils pouvaient y avoir à fabriquer du mortier contenant des fibres locales (sous produits). Ce qui est aussi intéressant de connaître c'est l'ordre de grandeur dans lequel influe le polystyrène, les copeaux d'acier et de bois et surtout le ou les dosages optimums.

Cette recherche décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton renforcé de fibres. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation très intéressante.

Cette étude a été scindée en trois principales parties :

La première représente une recherche bibliographique concernant l'identification et la caractérisation des différents bétons renforcés de fibres et l'influence de chaque type de fibres sur le comportement du béton et leur domaine d'application. Nous avons donc mis de point sur l'historique, l'évolution l'amélioration des béton par l'introduction des différentes fibres.

La deuxième partie s'intéresse à l'identification et la caractérisation des différents matériaux retenus dans le programme expérimental donc cette partie s'intéresse au composé « mortier » et présente la méthodologie des essais et les mesures.

La troisième partie consiste à présenter l'ensemble des résultats obtenus pour les trois types de mortiers avec la variation de leur taux de fibres utilisées. Une étude comparative des caractéristiques mécaniques à plusieurs échéances, l'influence de la variation du taux de fibres sur les propriétés du mortier frais et durci, mais aussi la corrélation entre les différents facteurs sont exposés.



chapitre

1

Le béton renforcé de fibres

1.1. Introduction.....	7
1.2. le béton de fibres.....	7
1.3. Natures des fibres.....	10
1.4. Formulation du béton de fibres.....	11
1.5. Mise en œuvre du béton de fibres.....	21
1.5.1. Composition du béton de fibres.....	21
1.5.2. Appareils recommandés pour l'étude de la mise en œuvre du béton de fibres.....	21
1.5.3. Fabrication du béton de fibres.....	22
1.5.4. Les facteurs influençant la mise en œuvre du béton et mortier de fibres.....	25

1.1. Introduction :

le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage ou de projection pour se prêter à diverses conceptions, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique, sa bonne tenue au feu et sa durabilité. Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction : *des fibres* qui sont naturelles ou synthétiques. Cela conduit à un matériau composite. Si, en général, les fibres sont noyées au hasard dans le béton, il arrive que, par des mises en œuvre adaptées, on puisse donner aux fibres une orientation préférentielle correspondant à la direction des contraintes pour améliorer la résistance à la traction ou à la flexion d'une pièce. Les différentes recherches effectuées jusqu'à présent, et les premières applications font espérer que le béton de fibres permettra la fabrication d'éléments plus mince et résistants mieux à la fissuration.

1.2. Le béton de fibres :

1.2.1. Le béton de fibres - Comment ?

Pour qu'il y ait réellement béton de fibres ,mélange ciment granulats eau et fibres il faut répondre à un certain nombre d'exigences.

- Béton de qualité répondant aux exigences habituelles de béton classique ; la jonction de fibres ne permet pas, à priori d'améliorer les performances du béton.
- liaison étroite entre les fibres et le béton pour assurer l'ancrage.
- Bonne répartition des fibres dans le béton .

1.2.2.Le béton de fibres - Pourquoi ?

Le comportement particulier du béton de fibres permet de :

1-Prendre en compte la résistance à la traction directe ; en effet la rupture , si elle est atteinte , n'est plus brutale , par ailleurs on peut déterminer des moments de fissurations et de rupture permettant l'approche de dimensionnement des ouvrages en maîtrisant le risque de fissuration et risque de rupture.

2 -Mobiliser une résistance au cisaillement importante .

3-améliorer le comportement au jeune age .

4-avoir une résistance à la flexion identique sous l'application d'efforts égaux, mais de sens opposés (symétrie de comportement).

5-Réduire considérablement les effets du retrait ou des chocs thermiques.

6-avoir une bonne résistance à la fatigue et aux chocs.

De plus les bétons de fibres ont l'avantage de se prêter à toutes les techniques de mise en oeuvre : coulage, pompage, moulage, projection.

1.2.3.Le béton de fibres-qu'apporte t'il ?

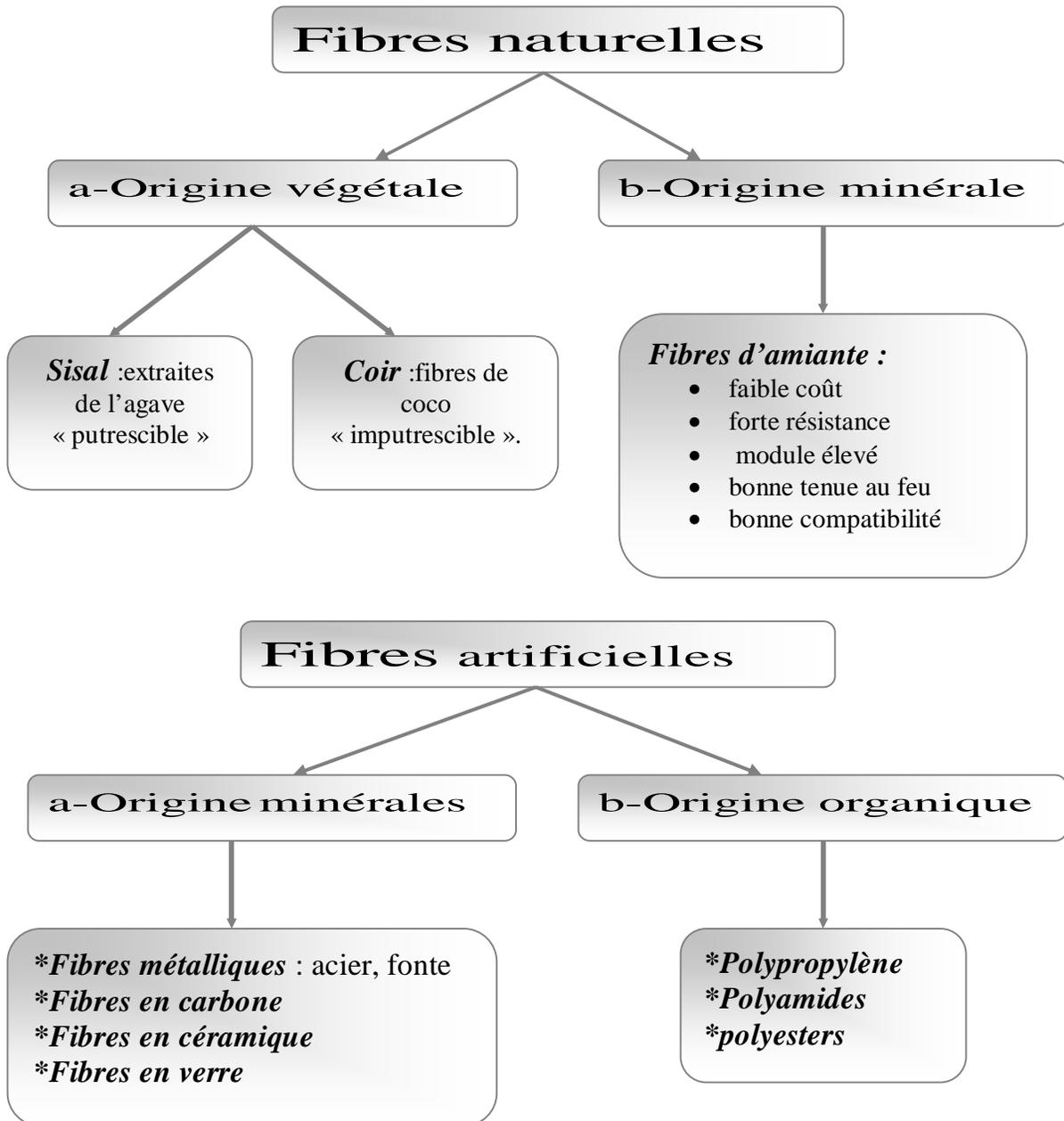
Le béton non armé est un matériau fragile, sous des efforts excessifs de traction ou de traction par flexion la rupture se produit brutalement par élargissement rapide d'une fissure , sans avertissement puisque la déformation reste très faible.(de l'ordre 1/1000).

- Si dans ce béton existe un réseau de fibres , il va s'opposer , et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure. la ou les premières fibres rencontrées effectuant une couture de la fissure jusqu'à en bloquer l'évolution .
- Si les efforts excessifs persistent d'autres fissures vont se former qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres.

Ainsi l'évolution incontrôlée de fissures et empêchés font que le béton de fibres présente une certaine ductilité (capacité à la déformation), ténacité (résistance à la fatigue), résilience (résistance aux chocs).

Types des fibres

Nature des fibres :



1.3.Natures de fibres :

Les fibres peuvent se classer en deux catégories : les fibres naturelles et les fibres artificielles.

1.3.1.fibres naturelles : elle ont surtout 2 origines :

A- Végétale : on peut citer le Sisal (fibres extraites de l'agave) et le coir (fibres de Coco). ils ont été utilisées sur les chantiers expérimentaux dans certains pays en voie de développement. Le Sisal est très résistant mais putrescible, par contre le coir est imputrescible.

B-Minérale : ce sont surtout les fibres d'amiante, ce matériau connu depuis de nombreuses années possède beaucoup d'avantages :

- faible coût ;
- forte résistance,
- module élevé ;
- bonne tenue au feu et bonne compatibilité avec ciment.

Toute fois, ces fibres ne conviennent pas pour les mortiers et les bétons à cause de leur longueur trop faible et de la quantité d'eau importante exigée. Elle ne sont donc utilisées qu'avec de la pâte pure.

1.3.2.fibres artificielles : on distingue deux types: les fibres minérales et organiques.

Parmi la première catégorie, on trouve les fibres métalliques (acier, fonte) les fibres en carbone, en céramique et en verre.

Parmi les fibres organiques les plus courantes ce sont les polypropylènes et plus rarement les polyamides et les polyesters.

NB :pour une amélioration de la résistance à la flexion d'une pièce ,il faut choisir des fibres ayant une résistance élevée en traction, un module important et un allongement a la rupture suffisant (fibre d'acier, verre).

Pour une amélioration de la résistance à l'impact on pourra choisir des fibres ayant une résistance plus faible (polypropylène).

1.4.Formulation des BFM :

L'optimisation de la composition des BFM est un passage **obligé** dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice, ce qui a pour double conséquence de diminuer la maniabilité du matériau et d'altérer sa compacité. Il est évident que cette perturbation est d'autant plus importante que le pourcentage de fibres est élevé, et que pour des dosages « homéopathiques », tels que ceux évoqués dans la préface, c'est-à-dire comportant au moins 50 kg/m^3 de fibres, il est impératif de reformuler la matrice.[35]

1.4.1.Objectifs d'une formulation : [16]

Les performances requises pour un béton impliquent :

- une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement au cône d'Abrams , noté ici A_{ff} ,
- des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours ; on notera f_{c28} cette résistance ;
- des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment C_{min} et un rapport E/C maximum $(E/C)_{max}$.

La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment C le plus faible possible tout en vérifiant $C \geq C_{min}$

Cette partie présente une méthode expérimentale de formulation largement validée et utilisée en France. Il aborde également une réflexion sur l'utilisation possible, dans un future proche, d'outils plus « moderne » couplant modèles théoriques et l'informatique, afin de faciliter, en l'allégeant, la tâche du « formulateur » de BFM.

1.4.2.Description de la méthode :

Il s'agit de la méthode Baron –Lesage [35] qui a été développée au Laboratoire central des ponts et chaussées, il y a une quinzaine d'année, pour optimiser le squelette granulaire des bétons non fibrés. Cette méthode est fondée sur trois hypothèses principales largement vérifiées par l'expérience :

- a) pour un rapport eau / liant fixé au départ, le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire (G+S) le plus compact ;
- b) les proportions optimales en granulats dépendent peu de la nature et du volume du liant ;
- c) l'introduction de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses

De manière pratique, la méthode se décompose en trois étapes :

- 1) le cahier des charges d'un BFM permet généralement de fixer :
 - le rapport eau / liant,
 - le diamètre du plus gros granulats,
 - le pourcentage de fibres,
 - la maniabilité souhaitée ;
- 2) on fait varier le rapport massique S/S+G (S :sable, G : granulats) et on détermine pour chaque valeur de ce rapport la maniabilité correspondante. On trace alors la courbe maniabilité fonction du rapport S/S+G et on détermine le rapport optimal qui correspond à la meilleure maniabilité ;
- 3) Si la maniabilité correspondant à l'optimum du squelette minéral est différente de la maniabilité fixée par le cahier des charges, il suffit alors soit d'augmenter ou de diminuer le volume de liant, soit d'ajouter un super plastifiant+, s'il n'y en avait pas initialement, ou d'en augmenter ou d'en diminuer la quantité, pour atteindre cette maniabilité souhaitée.

Remarques :

- 1- la maniabilité peut se déterminer suivant différentes méthodes expérimentales. Ainsi, il existe divers appareils qui permettent de déterminer, au travers de paramètres différents, cette maniabilité. L'objectif, ici, n'est pas de réaliser une présentation exhaustive de ces appareils, mais d'évoquer les deux plus connus et les plus utilisés en France, en l'occurrence le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL :
 - le cône d'Abrams, il peut être qualifié d'essai « statique », puisqu'il met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous l'effet de la pesanteur. La maniabilité y est caractérisée par un temps d'écoulement.
 - Le maniabilimètre LCL. Il est, quant à lui, un essai « dynamique » qui met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous vibration. La maniabilité est alors caractérisée par un temps d'écoulement.

Dans le cas des BFM, il est préférable d'utiliser le second appareil.

2- il a été dit que la maniabilité souhaitée s'obtient, soit en ajustant la quantité de liant, soit en faisant varier la quantité de superplastifiant.

L'étude de la composition du béton de fibre est complexe. Elle a été peu étudiée dans un ensemble jusqu'à présent. Il ne suffit pas d'ajouter un certain pourcentage de fibres à une composition courante de béton. En effet, les fibres modifient considérablement l'ouvrabilité d'un béton. Ainsi, la baisse d'ouvrabilité est d'autant plus importante :

- que le rapport l/d (longueur/diamètre des fibres)est grand ;
- que le diamètre du plus gros granulats est grand ;
- que le pourcentage de fibre est élevé.

(voir fig.1, d'après une étude de RITCHIE et RAHMAR [27] et fig.1.2 d'après J.E.Edgington [17])

- W'_p : pourcentage en poids de fibre de polypropylène par rapport au poids sec des constituants ;
- V^o_f pourcentage en volume des fibres (acier et polypropylène) dans le béton, $V^o_f = 2.0 W'_p / 0.95$

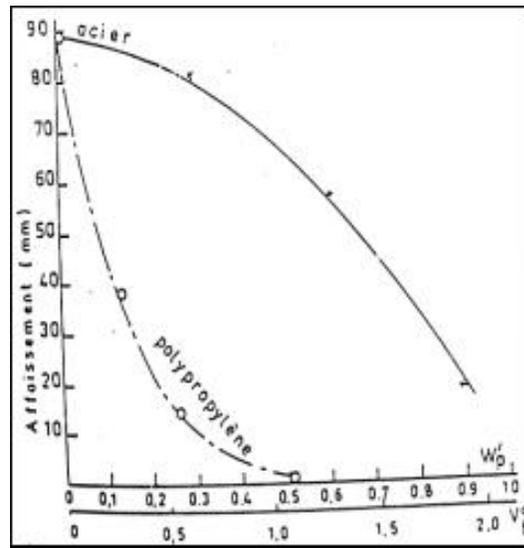


Fig.1.1. Effet des fibres incorporés dans un béton sur son affaissement

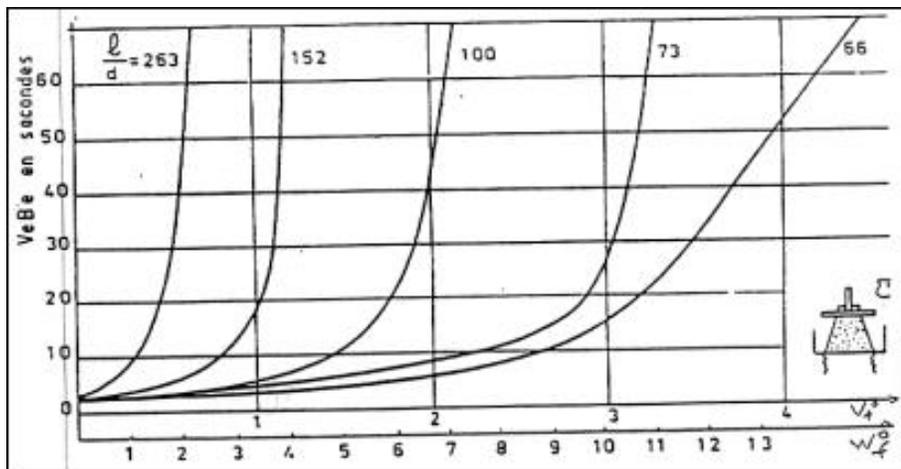


Fig.1.2.Effet de la teneur en fibres d'acier et de leur élancement sur l'ouvrabilité Ve-Be (d'après J.E.Edgington et al.)

Plusieurs auteurs, dont Dehousse conseillent de limiter le rapport $G/(G+S)$ à 0.5, G étant le poids du gravillon (grains >5mm).

D'après ce même chercheur, la granulométrie du béton doit être étroitement liée à la dimension des fibres et les granulats doivent être de dimension telle qu'un encadrement par des fibres soit possible. (Fig.1.3). Compte tenu de cela, il faut limiter la grosseur des granulats et les bétons armés de fibres sont plutôt des microbétons surdosés en grains au dessus de 5 mm et des mortiers. La fig.1.4. illustre ce phénomène (d'après Swamy et Mangat) [27]

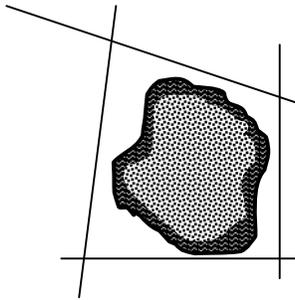


Fig.1.3. Encadrement d'un granulat

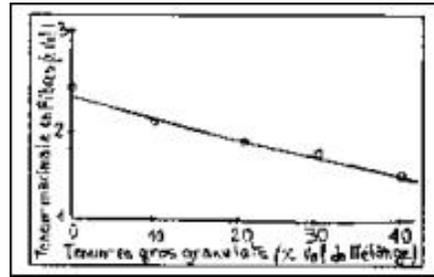


fig..1.4. teneur maximale en fibres en fonction de la teneur en gros granulats

Le comité des grand barrages aux Etats-Unis (Uscold) [15] recommande certains fuseaux granulométriques pour les mortiers 0/5, les bétons fins 0/9, ou les bétons moyens 0/19. Les teneurs optimales en fibres, qu'il préconise, sont les suivantes (en volume) :

- 1.5 à 2% pour les pâtes de ciment,
- 1.5 % pour les mortiers 0/5,
- 1.25 % pour les bétons fins 0/9.5,
- 1% pour les bétons moyens 0/19.

Une étude complète sur la formulation des bétons de fibres d'aciers a été faite par Serna Ros [41] au LCPC. Sa méthode lui permet de déterminer un squelette minéral optimal. Sa méthode est dérivée de celle de Baron Lesage et elle utilise le module de finesse. (Le module de finesse est le centième de la somme des refus, en pour cent et en poids, sur les tamis 0.080- 0.16 - 0.315 – 0.630 –1.250 –2.5 –5 –10 –20 –etc....). Connaissant le module de finesse de la composition et celui de chacun des composants, il est possible de calculer leurs proportions. Serna Ros a ainsi étudié les variations de l'affaissement au cône d'Abrams, en fonction du module de finesse (fig.1.6) et a ensuite étudié les modifications provoquées par la présence des fibres. Il a ainsi constaté que, pour obtenir la composition

optimale, le module de finesse devait être d'autant plus faible que le pourcentage de fibres était grand.

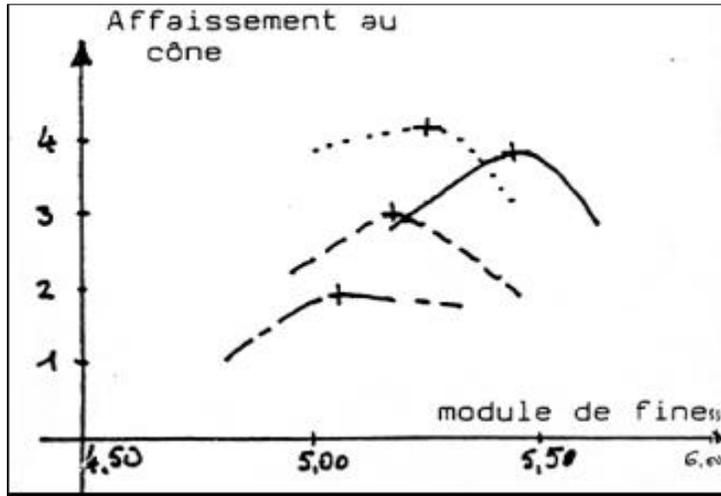


Fig.1.5. Affaissement au cône en fonction du module de finesse.

En reportant sur une courbe le pourcentage de fibres en fonction des modules de finesse correspondant à la maniabilité maximale, Serna Ros a observé que, pour chaque type de béton ces points étaient alignés (fig.1.6), à condition que le pourcentage des fibres reste inférieure à 1.5 %. De plus, les droites sont concourantes en un point correspondant à un module de finesse de 5.16 et à un dosage en fibre de 1.8 %. Ainsi connaissant la granulométrie de deux granulats, on peut déterminer la composition optimale du béton sans fibres par la méthode Baron- Lesage, en déduire le module de finesse correspondant (m_{is}) et, en joignant ce point (sur l'axe des abscisses) au point 0, on obtient le module de finesse pour les différents dosages en fibres.

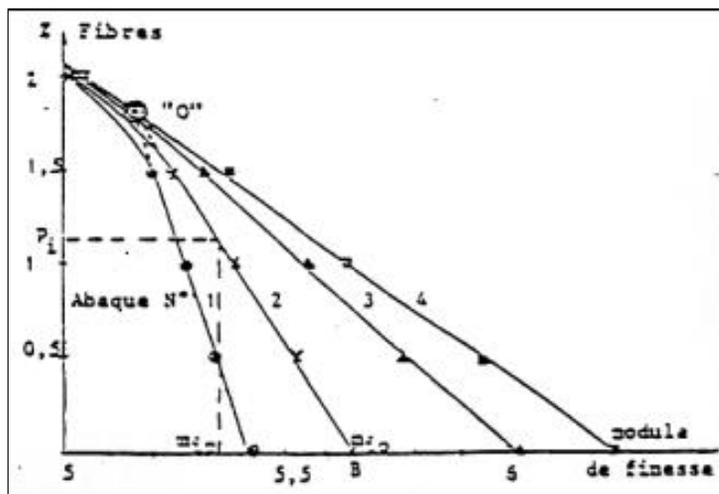


Fig.1.6.abaques reliant la composition granulatoire optimale du béton au pourcentage en fibres

L'étude de Serna Ros[41] porte aussi sur les limites de maniabilité des bétons de fibres. En effet, lorsque l'on augmente le dosage en eau d'un béton de fibres, on arrive rapidement à un affaissement au cône limite au – delà duquel correspondant au slump limite semblaient se placer sur des courbes (courbes d'isomaniabilité sans ségrégation) (fig.1.7).

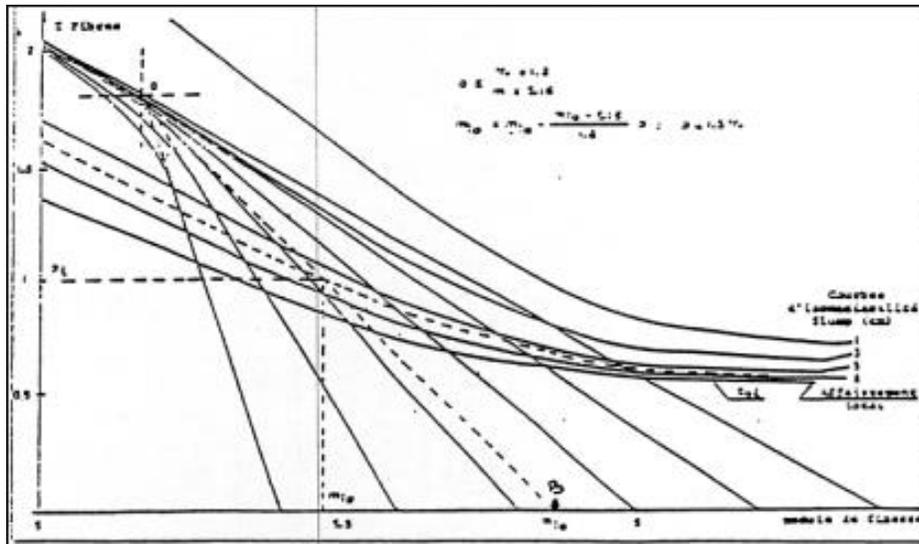


Fig.1.7- Abaque permettant d'établir une formulation de béton de fibres

Ces résultats se recourent avec ceux obtenus par MOENS [15]. Il est ainsi possible, à partir d'un module de finesse et d'un dosage en fibres, de déterminer la valeur limite supérieure de l'affaissement au cône du béton correspondant.

Les conclusions de l'étude de Serna Ros sont les suivantes :

- pour des bétons ayant un faible module de finesse (béton de petits granulats il est possible d'ajouter des fibres jusqu'à 1 % (en volume) sans précaution particulière, et jusqu'à 2 % et plus, en contrôlant bien la fabrication effet, avec plus de 1 % de fibres, une faible variation de dosage en eau provoque la formation de pelote de fibres (oursin) .
- pour des bétons ayant un module de finesse élevé (béton de gros granulats il faut limiter la teneur en fibres à 0.5 ou 0.6 % (en volume). Avec des dosages voisins de 0.5 ou 0.6%, tout excès de fibres risque d'entraîner la formulation d'oursin.

1.4.3. Modifications du squelette granulaire d'un BFM par rapport à un béton sans fibres :[35]

Comme évoqué précédemment, à constituants identiques, le squelette granulaire optimal d'un BFM peut être très différent de celui du béton non fibré.

L'importance des modifications observées va dépendre de paramètres divers parmi lesquels on peut citer : le type de fibre, le pourcentage de fibres, le rapport longueur de la fibre / diamètre du plus gros granulats .

De manière générale, on constate que, pour une maniabilité donnée, la quantité de liant, ainsi que le rapport S/(S+G) optimal du point de vue rhéologique augmentent avec le pourcentage de fibres et avec le rapport (L_f / Φ_g) , lorsque celui-ci varie approximativement, entre 1 et 3. Au contraire, lorsque (L_f / Φ_g) est inférieur à 1 ou supérieur à 3, seul intervient de manière significative le pourcentage de fibres.

Dans la fig.1.8 et 1.9 sont présentés des résultats qui illustrent ce qui précède.

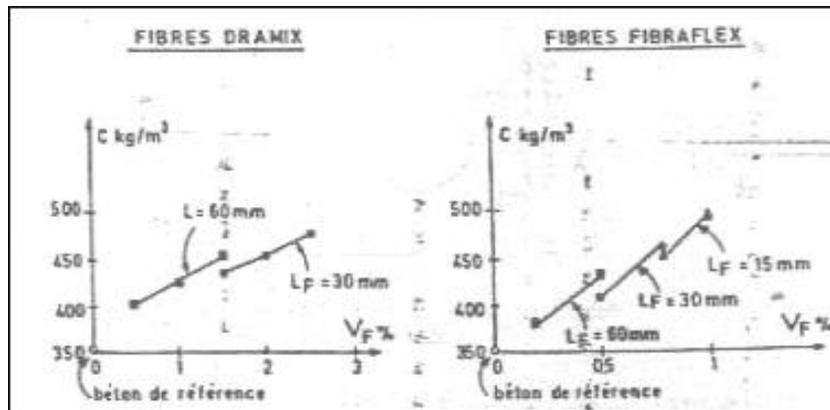


Fig.1.8. Exemples de l'influence de la longueur des fibres et du pourcentage incorporé sur la quantité de pâte de ciment nécessaire au BFM (d'après Rossi, 1991)

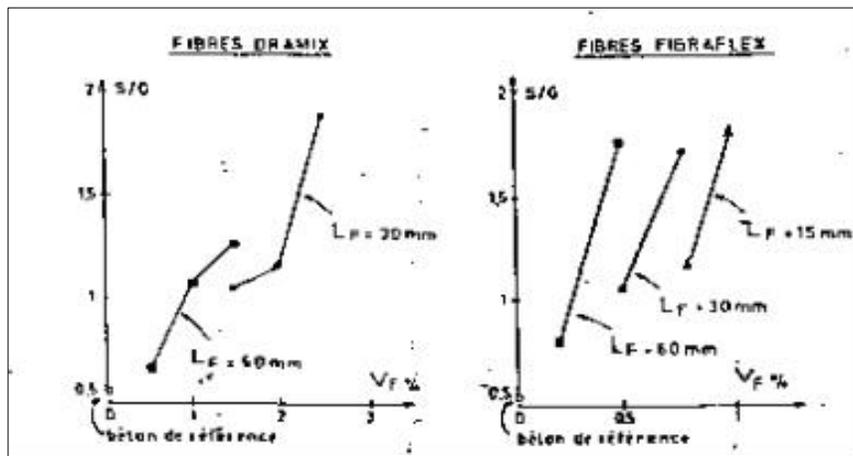
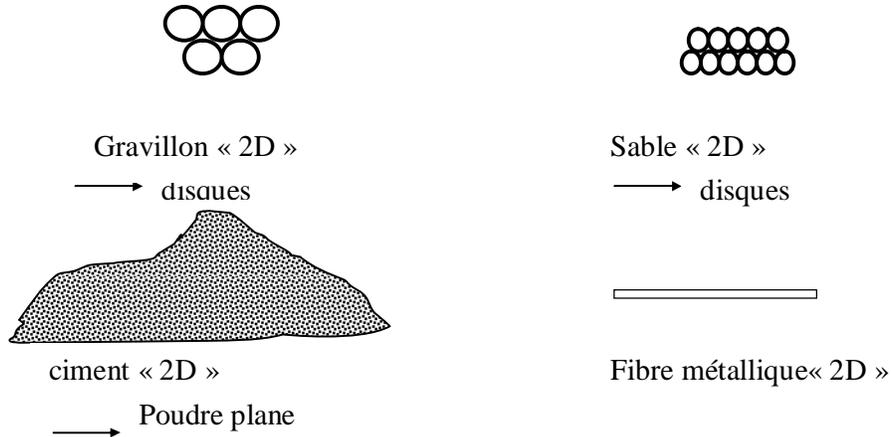


Fig.1.9. Exemples de l'influence de la longueur des fibres et du pourcentage incorporé sur le rapport S/G du BFM (d'après Rossi, 1991)

On constate, au regard de ces figures, que l'influence sur le squelette granulaire est plus importante dans le cas des fibres Fibraflex, qui sont des rubans de fonte amorphe de très faible épaisseur, que dans des fibres Dramix qui, elles, sont des fibres cylindriques en acier tréfilé, munies de crochets à leur extrémité. Ceci illustre ce qui est dit précédemment sur l'importance de la géométrie de la fibre.

Cette différence s'explique très bien quand on s'attache à comprendre l'origine physique de la modification nécessaire du squelette granulaire d'un BFM.

L'introduction de la fibre au sein du squelette granulaire va se traduire, localement, c'est-à-dire autour de chaque fibre, par un « desserrement » du squelette granulaire, similaire à un effet de paroi. Ainsi, un certain volume des plus gros granulats va être « remplacé » par un certain volume de fibres, ce qui conduit à un « enrichissement » en éléments fins du squelette granulaire. Cette modification de l'empilement granulaire est schématisée dans la fig .1.10 au travers d'une illustration « pédagogique » qui consiste à analyser le problème tridimensionnel de cet empilement par une analogie bidimensionnelle.



Compacité optimale d'un béton sans fibres



L'espace est pavé de triangles équilatéraux

Compacité optimale d'un BFM

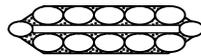


Fig.1.10. Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM comparé à celui d'un béton non fibré

Considérant ce qui précède, il est facile de comprendre qu'une fibre, ayant la forme d'un ruban, conduise, du fait de sa plus grande surface spécifique, à des effets de parois locaux plus importants qu'une fibre cylindrique, et donc perturbe plus l'empilement granulaire de la matrice.

1.4.4. Développement d'une nouvelle approche plus théorique pour l'optimisation de la composition des BFM : [36]

La méthode de formulation présente ci-dessus, bien que très efficace, présente le désavantage d'être assez lourde dans sa mise en œuvre. En effet, normalement, à chaque fois que les constituants de la matrice, le type et la géométrie de la fibre changent, il faut, pour

optimiser la formulation du BFM, reconstruire la courbe maniabilité fonction du rapport $S/(S + G)$, ce qui nécessite, en général, de réaliser entre cinq et dix gâchées. C'est ce qu'on appelle une approche systématique. Compte tenu du fait qu'actuellement le type et la géométrie des fibres couramment utilisées sont encore en nombre assez restreint et qu'une certaine expérience dans la formulation des BFM est déjà acquise, il est vrai que trois ou quatre gâchées sont généralement suffisantes pour déterminer l'optimum granulaire du BFM. Mais, il n'en est pas de même lorsque de nouveaux constituants, de nouvelles fibres ou de nouveaux pourcentages de fibres sont utilisés. Il est donc intéressant de développer une approche théorique (qui ne ferait alors intervenir aucune contribution expérimentale, ou du moins, limitée à la seule calibration du modèle) qui permette, dans une première étape, d'approcher l'optimum de compacité du BFM (approche de « dégrossissage »), puis, dans une seconde étape, d'affiner la détermination de cet optimum en réalisant, au maximum trois gâchées.

C'est cette méthodologie qui est développée depuis des années au LCPC, sous la direction de F. de Larrard. Ainsi, un modèle théorique d'empilement granulaire, le modèle de suspension solide de Larrard, a donné naissance au logiciel *RENE* qui permet, de manière très facile et en temps très bref, de réaliser la première étape de la méthodologie évoquée ci-dessus.

Il est prévu d'étendre cette approche aux BFM. Pour ce faire, il est nécessaire, comme pour les grains du squelette granulaire, de déterminer, dans le cadre du modèle linéaire de compacité, les fonctions d'interaction entre les fibres et les grains de différents diamètres. Pour parvenir à cet objectif, un important travail expérimental reste encore à réaliser en amont.

1.5.Mise en œuvre du béton de fibres :

Problèmes liés à la mise en œuvre du béton de fibres :

L'introduction des fibres courtes distribuées uniformément dans les matériaux à base de ciment cause des problèmes d'ouvrabilité, on assiste à une diminution de la maniabilité et puis des fois à la formation de pelote de fibres ou *oursin* résultant de l'enchevêtrement des fibres.

1.5.1.Composition du béton de fibres :[15]

Pour déterminer la composition du béton de fibres il faut rechercher la formulation la plus maniable dont la mise en place nécessite le moins d'énergie, et qui sera la plus compacte après mise en place, donc assurer un moulage et un serrage correct du matériau avant prise de liant.

On n'ajoute pas n'importe quelle fibre à un mortier ou un béton classique, il convient d'étudier au préalable une composition adaptée, parce que la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenue qu'après une optimisation de la composition pour déterminer la composition optimale du béton renforcé de fibres métalliques, le LPC de Paris a fait varier le rapport sable/gravier.

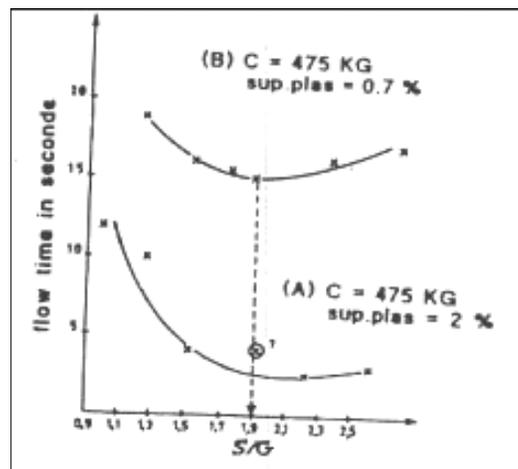


Fig.1.11. exemple de la compacité optimale d'un BFM obtenus par la méthode de Baron-Lesage .

1.5.2.Appareils recommandés pour l'étude de la mise en œuvre du béton et mortier de fibres :

plusieurs études ont montrées que les essais statiques (flow test essai de compactage.....) sont inadaptés pour l'étude de la mise en œuvre du béton en fibres, et qu'il faut recourir aux essais dynamiques qui sont des essais faisant intervenir la vibration.

Parmi ces essais on trouve l'essai V.B (fig1.12), l'essai du cône inverse (fig.1.13) et puis le maniabilimètre LCPC (fig.1.14)

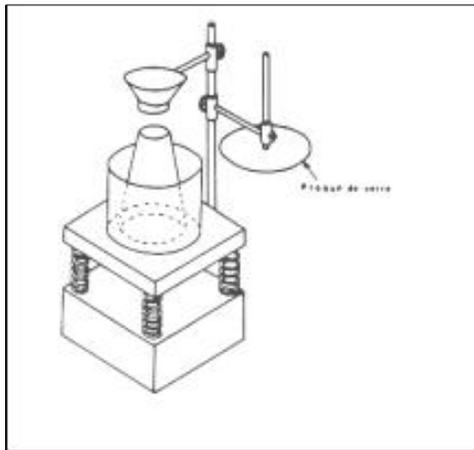


Fig.1.12. appareil VB

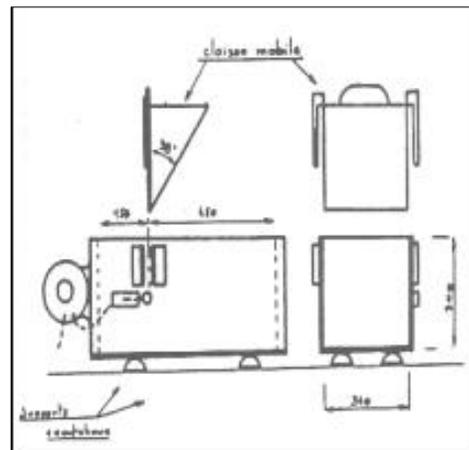


Fig.1.13. Maniabilimètre- Lesage

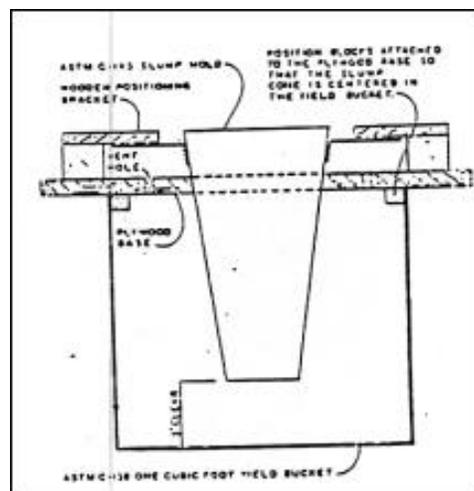


Fig.1.14. cône inversé

1.5.3.Fabrication de béton de fibres :

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70 p. 100 du volume, contre 50 p. 100 pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres.

le malaxage du béton de fibres est important. En effet, il faut veiller à obtenir une bonne dispersion des fibres dans le mélange et éviter la formation de boules de fibres. Le Comité

544 de l'ACI [3] recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées, les matériaux recherchés :

a/ Mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur (par exemple ajouter les fibres sur le tapis roulant d'alimentation des granulats) ;

b/ Mélanger d'abord les gravillons et le sable, ajouter les fibres, puis le ciment et l'eau. Cette méthode est recommandée pour les fibres de polypropylène, de façon à les défibriller. [Dardare] [10]

c/ Ajouter les fibres en fin de malaxage et adopter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène.

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 % ou plus de granulats très fins.

Les superplastifiants incorporés à des bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

Pour les fibres métalliques, le Comité 544 de l'ACI [15] conseille d'ajouter les fibres sous forme de pluie, en les faisant passer à travers un tamis muni d'un vibreur. Pour éviter ces complications la Société BEKAERT propose des fibres collées ensemble par paquets à l'aide d'un produit qui se dissout dans l'eau de gâchage, on peut ainsi ajouter les fibres au mélange sans précautions particulières.

Le transport du béton de fibres peut se faire en général avec des malaxeurs classiques, en prenant la précaution de charger le camion à une capacité inférieure au maximum, car il faut plus d'énergie pour malaxer un béton de fibres que pour malaxer un béton classique.

Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de granulats grossiers. Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment moins élevé permet d'obtenir un produit plus résistant

1.5.4.les facteurs influençant la mise en œuvre du béton et mortier de fibres :

Les facteurs qui influencent considérablement les caractéristiques des mortiers et bétons de fibres frais sont la teneur en Agrégats (fig.1.15) la géométrie et le volume des fibres (fig.1.16) donc il faut savoir l'influence de l'ajout des fibres sur la maniabilité du mortier.

[17]

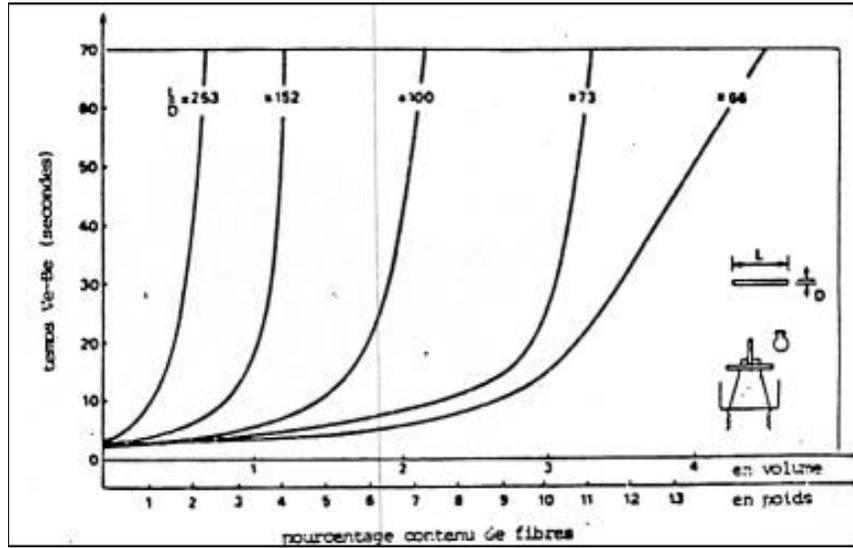


Fig.1.15. effet du rapport de l'aspect L/D sur l'ouvrabilité d'un mortier renforcé de fibres

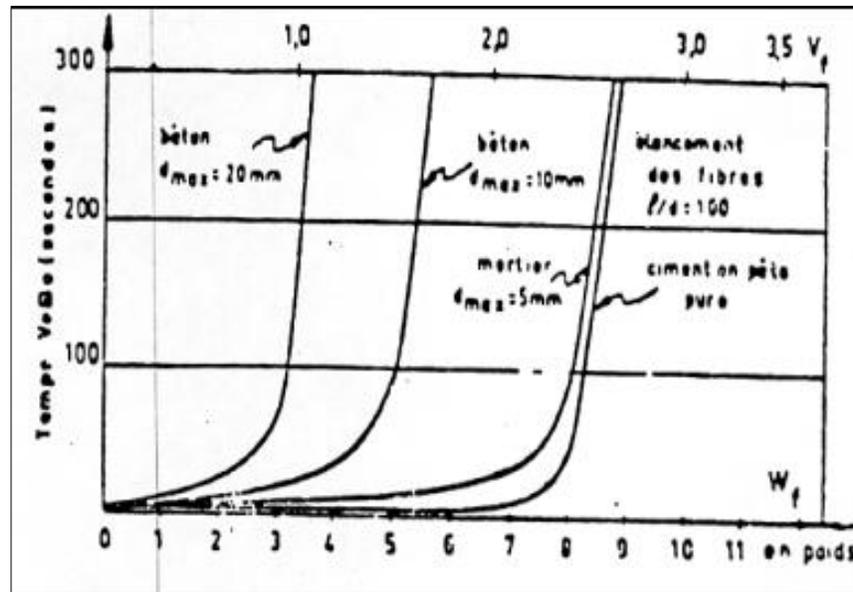


Fig.1.16. ouvrabilité Ve-Be en fonction de la teneur en fibres, pour différentes matrices.

Les méthodes actuelles de formulation de BFM permettent d'obtenir des BFM à la maniabilité souhaitée, même lorsque le pourcentage de fibres incorporé est important.

Et lorsqu'on met en œuvre un BFM après l'optimisation de formulation, il est important de connaître et de tenir compte de certaines spécificités de ce BFM, liées à la technologie de mise en œuvre adaptée et du type de structure [35] ; ces spécificités peuvent se décliner de la manière suivante :

- l'orientation préférentielle des fibres ;
- les effets de « voûtes » ou d'écran ;
- les effets de « cheminée » ;
- la ségrégation des fibres ;
- l'appauvrissement en fibres ;
- la relation entre le rapport longueur/diamètre de la fibre et la maniabilité du BFM.

1.5.4.1. l'orientation préférentielle des fibres :

Cette orientation a plusieurs origines qui sont principalement :

- la technique de mise en œuvre adoptée ;
- les effets liés à l'écoulement du BFM.

A. La technique de mise en œuvre :

Il existe différentes techniques de mise en œuvre des bétons, que l'on peut rapidement rappeler :

- le béton coulé ;
- le béton projeté ;
- le béton placé à l'aide d'une pelle, à main ou d'une fourche dans des coffrages ou moules de petites dimensions, comme c'est souvent le cas dans un laboratoire d'essais.

a. Le béton coulé :

En ce qui concerne le béton coulé, deux situations sont à considérer : soit le BFM doit s'écouler pour remplir le coffrage, soit il n'a pas, ou très peu, à le faire. Dans le premier cas, l'écoulement produit une orientation préférentielle des fibres qui est discutée dans le paragraphe suivant ; dans le second cas, l'orientation des fibres dépend de la technique de coulage adoptée, c'est-à-dire soit à l'aide d'une pompe, soit à l'aide d'une benne (ou godet) comportant ou pas un manchon (tuyau placé à la sortie de la benne)

• BFM coulé à l'aide d'une pompe ou d'une benne munie d'un manchon :

Les fibres se trouvent orientées dans le tuyau de la pompe et dans le manchon parallèlement à la ou aux parois, donc perpendiculairement à la surface du coffrage par

laquelle pénètre le BFM. Cette orientation préférentielle est donc celle qu'auront les fibres à la fin de la mise en œuvre du BFM, aucune vibration n'étant alors susceptible de modifier l'orientation des fibres.

- **BFM coulé à l'aide d'une benne sans manchon :**

Les fibres subissent peu d'orientation préférentielle, et l'on observe une orientation relativement isotrope des fibres au sein de la structure à la fin de la mise en œuvre du BFM, à l'exception toutefois du voisinage des parois du moule, où une orientation préférentielle des fibres est constatée. Il s'agit de l'effet de paroi qui sera évoqué plus loin.

- b. Le béton projeté :**

L'objet n'est pas ici de présenter en détail les différents aspects relatifs aux techniques de mise en œuvre des bétons par projection, en l'occurrence les projection par voie sèche, mouillée ou semi-mouillée, des livres de grande qualité traitant déjà de ce sujet (comment celui de C. Resse et M. Venuat, 1981), mais analyser comment les fibres s'orientent dans un BFM projeté.

Quelle que soit la technique de projection, les fibres sont toujours préférentiellement orientées parallèlement aux parois de la lance de projection à la sortie de celle-ci. En revanche, au contact de la paroi que le BFM doit renforcer, les fibres s'orientent, préférentiellement, parallèlement à la surface de cette paroi. L'importance de cette orientation préférentielle dépend du rapport longueur de la fibre/épaisseur de BFM projeté. Ainsi, plus ce rapport est faible, plus l'orientation préférentielle est importante.

- c. Les BFM mise en place à l'aide d'une pelle, d'une pelle à main ou d'une fourche :**

On s'intéresse ici aux BFM mis en œuvre en laboratoire pour confectionner des éprouvettes de petites dimensions.

Du fait de la manière dont le BFM est prélevé par l'outil servant à remplir le moule de la forme de celui-ci, de la manière dont l'outil introduit le BFM dans le moule, de la petitesse de ce dernier qui exclut un écoulement important du BFM, les fibres sont orientées, préférentiellement, perpendiculairement à la surface du moule par où le BFM est introduit.

Cette orientation préférentielle augmente avec le rapport *longueur de fibre sur volume de BFM contenu dans l'outil*.

- B. Les effets liés à l'écoulement du BFM :**

Dans le cas où le BFM peut s'écouler à l'intérieur du coffrage soit par gravité, soit sous l'effet d'une vibration, les fibres ont tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement du fluide visqueux que constitue le béton. Cette tendance augmente lorsque le rapport *distance d'écoulement / longueur de la fibre* augmente.

Les effets de paroi, connus des praticiens, sont en fait une conséquence du phénomène précédent, c'est –à-dire une conséquence de l'orientation des fibres parallèlement aux lignes de courant au sein du BFM qui s'écoule. En effet, lorsqu'un BFM s'écoule le long d'une paroi, les lignes de courant sont parallèles à la surface de la paroi, donc les fibres s'orientent également parallèlement à cette surface.

1.5.4.2. les effets de voûte ou d'écran :

Ces effets de voûte apparaissent lorsqu'un obstacle s'oppose au déplacement des fibres. Dans ce cas-là, des fibres peuvent s'accumuler et former un paquet qui, en empêchant le déplacement des autres fibres, mais également des gros granulats du BFM, induit de la ségrégation.

On rencontre ce problème lorsqu'un BFM est coulé dans une structure comportant des armatures traditionnelles, et que les espacements entre les armatures sont plus petits ou très peu supérieurs à la longueur des fibres.

Il peut intervenir également lorsqu'un BFM est coulé entre deux parois d'un moule ou d'un coffrage, parois distantes d'une longueur voisine de ou inférieure à celle des fibres.

1.5.4.3. Les effets de cheminée :

Ce phénomène apparaît lorsqu'un BFM assez visqueux et contenant un pourcentage de fibres important (supérieur à 50kg/m^3) est vibré à l'aide d'une aiguille vibrante.

La pénétration de l'aiguille dans le BFM provoque un écoulement local de celui-ci le long de l'aiguille et une orientation des fibres parallèlement à la surface de celle –ci (du fait des lignes de courant créées par la vibration et le déplacement de l'aiguille). Dans le cas d'un pourcentage élevé de fibres, leur enchevêtrement va donc créer, autour de l'aiguille, une sorte « d'enveloppe » rigide (par effet de voûte), qui constitue, lorsque l'aiguille est sortie du BFM, un écran empêchant la matrice visqueuse de combler de manière satisfaisante le trou ou cheminée, laissé par l'aiguille. En effet, on observe alors, à l'emplacement initial de l'aiguille, de la laitance ou, à l'extrême, le trou non comblé.

Il est par conséquent important d'éviter de vibrer à l'aide d'une aiguille vibrante un BFM visqueux contenant un pourcentage élevé de fibres.

1.5.4.4. La ségrégation des fibres :

Ce phénomène apparaît lorsqu'on utilise un BFM très fluide pour réaliser un élément structurel de hauteur importante, tel une colonne ou une poutre de grande hauteur. Il a la

même origine que celle relative à la ségrégation des gros granulats d'un béton, c'est-à-dire la pesanteur.

1.5.4.5. L'appauvrissement en fibres :

Ce problème intervient principalement dans le cas des bétons projetés. En effet lorsque la fibre est projetée à l'aide d'une lance de projection, elle acquiert une certaine énergie cinétique en arrivant sur la paroi que l'on désire renforcer. Cette paroi étant habituellement peu déformable, les fibres vont avoir tendance à rebondir sur cette paroi. L'importance de ce rebond va être, dans le cas de technique de projection par voie sèche, beaucoup plus grande que dans celui de technique de projection par voie mouillée car, dans ce dernier cas, la fibre étant enrobée d'une matrice visqueuse, le choc de la fibre sur la paroi est en grande partie amorti par des phénomènes visqueux liés à la matrice. En ce qui concerne la voie sèche, l'importance du rebond dépend de paramètres tels que : le poids unitaire de la fibre, son élasticité, la vitesse de projection, la distance de la lance de projection par rapport à la paroi, l'angle que fait la fibre en arrivant sur la paroi, le rapport longueur de la fibre /taille du plus gros granulats...

L'appauvrissement en fibres des BFM projetés constitue donc un aspect très important vis-à-vis de l'utilisation de ces matériaux.

1.5.4.6. Relation entre le rapport longueur / diamètre de la fibre et la maniabilité du BFM : [36]

Pour la majeure partie des applications industrielles actuelles ou potentielles, la maniabilité des BFM est un paramètre primordial. En effet, un BFM développé en laboratoire en utilisant des méthodes et techniques « artisanales » de mise en œuvre, aussi performant soit-il d'un point de vue mécanique, ne sera jamais développé industriellement s'il ne se met pas en œuvre correctement avec les techniques classiques de chantier ou d'usine (cas de la préfabrication).

NB :Ainsi ,pour un dosage en fibres donné, plus ce rapport est grand plus la maniabilité du BFM est mauvaise, et plus le risque de formation de pelotes de fibres au sein de la matrice est grand

On peut essayer d'expliquer cette constatation empirique de la manière suivante :

- Si on raisonne à longueur de fibre donnée et pour un même dosage, plus la fibre aura un diamètre petit, plus la surface spécifique de la fibre sera importante, et plus le nombre de fibres sera grand. La surface spécifique plus grande conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, alors que le plus grand nombre de fibres conduit à une probabilité plus élevée de contacts entre fibres. Ces deux facteurs expliquent parfaitement la perte de maniabilité observée lorsque le rapport longueur /diamètre de la fibre donné et pour un dosage donné, plus le diamètre de la fibre est petit, plus la fibre doit être courte et inversement.
- Si on raisonne à rapport longueur /diamètre de fibre donné et pour un dosage donné, plus le diamètre de la fibre est petit, plus la fibre doit être courte et inversement .

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

En fait, il intervient un autre facteur, qui est le poids unitaire de la fibre. En effet, plus la fibre est lourde, plus elle aura tendance, sous l'effet de la pesanteur (avec ou sans vibration) , à quitter la gaine de pâte de ciment qui l'enrobe pour venir en contact avec les granulats, ce qui accroît les frottements entre la fibre et les granulats étant beaucoup plus importants que les frottements de cette fibre avec le fluide visqueux que constitue la pâte de ciment fraîche.

En conclusion, on peut déduire à la fois de l'expérience et de la réflexion que, ***pour une longueur donnée de fibre, la maniabilité d'un BFM diminue avec la diminution du diamètre de cette fibre, et que pour un rapport longueur / diamètre donné (ou voisin), la maniabilité diminue lorsque la longueur de la fibre augmente.***

On peut présenter cette conclusion sous une autre forme, plus connue des spécialistes des BFM : ***à la maniabilité fixée, on peut soit introduire un dosage important de fibres courtes, soit un dosage faible de fibres longues.***



Propriétés mécaniques et domaines d'application

chapitre

2

2.1.Introduction.....	31
2.1.1. compression.....	31
2.1.2. traction.....	32
2.1.3. flexion.....	34
2.1.4. courbes effort –déformation.....	41
2.1.5. résistance au choc.....	44
2.1.6. résistance à l'usure.....	45
2.1.7. agent extérieurs.....	45
2.1.8. retrait.....	45
2.1.9. fluage.....	47
2.1.10. résistance à la fatigue.....	48
2.1.11. conductivité électrique du béton de fibres d'acier.....	48
2.2.. applications de béton de fibres.....	50
2.2.1. introduction.....	50
2.2.2. diverses applications	50
2.2.2.1.exemples de réalisations en béton de fibres d'acier.....	52
2.2.2.2. fibres de polypropylène.....	66
2.2.2.3. fibres de verre.....	67
2.2.3. avantage du béton de fibres.....	71
2.3. conclusion.....	72

2.1. Introduction :

Il est difficile de fabriquer des éprouvettes sans avoir une orientation préférentielle des fibres. L'ACI et IRILEM recommandent donc de suivre certaines méthodes. SABA quant à lui, a préféré mesurer les caractéristiques du béton de fibres sur des carottes extraites de gros blocs. Cette méthode est néanmoins très onéreuse. [15]

L'aspect important (HOUARI,1993) [26], lors des études sur le béton renforcé de fibres est la représentativité des essais, étant donné sa très grande hétérogénéité, principalement due à l'orientation préférentielle des fibres, lié notamment à la gravitation et la vibration.

2.1.1. compression :

Les différents chercheurs sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation, dans d'autres une légère diminution. Cette diminution peut être causée par une mauvaise compacité due à un excès de fibres, ou à une mauvaise composition. Par exemple DARDARE [10] a trouvé que l'incorporation de fibres de polypropylène dans le béton apporte une légère amélioration lorsque le pourcentage de fibres est faible et une diminution pour de forts pourcentages (fig.2.1)

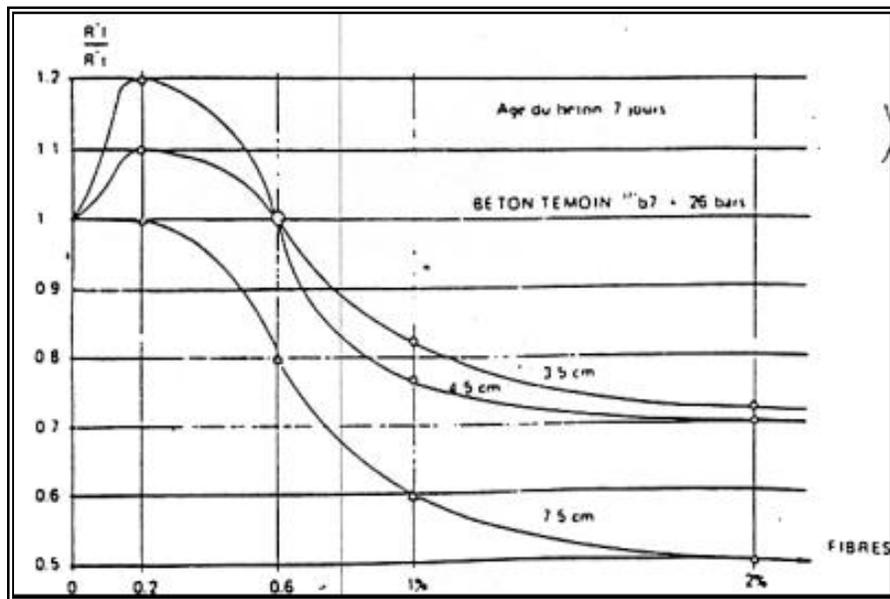


Fig.2.1. Influence de la longueur et du pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé.

D'après HOUARI (1993) [26], les résistances à la compression de béton de fibres métalliques sont inférieure à celles de bétons sans fibres. Et que la présence des fibres dans la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes. Cet effet est dû aux fibres qui

continuent à "coudre" les fissures qui se produisent. Ainsi, la rupture fragile caractéristique du béton traditionnel n'est plus observée en présence des fibres.

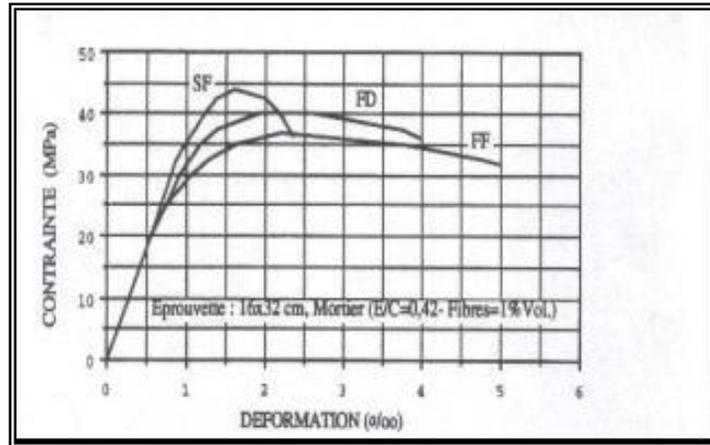


Fig.2.2.Courbes " contrainte-déformation" en compression [Houari]

2.1.2. traction :

Peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux. D'après la bibliographie, les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. Elles peuvent atteindre 30 % pour les fibres résistantes (par exemple : fibres d'acier) voir MANGAT [15]. Elle sont plus faibles ou nulles lorsque les fibres ont une résistance inférieure, comme c'est le cas des fibres de polypropylènes.

Johnson et Coleman [27] donnent une formule qui permet de calculer la contrainte en traction du béton de fibres σ_c en fonction de celle du béton sans fibre σ_m .

$$\sigma_c = \sigma_m [1 + 0,015 V_f (l/d)^{3/2}]$$

V_f : étant le pourcentage, en volume des fibres

l/d : étant l'élanement.

En fait, la traction dépend également d'autres facteurs et en particulier du module de la fibre et de celui du béton. En règle générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement du dosage des fibres, leur longueur, de leur orientation par rapport au sens des efforts, de leur forme (droite, à crochets, emboutis aux extrémités).et comme nous l'avons dit ci-dessus de leur résistance et de leur module.

La figure 2.3. montre l'influence de la longueur des fibres de verre et de leur pourcentage en volume (d'après Majumdar) [27]. On remarque qu'avec ce matériau les améliorations sont très importantes .

Toutefois, il faut signaler qu'un accroissement du volume des fibres peut être la cause d'une mauvaise compacité du béton et donc d'une diminution de ses caractéristiques mécaniques.

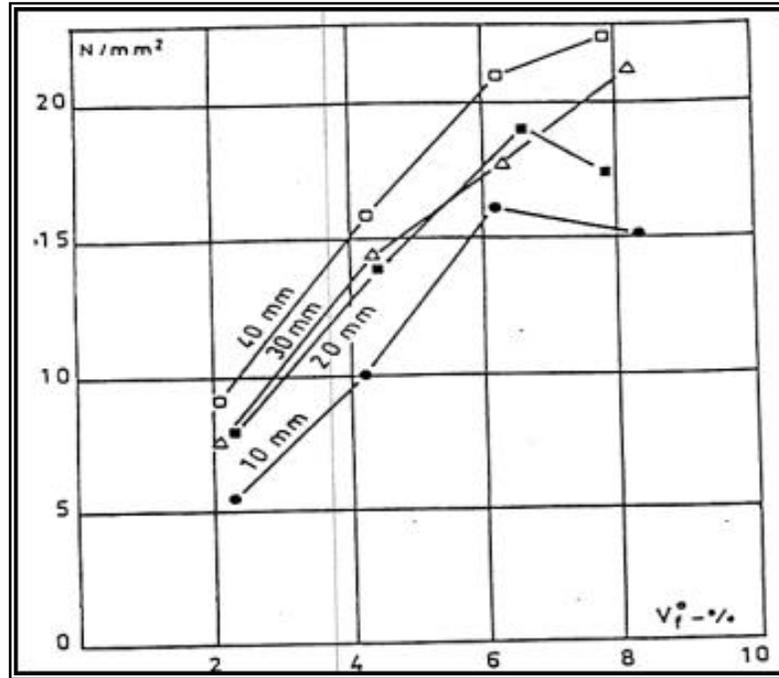


Fig. 2.3. Résistance à la traction du ciment armé de fibres de verre en fonction du pourcentage en volume de fibres V_f et pour différentes longueurs de fibres (d'après Majumdar)

D'après HOUARI (1993) [26], la présence des fibres métalliques améliore la résistance à la traction. Cette amélioration n'est pas très importante et l'allure des courbes se rapproche de celle des courbes contrainte-déformation du béton comprimé.

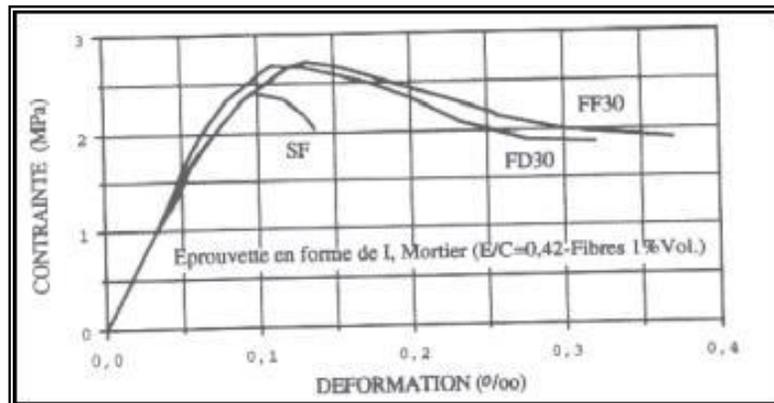


Fig.2.4.Courbes " contrainte-déformation" en traction [Houari]

2.1.3. flexion :

L'augmentation de la résistance en flexion du béton de fibre est beaucoup plus importante, elle peut atteindre 200 % et plus. Elle est due à la déformabilité du matériau. Il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion.

Swamy [15] a rassemblé les résultats de divers expérimentateurs et propose une formule de régression qui donne la résistance à la flexion du béton de fibre σ_c fonction de celle du béton sans fibre σ_m :

$$\sigma_c = 0,97 \sigma_m(1-V_f) + 3,41 V_f l/d$$

avec :

V_f : étant le pourcentage, en volume des fibres

l/d : étant l'élanement des fibres (fig.2.5)

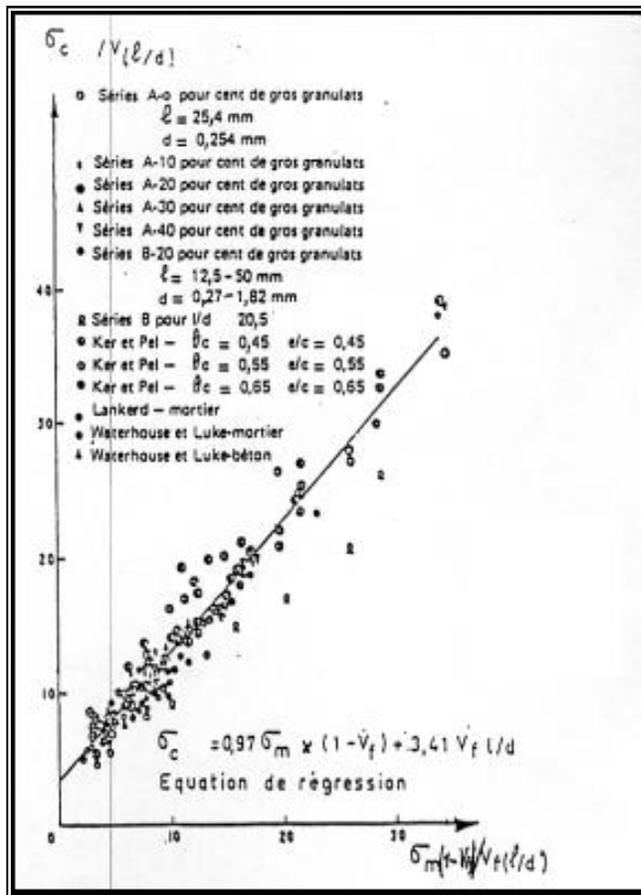


Fig. 2.5 .Equation (A) confrontée avec les résultats d'essais (d'après R.N.Swamy)

Dehousse [13] indique une tendance générale du béton armé de fibres lisses (fig.2.6)

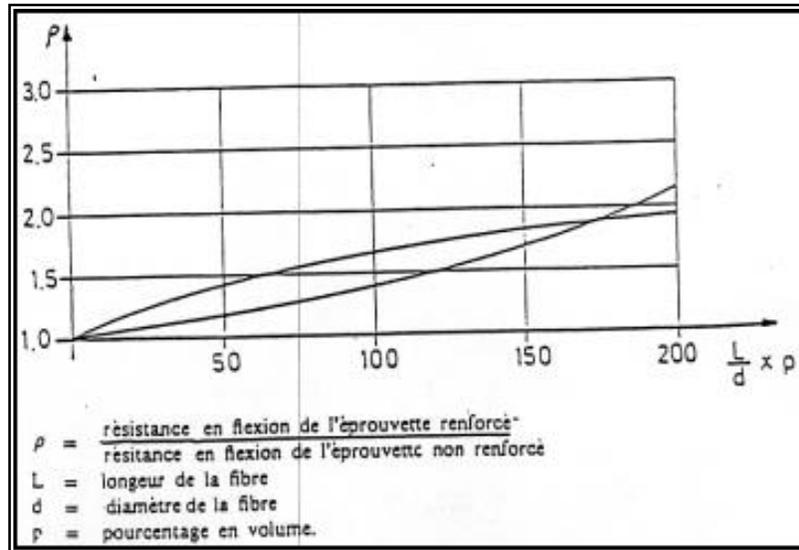


Fig.2.6. Augmentation de résistance en flexion en fonction de l'élancement

Ces courbes sont en fait des moyennes d'un nuage de points très dispersés, car comme la résistance en traction, la flexion varie avec la géométrie de la fibre, son orientation et son adhérence à la matrice. Avec des fibres à crochets, le même auteur fournit des résultats encore plus encourageants fig.2.7. ces résultats sont obtenus aussi bien pour des éprouvettes fléchies, que pour essais de fendage sur éprouvettes creuses.

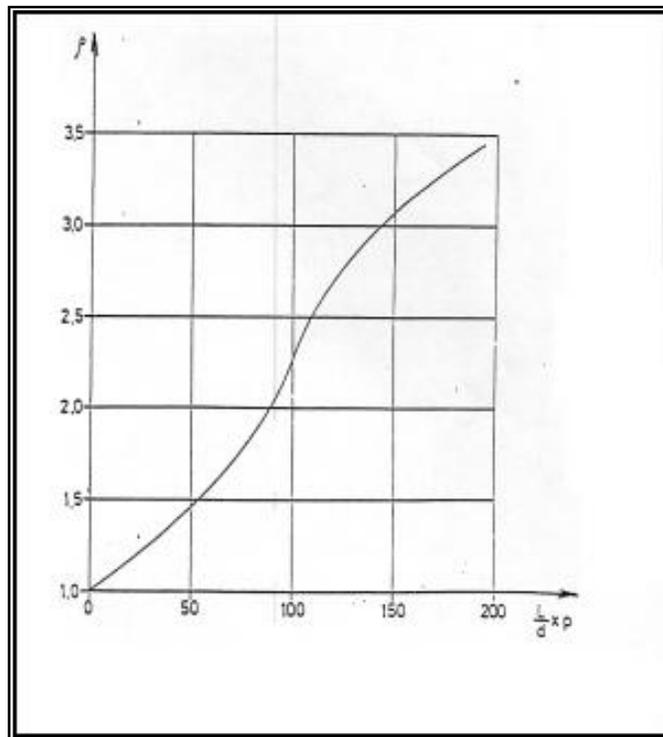


Fig. 2.7. Augmentation de la résistance en flexion pour des fibres d'acier à crochets, en fonction de l'élancement et du pourcentage de fibres

$$\rho = \frac{\text{résistance en flexion de l'éprouvette renforcée}}{\text{résistance en flexion de l'éprouvette non renforcée}}$$

l = longueur de la fibre

d = diamètre de la fibre

ρ = pourcentage en volume.

Avec des fibres de verre Majumdar [27] a trouvé des résultats intéressants (fig.2.7), du même ordre que ceux de la fig.b en flexion

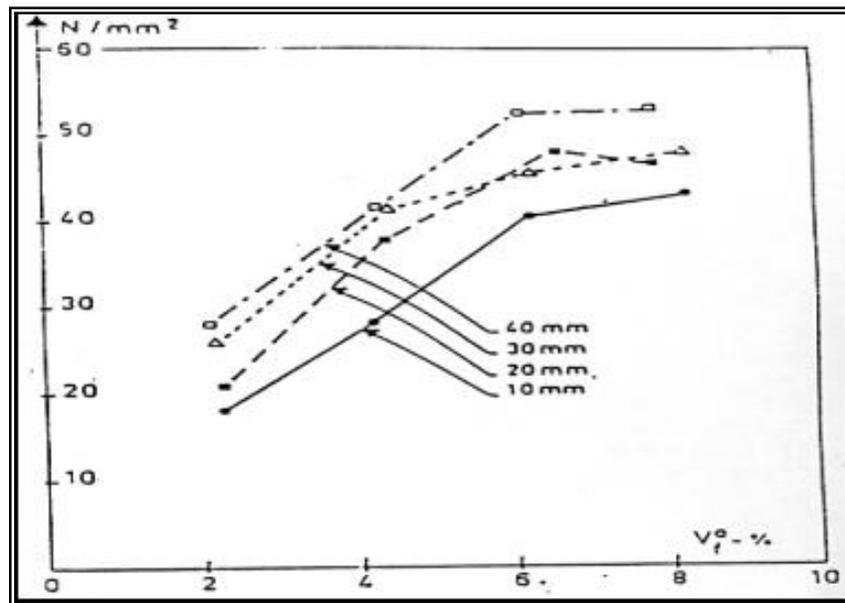


Fig.2.7.b- Résistance à la flexion du ciment armé de fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres.

Avec les fibres de polypropylène, Dardare [10] a obtenu des augmentations de résistance en flexion beaucoup plus faible est même des diminutions lorsque le pourcentage dépassait 1 % , (fig.2 .8). Il explique ces diminutions par des mauvaises homogénéités du béton, dues à des valeurs E/C trop élevées. Ainsi, le pourcentage de 1 % en volume doit être un maximum à ne pas dépasser.

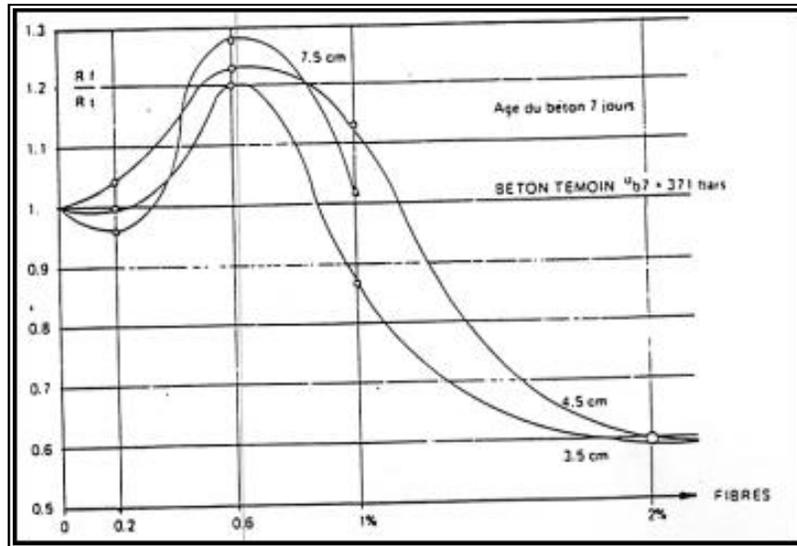


Fig.2.8.- Influence de la longueur et du pourcentage de fibres sur la résistance à la traction flexion du béton renforcé.

Avec les fibres métalliques (1% en volume), HOUARI (1993) [26] trouve que la présence des fibres augmente fortement la résistance à la flexion. Cette augmentation est de l'ordre de 26% à 189% suivant le type de béton testé.

Les flèches correspondant aux charges maximales sont encore plus fortement augmentées puisqu'elles peuvent atteindre 7 fois celles des bétons sans fibres. HOUARI, conclut dans des travaux que les fibres modifient le mécanisme d'endommagement sous sollicitation statique, la première fissuration est retardée, de plus les fibres jouent un rôle de couture sur les fissures ce qui augmente la charge maximale de ruine et lorsque la longueur des fibres augmente, les valeurs des forces relatives à la charge ultime sont plus élevées, ceci est lié à la longueur des fibres (ancrages améliorés), mais aussi aux orientations plus favorables des fibres longues.

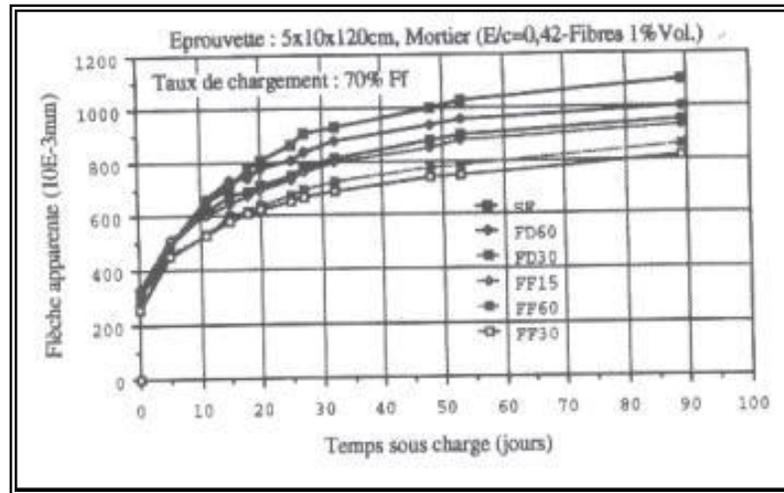


Fig.2.9.Evaluation de la flèche en fonction du temps Pour différents types de mortier sous un taux de chargement de $70\% F_f$ [Houari.1993]

Les fibres peuvent améliorer la ténacité, la résistance en flexion ou les deux, et sont choisies en fonction de leur disponibilité, de leur coût et de leurs propriétés. Par exemple, les fibres de polypropylène augmentent nettement la ténacité du béton mais ont peu d'effet sur sa résistance en traction. Par contre, les mélanges de fibres de polypropylène et de verre donnent un béton de grande résistance en flexion et très tenace (voir les tableaux 2.1 et 2.2) [44].

Tableau 2.1. Ténacité des matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés.[44]

Matériau composite Volume de fibres en pourcentage (%) Ténacité p/r aux produits non renforcés

BÉTON

acier 0,5 2,5-4,0

acier 1,0 4,0-5,5

acier 1,5 10-25

verre 1,0 1,7-2,0

polypropylène 0,5 1,5-2,0

polypropylène 1,0 2,0-3,5

polypropylène 1,5 3,5-15,0

nylon 1,0 1,5-1,7

MORTIER

acier 1,3 15,0

amiante 3-10 1,0-1,5

PÂTE DE CIMENT

verre 4,5 2,0-3,0

particules de mica 2,0-3,0 3,0-3,5

*** Ces valeurs sont des valeurs types seulement et peuvent varier selon la méthode d'essai, le procédé ou le mélange.**

Tableau 2.2. Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés.[44]

Matériau composite	Volume de fibres (en %)	Résistance en flexion p/r aux produits non renforcés
BÉTON		
acier	1-2	2,0
verre	1-2	2,5-3,5
MORTIER		
acier	1,3	1,5-1,7
verre	2	1,4-2,3
amiante	3-10	2,0-4,0
PÂTE DE CIMENT		
verre	4,5	1,7-2,0
particules de mica	2-4	2-2,5
polypropylène	1-2	1,0
<p>*Ces valeurs sont des valeurs types seulement et peuvent varier selon la méthode d'essai, le procédé et le mélange.</p>		

2.1.4. courbe effort-déformation :

Les figures (fig.2.10, fig.2.11, et fig.2.12) donnent trois exemples de courbes effort déformation en compression, traction et flexion [41]. On constate que le début des courbes est peu influencé par les fibres (zone élastique). En suite, il y a une très faible augmentation pour la compression, une légère pour la traction et une importante pour la flexion. Sur les parties descendantes, par contre, les différences sont nettes ; les courbes décroissant plus lentement avec les fibres. Les déformations à la rupture sont augmentées et la fragilité diminuée.

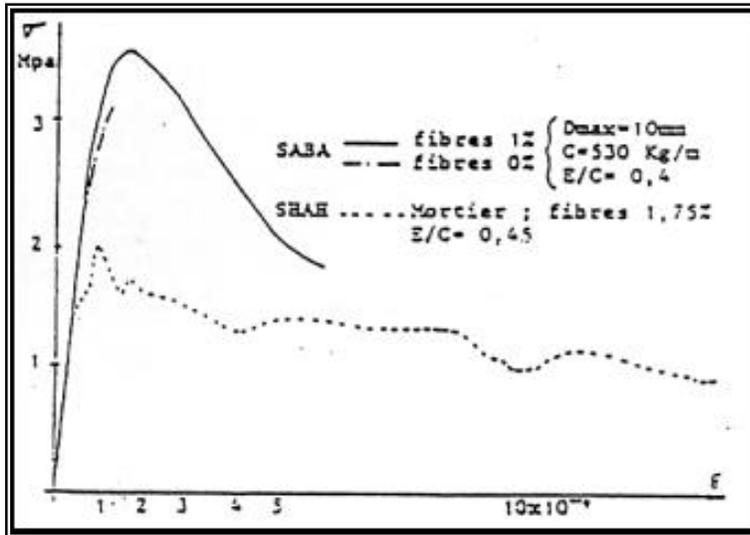


Fig.2.10. Courbe effort- déformation en compression

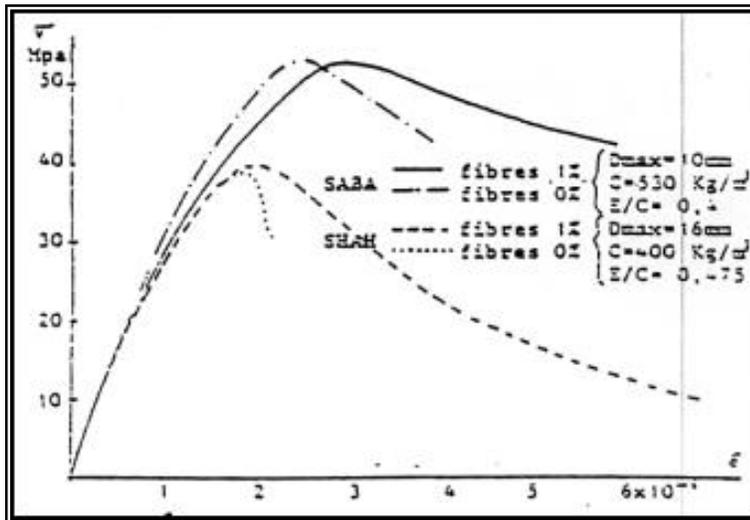


Fig.2.11.Courbes effort- déformation en traction

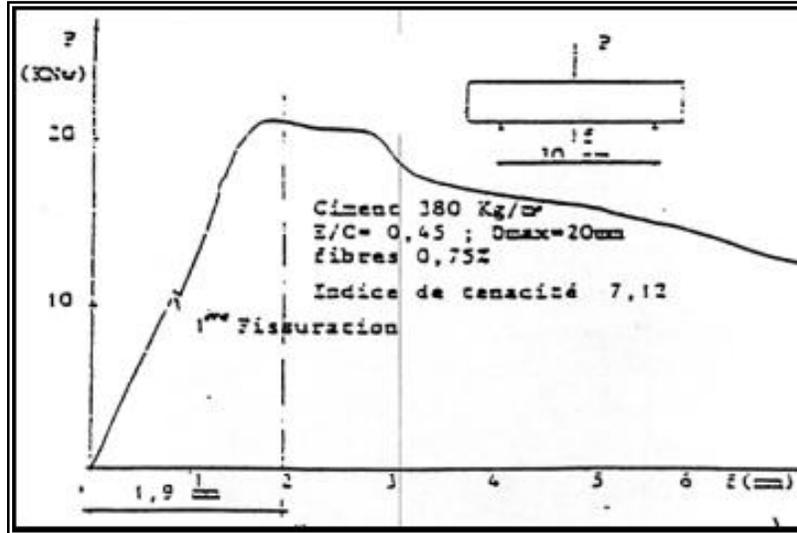


Fig.2.12.Courbe charge –flèche (flexion)

Swamy [27] a également étudié les diagrammes charges-flèche et contrainte-flèche en flexion centrée. Les courbes sont reportées sur les figures (fig.2.13, fig.2.14). Dans l'expérience montrée sur la première figure les fibres sont métalliques, sur la deuxième, les fibres sont en verre.

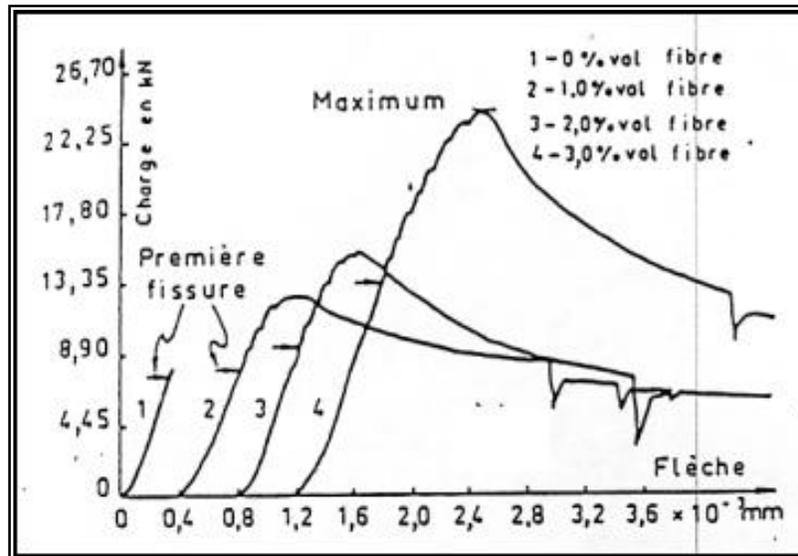


Fig.2.13.Flèche en fonction de la charge pour les bétons armés de fibres d'acier de différentes compositions relevées sur éprouvettes 10cm x10cm x50cm chargées au tiers de la longueur ($V_f = 0$ à 3%) (d'après R.N.Swamy)

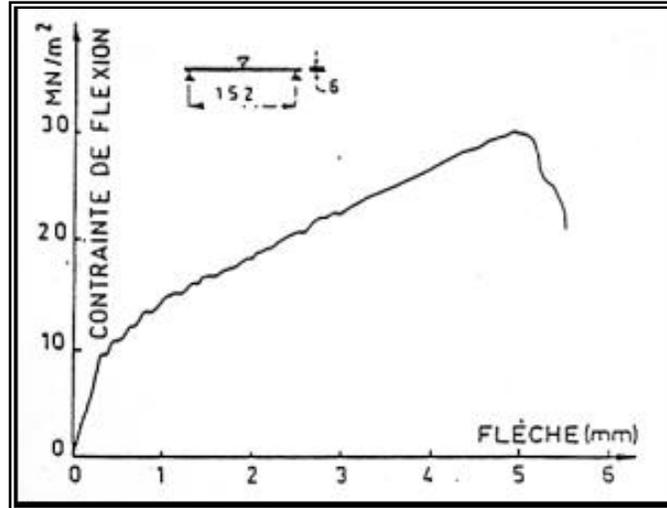


Fig.2.14.Flèche en fonction de la contrainte de flexion pour un ciment armé de fibres de verre (d'après R.N. Swamy)

HOUARI [26] a également mené une campagne d'essais de flexion, avec comme objectif d'étude de l'influence de la longueur et de la nature des fibres sur la résistance et le comportement en flexion. Les courbes effort-déplacement obtenues lors des essais de flexion quatre points font apparaître :

- des résistances à la flexion notablement améliorées ;
- une énergie à la rupture 20 fois supérieure à celle du béton sans fibres ;
- un comportement différent à la fissuration entraînant un retard notable à la fissuration franche.

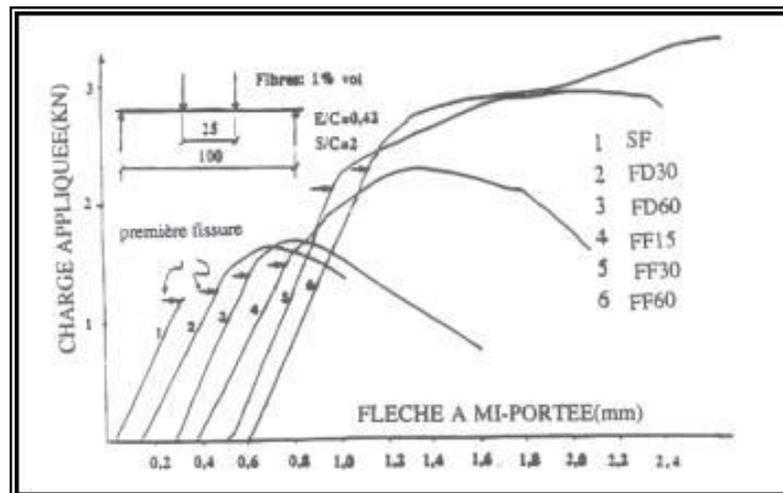


Fig.2.15.Courbes " charge-flèche " en flexion [Houari]

2.1.5. Résistance au choc :

Elle peut être déterminée de différentes façons : avec des appareils de type CHARPY[27], suivant la méthode *ASTM D1557* recommandée par le comité ACI 544, ou suivant la méthode CEBTP [15]. D'une façon générale, les améliorations apportées par les fibres sont nettes. Avec la méthode ASTM, le nombre de coups pour atteindre la première fissure est multiplié par 2 ou 3 et celui pour atteindre la rupture multiplié jusqu'à 10 [15]. avec les appareils du type CHERPY, les améliorations peuvent atteindre 1000 % [41]. par contre , au CEBTP les essais de KAVYRCHINE et ASTRUC [27] ont montré que l'énergie nécessaire pour déduire une poutre par rupture en flexion après l'impact, est inférieure dans le cas du béton de fibres, mais la résistance à la destruction locale est meilleure avec les fibres.

D'après HOUARI [26], sous l'action de sollicitation dynamiques, les structures en béton de fibres présentent souvent un très bon comportement, en augmentant les charges de rupture, en modifiant parfois les schémas de fissuration. Certains auteurs (Johston, Kavyrchine, Reinhardt, Zayat, Tatro, Ramakrahnan, Razani) vont jusqu'à comparer le renforcement par des fibres au renforcement par armatures traditionnelles.

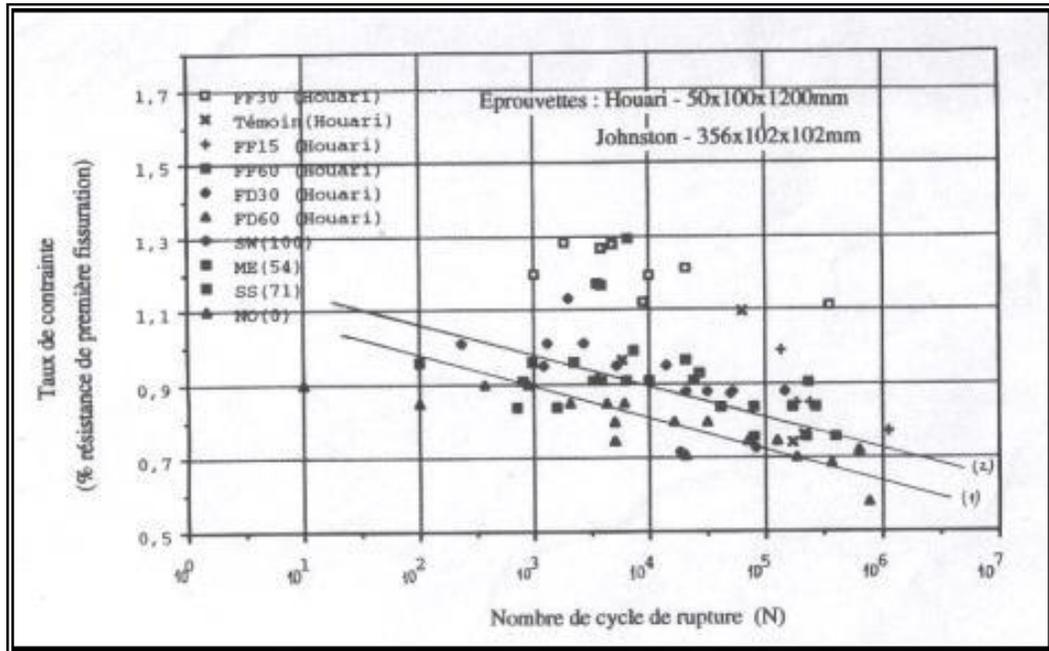


Fig.2.16.Courbes contrainte-charge dynamique[Houari]

2.1.6. Résistance à l'usure :

Johnson [28] signale que la résistance à l'abrasion n'est pas sensiblement augmentée. D'autres auteurs affirment qu'après élimination de la laitance superficielle et mise à jour des fibres, la résistance est améliorée d'environ 15 % .

2.1.7. Agents extérieurs :

La résistance du béton renforcé de fibres aux attaques du milieu ambiant, par exemple à l'action du gel, dépend de la qualité de la matrice et ne devrait pas être très différente de celle d'un béton ordinaire. Les fibres peuvent cependant réduire les dommages dus au gel car elles empêchent la fissuration. Pour obtenir une bonne résistance au gel et à la corrosion par le sel, il faut aussi s'assurer qu'il y a suffisamment d'air entraîné dans le mélange.

Johnson [28] rapporte que les fibres ne remplacent pas l'air entraîné et que le béton de fibres avec air occlu résiste aussi bien au gel qu'un béton sans fibre avec air occlu, résistait 2 à 3 fois plus que le même béton sans fibres.

Les attaques par les acides et les sulfates et les réactions granulats-alcalis ne sont généralement pas aggravées par la présence de fibres, à moins qu'il y ait une réaction chimique entre les fibres et le béton.

D'après HOUARI [26], des essais à long-terme, sur la durabilité des bétons renforcés avec des fibres métalliques au laboratoire de Batelle, 1978, montrent une corrosion minimale sur les fibres qui au contraire n'affecte pas la résistance à la flexion après 7 ans d'exposition : des conclusions similaires sont présentées par Mangat 1987.

2.1.8. Retrait :

Il ne semble pas que les fibres modifient le retrait du béton, par contre, elles s'opposent à la fissuration provoquée par ce phénomène. Au LCPC, Paillere et Serrand [15] ont fait des essais de fissuration sur un banc linéaire, qui consistent à maintenir constante la longueur d'une éprouvette de béton en lui imposant en permanence les efforts appropriés pour empêcher toute déformation. la figure .2.17. donne les résultats avec un béton léger : il y a une amélioration importante par les fibres, le béton léger avec fibres ne fissure qu'après 168 heures, au lieu de 38 heures pour le témoin. Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres.

Le retrait du béton peut être diminué de 35 p. 100 ou moins si l'on ajoute 1,5 p. 100 de fibres par volume.

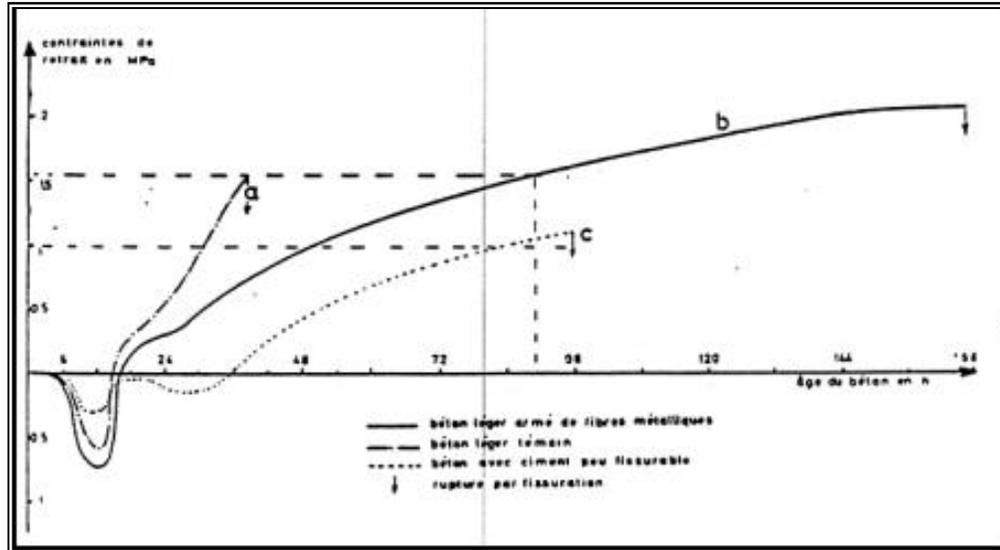


Fig.2.17 Evaluation des contraintes retrait en fonction de l'âge du béton.

Les résultats obtenus par HOUARI 1993[26], confirment ceux déjà obtenus par des études antérieures sur l'influence des fibres d'acier sur le retrait (Edington 1978, El Hachem 1990...) à savoir que les déformations e retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal. Cette réduction est affectée par plusieurs paramètres tels que :

- la durée de séchage ;
- la forme et la quantité de fibres.

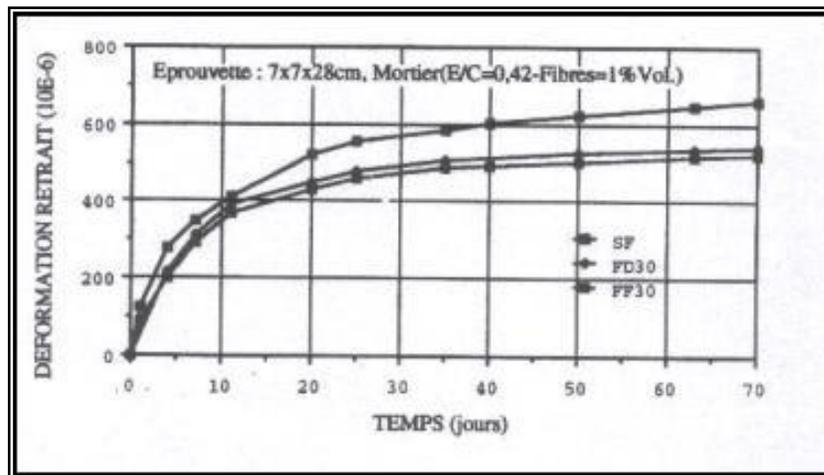


Fig.2.18.Retrait libre à partir de 24 heures sur différents mortiers [Houari]

2.1.9. Fluage :

Il y a très peu d'information sur le fluage du béton de fibres. Au LCPC [41], des essais ont montré un comportement tout à fait semblable à ceux d'un béton sans fibre. Johnston [29] rapporte les résultats d'une étude de fluage en flexion qui montre une diminution des flèches.

En général, les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 % de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20 %.

HOUARI [26], regroupe un ensemble de résultats expérimentaux sur le fluage du composite et de la matrice sous sollicitation de traction et de flexion. La réponse à plusieurs taux de chargement a été étudiée. HOUARI confirme que le fluage du béton de fibres en traction reste du même ordre de grandeur que le fluage du béton témoin sous un même niveau de chargement. La présence des fibres influe peu sur la déformation à long terme, sous sollicitation uniaxiale.

L'étude du fluage en flexion, toujours d'après HOUARI, d'une poutre en béton de fibres permet de ressortir les conclusions suivantes :

- le type de fibres est un paramètre important ;
- l'élanement des fibres a un rôle secondaire ;
- les bétons de fibres ont une flèche de fluage égale et souvent inférieure à celle de la matrice, pour un même taux de chargement.

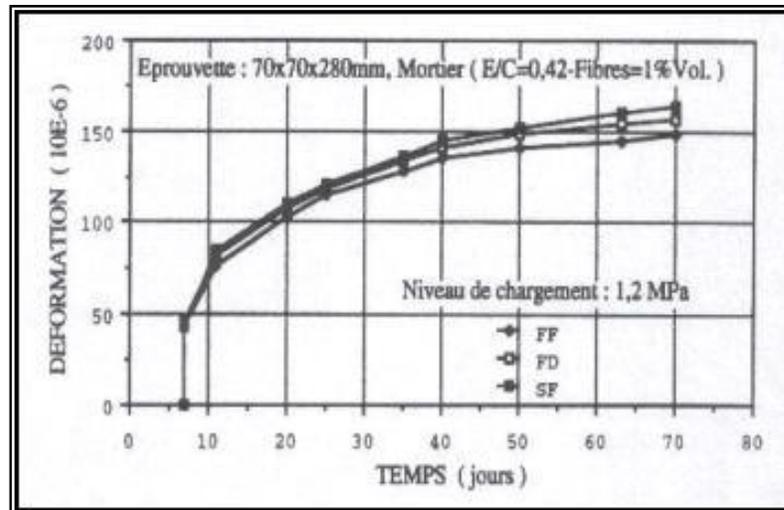


Fig.2.19.Fluage apparent en traction pour mortier renforcé de fibres sous une contrainte de 1.2 Mpa [Houari]

2.1.10. Résistance à la fatigue :

Le Comité ACI 544 [3] rapporte qu'il y a une augmentation significative de la résistance à la fatigue avec le béton de fibres. Les essais effectués par Dehousse vont également dans le même sens.

HOUARI [24] rapporte dans des travaux menés à travers une étude sur l'influence des fibres métalliques sur la teneur en fatigue, il note d'abord que la présence des fibres améliore la teneur à la fatigue de la matrice, ainsi que la fatigue modifie le seuil de fissuration obtenu en statique. De plus la présence des fibres permet d'accroître la teneur sous chargement cyclique, en prolongeant la vie de l'éprouvette après fissuration, et que le meilleur élanement des fibres ne donne pas automatiquement le meilleur résultat.

2.1.11. conductivité électrique du béton de fibres métalliques :

Paillere et Serrano [15] ont étudié la conductivité électrique du béton avec des pourcentages de fibres d'acier variant entre 0 et 1.5 % en volume. Ils ont montré qu'il était possible d'utiliser cette propriété pour accélérer le durcissement du béton par effet Joule et également pour chauffer le béton durci (déverglaçage des chaussées, d'ouvrages d'art, des pistes d'aérodromes, chauffage de bâtiments)

Caractéristiques mécaniques et physiques des
fibres [3]

caractéristique mécanique et physiques des fibres									
Fibres	Diamètre en mm	Longueur en mm	Densité	Résistance en traction en MPa	Module d'Young en MPa	Allongement à la rupture en %	Coefficient de dilatation par degré	Résistance au feu. Température max. °C	Prix F par Kg
Acier	5 à 500	20 à 80	7.8	1000 à 3000	200000	3à4	11.10^{-6}	1500	8
Fonte (ruban)	36X2000 de section	50à60	7.8	2500	140000	1		1500	10à15
Verre	5 à 20	40à70	2.6	1500 à 3000	80000	2à3.5	9.10^{-6}	800	20
Polypropylène	10à200	25à75	0.9	400 à 750	5000à10000	15à25	90.10^{-6}	150	20
Polyester			1.4	700 à 850	8000	11à13			15à20
Amiante	0.02à20	5	2.5à3.4	3000	100000 200000	2à3		1500	4à5
Carbone	5à9	variable	1.7à2	2000 3000	250000 400000	0.5à1.5	10^{-6}	400à1500	300à 1300
Kevlar 49	10		1.45	3600	130000	2			200
Sisal	10à50		1.50	800		3			

Pour que les fibres se mélangent bien dans le béton, il faut limiter l'élançement (l/d) des fibres et leur teneur en volume V_f . la limite de faisabilité est approximativement :

$$V_f \times l/d < 3$$

2.2. Applications du béton armé de fibres :

2.2.1. Introduction :

Les propriétés mécaniques du béton armé de fibres dépendent de nombreux paramètres. qui sont les suivants :

- des conditions de mise en œuvre : espacement, orientation distribution des fibres dans le béton ;
- des paramètres liés aux fibres : géométrie et nature, caractéristiques mécaniques, facteur de forme l/d , pourcentage V_f ;

Les propriétés mécaniques du BAF présentent, par rapport au BA traditionnel, des améliorations suivantes :

- 1- plus grande ductilité ;
- 2- meilleure résistance à la traction et au cisaillement ;
- 3- meilleure résistance à l'abrasion ;
- 4- meilleure résistance aux impacts, aux chocs, à la fatigue ;
- 5- limitation de l'ouverture des fissures ;
- 6- quant à la résistance à la compression et à la flexion, l'amélioration est peu sensible ;
- 7- aucune amélioration sur le comportement au gel et au dégel.

2.2.2. diverses applications constructives : [15]

Dans ce qui suit , l'utilisation du BAF est examinée sous deux aspects :

- application aux éléments constructifs : essais de détermination des caractéristiques mécaniques de fissuration, résistance à la compression, au cisaillement, à la flexion, à la torsion, au cisaillement, à la flexion, à la torsion, au choc, à l'usure, et résistance à la fatigue ;
- application aux éléments structuraux : plaque de couverture, sols industriels, revêtement, façade pistes d'aérodromes etc....

Domaines d'applications

L'utilisation du BAF permet d'exploiter la plus grande résistance à la traction et à la fatigue du matériau. Une distribution uniforme et une orientation adéquate des fibres dans la matrice béton lui confèrent des propriétés isotropiques, qui ne peuvent être obtenues en aucun cas pour le BA traditionnel .

Les nombreuses innovations de la technologie des bétons renforcés de fibres ont permis d'étendre considérablement la gamme des applications (tableau 2.3).

Tableau 2.3 . Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment[45]*

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton, enduit pour blocs de béton.
Acier	Éléments de toiture en béton cellulaire, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produits réfractaires, tuyaux en béton, pistes d'atterrissage, réservoirs sous pression, structures résistantes aux explosions, revêtements de tunnel, coques de bateaux.
Polypropylène, nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marinas, matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toiture plates et ondulées, revêtements de mur.
Carbone	Éléments ondulés pour la construction des planchers, structures de membrane simple ou double courbure, coques de bateaux, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Remplacent partiellement l'amiante dans les panneaux à base de ciment, les tuyaux en béton ; matériaux de réparation.

***La combinaison de plusieurs types de fibres peut être utilisée pour des besoins particuliers.**

2.2.2.1. Exemples de réalisations en béton de fibres d'acier :

Il n'existe apparemment pas de difficultés majeures dans la mise en œuvre de bétons armés de fibres d'acier obtenus par malaxage. Ils peuvent être vibrés, damés centrifugés (Burnett et al) projetés (Tunnels et Tunneling), filés et même pompés (R.A.Kaden). Il est évident que les propriétés du produit obtenu dépendront essentiellement de la compacité du produit en place [15].

Des applications pratiques du béton armé de fibres d'acier ont été faites, surtout en tant que couche d'usure pour la répartition des revêtements routiers, pistes d'aérodrome, tabliers de ponts. Sa résistance aux chocs et sa déformabilité l'y prédestinent.

- **Chaussées de route et pistes d'aérodrome :** [27]

Grâce à une plus grande résistance à la fissuration et à la fatigue du béton de fibres, l'épaisseur d'une chaussée en BAF peut être la moitié environ de celle d'une chaussée en béton traditionnel, dans les mêmes conditions normales de charge

Quelques exemples : construction de 52700 m² de chaussées de parking de l'aéroport de Las Vegas (Nevada) en BAF, avec 2 % de fibres en acier, épaisseur des chaussées 15 cm (alors qu'elle devrait être égale à 37.5 cm pour le BA traditionnel), trafics des DC 8, DC10 et Boeing 747 ;

33400 m² de dalle flottante sur piste existante de la station aéronavale de Fallon(Nevada), 2 % de fibres acier, épaisseur 12.7 cm ;

Pistes de l'aéroport international Tampa, USA : 1.5 % de fibres , épaisseur des pistes 10 cm et 15 cm, trafic des Boeing 727.

Les premières applications du BAF à la construction des chaussées de routes et de pistes d'aérodrome aux Etats-Unis datent de 1971 .

Les fibres proches de la surface, pour lesquelles la corrosion serait à craindre, se sont avérées orientées parallèlement à la surface et vite détachées par l'usure et l'érosion.

Pour ce genre d'application, le béton armé de fibres d'acier s'avère être un matériau bien à sa place. Son utilisation augmentera certainement en France, vu les essais promoteurs du laboratoire des Ponts et Chaussées .

Sa résistance aux chocs rend le béton armé de fibres intéressant pour la fabrication des pieux, de tel pieux, préfabriqués en segments courts et armés de fibres de polypropylène, ont été mis en œuvre avec succès en Angleterre

L'augmentation des prix des produits noirs qui sont habituellement employés pour la réparation des revêtements béton, pèse en faveur du béton armé de fibres. Pour la sollicitation

complexe d'un revêtement routier, le béton armé de fibres s'est avéré meilleur que n'aurait laissé supposer sa résistance à la résistance à la flexion seule (C.D. Johnston.) . une application relativement importante dans ce domaine, faite aux U.S.A . (2426 m³) en 1974, s'est avérée comme économiquement compétitive (G.R. Williamson.) [27]

A .Le domaine du bâtiment :[38]

• Les dallages industriels :

Avant cette utilisation des BFM, il existait deux familles de dallages industriels : les dallages non armés et les dallages en béton armé.

Les différences principales qui résident entre ces deux familles sont, d'une part, l'épaisseur du dallage qui est moindre quand le dallage est armé et , d'autre part, l'espacement des joints entre les dalles constitutive du dallage, qui sont plus nombreux, et donc moins espacés, quand le dallage est non armé.

L'arrivée des BFM sur le marché des dallages industriels est la conséquence de certaines difficultés rencontrées par la solution béton armé. En effet, pour que les armatures jouent le rôle qui leur a été dévolu, c'est-à-dire la maîtrise de la fissuration générée par les chargements mécaniques, et par le retrait empêché, il est indispensable que celles-ci soient correctement disposées dans l'épaisseur du dallage. Or ce n'est rarement le cas, ceci pour trois raisons principales :

- la concurrence étant acharnée, les prix sont << tirés>> vertigineusement vers le bas par conséquent, placer correctement les armatures nécessite de prendre le temps de le faire et donc accroît le coût de fabrication d'un dallage ;
- les dallagistes sont généralement de toutes petites entreprises (elles sont nombreuses, ce qui explique le fort environnement concurrentiel) à faible niveau de technicité, ce qui se traduit par une main- d'œuvre pas toujours bien formée et consciencieuse ;
- la technique actuelle de fabrication des dallages industriels oblige les ouvriers à marcher sur les armatures lors du coulage, ce qui constitue une gêne (donc est pénalisant en terme de temps), et contribue à leur déplacement, si par miracle elles étaient, initialement, correctement positionnées.

L'argument mis en avant par les tenants des BFM est donc que, d'une part, il est plus facile, techniquement, de fabriquer un dallage en BFM qu'un dallage en béton armé et que, d'autre part, dans le cas des fibres, on est sûr d'en avoir dans toute l'épaisseur du dallage, ce qui est mieux que le treillis soudé, posé, habituellement, sur le sol, donc inutile.

De plus, le dallage industriel en BFM paraît plus intéressant que le dallage non armé, car l'ajout de fibres permet de diminuer l'épaisseur et le nombre de joints du dallage. Ce dernier point est de la plus grande importance quand on sait que la plus part des sinistres survenant dans les dallages industriels sont liés à l'existence de ces joints.

- **bétons projetés fibrés de réparation :**

La corrosion des armatures de béton armé est à l'origine des pathologies les plus fréquentes pour les structures en béton armé. En effet, cette corrosion, en plus de réduire la capacité de renforcement des armatures, peut conduire à l'éclatement du béton d'enrobage. On assiste alors à une accélération de la corrosion des armatures qui ne sont plus protégées ce qui peut conduire à une diminution rapide de la capacité portante de la structure. Il faut donc réparer.

La technique la plus utilisée, et la plus performante, pour reconstituer le béton d'enrobage consiste à utiliser du béton projeté (la projection par voie sèche est le plus souvent utilisée). Un des problèmes qui se pose, alors, est le problème du retrait empêché du béton projeté par le « vieux béton » de la structure. Ce retrait empêché peut, dans certains cas, générer des contraintes de traction importantes dans la couche de réparation (béton projeté) et la fissurer de manière conséquente. La réparation ne remplit plus alors son rôle de protection des armatures vis-à-vis de la corrosion.

L'utilisation de BFM projeté est alors une solution intéressante, car les fibres peuvent maîtriser cette fissuration de retrait empêché, de telle manière que les fissures restent suffisamment fines pour ne pas constituer un facteur de corrosion des armatures nouvelles ou d'aggravation de la corrosion des armatures déjà corrodées.

- **Les dallages industriels sans joints :**

Pour réaliser un dallage industriel en BFM sans joint dans le quel on est sûr de ne pas avoir de fissures dont l'ouverture excède 300 μm , il est indispensable que le comportement post fissuration en traction de ce BFM soit durcissant, ou tout du moins parfaitement plastique, et ceci durant toute l'étape de durcissement de la matrice.

On peut y parvenir aisément avec des bétons et des fibres métalliques classiques, il faut pour cela choisir les dimensions de la fibre (longueur et diamètre), et le pourcentage incorporé, en fonction de la compacité (et donc de la résistance en compression) de la matrice.

Ainsi, comme exemple, un BFM ayant une résistance caractéristique en compression de 20 Mpa, contenant 100 kg/m^3 de fibres métalliques tréfilées (munies de crochets à ses

extrémités) de 60 mm de longueur, et 0.8 mm de diamètre, a un comportement en traction directe nous laisse supposer qu'un dosage de 80 kg/m^3 de fibres dans une matrice de même compacité pourrait conduire à un BFM ayant un comportement postfissuration en traction au minimum parfaitement plastique.

Il est clair que l'analyse technico-économique d'un dallage industriel sans joint reste à faire, et qu'elle n'est pas aisée. Nous pensons de même que, ce nouveau développement verra le jour, si l'on commence par des dallages industriels quelque peu « exceptionnels » en terme de superficie et d'utilisation pour lesquels il y a une volonté politique forte des maîtres d'ouvrage.

- **Les pieu forés à la tarière creuse en zone sismique :**

Il s'agit, dans le cas présent, d'une extension du domaine d'utilisation actuelle des pieux en BFM. En effet, ces pieux sont autorisés uniquement dans des zones non sismiques. Or, au regard de l'intérêt technico-économique de cette application des BFM, certaines personnes souhaitent l'étendre à des sites sismiquement plus exposés.

Les règles de dimensionnement imposant que la qualité d'armatures dans les pieux en béton armé soit plus importante en zone non sismique, les « promoteurs » des pieux en BFM désirent augmenter le pourcentage de fibres incorporées tel que le coût reste équivalent à la solution béton armé. Des dosages de l'ordre de 50 kg/m^3 sont ainsi proposés. Il reste maintenant à réaliser une campagne d'essais sur des pieux en BFM (contenant 50 kg/m de fibres) à l'échelle 1, en leur appliquant des sollicitations représentative d'un séisme. Si les résultats sont concluants, rien ne s'opposerait, objectivement, à l'utilisation des pieux en BFM forés à la tarière creuse dans les zone sismiques.

- **Les voiles extérieurs de bâtiment en béton banché :**

Ces voiles extérieurs de bâtiment sont, traditionnellement, en béton armé. Le taux d'armatures utilisés est généralement peu important, en contrepartie, leur mise en œuvre n'est pas toujours très simple, car il est nécessaire de positionner correctement la cage d'armature à l'intérieur du coffrage constitué de banches (d'où le terme béton banché).

Ainsi si l'on considère la main d'œuvre nécessaire pour la fabrication des cages d'armature, leur mise en place, ainsi que leur gestion dans le cadre d'un chantier (notamment leur stockage), il nous paraît tout à fait envisageable de remplacer toutes les armatures par des fibres métalliques, à condition que l'épaisseur des parois n'excède pas 40 cm.

Il faut également souligner que, dans le cas des parois en béton armé, l'épaisseur de béton relative à l'enrobage des aciers, n'est pas mécaniquement nécessaire, mais a pour rôle principal de protéger ces aciers de la corrosion. Dans le cas des BFM, cette épaisseur n'est pas utile, ce qui devrait permettre de concevoir des parois plus minces. Mais cela présuppose que les fibres métalliques proches de la surface ne provoquent pas des salissures de rouille dues à une corrosion superficielle de ces fibres.

La préfabrication :

- **Les poutres en T inversé précontraintes**

Comme pour les poutres coulées en place, les poutres préfabriquées en BFM ne doivent pas avoir des hauteurs qui excèdent 40 cm.

En ce qui concerne les poutres en T inversé de plancher, en dehors de la précontrainte par fil adhérent, elles renferment un taux de cadres d'effort tranchant assez important, notamment au niveau de la jonction entre l'âme et le talon de la poutre où des contraintes de traction importantes y sont concentrées.

- Le remplacement de tous les aciers passifs par des fibres métalliques présenterait les mêmes avantages qui sont relatifs à la forme de la poutre, au béton précontraint ou, encore, à la préfabrication. Annexe 2.1

- **Les panneaux de façade et plus généralement les éléments minces :**

Les panneaux de façade en BFM entrent dans la catégorie des éléments minces, leur mise en avant étant liée au fait qu'ils constituent un développement industriel potentiel plus probable que d'autres.

Les concernant, on retrouve la même problématique que celle relative aux bétons banchés et exactement les mêmes avantages à utiliser les BFM en remplacement du béton armé. A ces avantages s'en ajoutent d'autres qui sont spécifiques, d'une part, d'utilisation des BFM dans des éléments minces et, d'autre part, de la préfabrication. Annexe 2.2

- **Les précadres de baie :**

Il y a peu de chose à dire sur cette application industrielle, qui fait partie des éléments préfabriqués de bâtiment peu sollicités. On retrouve la même problématique, ainsi que des avantages similaires à ceux relatifs aux poutres précontraintes et aux éléments minces, c'est-à-dire :

- préfabrication plus facile, plus rapide, utilisant moins de main d'œuvre que la solution béton armé ;
- gain de poids ;
- meilleur comportement vis-à-vis des épaufrures.

Comme pour les autres éléments préfabriqués, une étude technico-économique sérieuse reste à réaliser.

- **Les dalles alvéolées :**

Les dalles alvéolées sont généralement précontraintes par fil adhérent. Les dimensions de ces dalles font que les efforts tranchants sont très faibles dans ce type de dalle et, donc, qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des cadres d'effort tranchant. Les seules armatures présentes sont donc les fils de précontrainte.

Cette situation, c'est-à-dire l'absence de cadres d'effort tranchant, a permis de mettre au point deux méthodes de fabrication de ces dalles alvéolées basées, respectivement, sur la technique de l'extrusion et celle dite du filage.

Or, si on voulait utiliser des dalles alvéolées plus épaisses, et dans un domaine de portées plus importantes, soit dans le domaine des ouvrages d'art, ou elles ne sont pas actuellement autorisées (du fait de l'absence de renforcement vis-à-vis de l'effort tranchant), il serait impossible dans le cas de l'extrusion; ou très difficile dans le cas du filage, de mettre en œuvre des aciers passifs classiques.

La seule solution est alors d'utiliser un BFM, solution facile dans le cas du filage et peut-être plus délicate dans le cas de l'extrusion.

B.Le domaine des travaux publics :

- **Le béton projeté pour soutènement provisoire de tunnel**

Dans la construction d'un tunnel, deux types de technique sont principalement utilisés :

--- Le creusement du tunnel à l'aide d'un tunnelier qui s'accompagne, si nécessaire, de la mise en place de voussoirs préfabriqués en béton armé (c'est ce qui se fait actuellement) par l'intermédiaire de ce même tunnelier ;

--- Le creusement du tunnel à l'aide d'explosifs ou de pelles mécanique (suivant le terrain rencontré), suivi d'un soutènement provisoire à l'aide d'un béton projeté, soutènement provisoire qui a pour objectif de limiter les déformations liées à la décompression du sol, est

suivi, enfin, de la mise en place du revêtement définitif qui est coulé en place ou se présente sous la forme de voussoirs préfabriqués.

Dans la deuxième technique appelée « méthode autrichienne », le soutènement provisoire était, par le passé, réalisé uniquement en béton armé, les armatures étant en l'occurrence un simple treillis soudé. Or, le revêtement provisoire en béton armé présente un certain nombre de désavantages dont les deux plus importants sont les suivants :

-lorsque la paroi de l'excavation est très tortueuse, la mise en place correcte (c'est-à-dire à une certaine distance de la paroi) est délicate et consomme beaucoup de temps ;

-lorsqu'on projette le béton sur la paroi, sur laquelle est positionné un treillis soudé, celui-ci joue un rôle d'écran vis-à-vis du béton, ce qui conduit, assez souvent, à obtenir un béton de moins bonne qualité entre la paroi et le treillis soudé, au droit des armatures.

Ces deux inconvénients, non négligeables, ont contribué au développement des BFM projetés dans le domaine des revêtements provisoires de tunnel. En effet, d'une part, les fibres sont facilement et rapidement mises en place, puisqu'elles le sont en même temps que le béton et, d'autre part, elles n'occasionnent pas les problèmes d'effet d'écran rencontrés avec le treillis soudé.

- **Le béton projeté de réparation :**

La problématique et l'intérêt de l'utilisation des bétons projetés fibrés pour les réparations des structures dans le domaine des travaux publics sont les mêmes que ceux relatifs au domaine du bâtiment. Ils sont, par exemple, beaucoup utilisés pour la réfection des tunnels (SNCF,RATP).

- **Les pieux forés à la tarière creuse:**

La problématique et l'intérêt de l'utilisation, dans le domaine des travaux publics des BFM dans les pieux forés à la tarière creuse sont les mêmes que ceux relatifs au domaine du bâtiment. La seule différence réside dans le fait que, dans le domaine des travaux publics, les pieux sont soumis à des moments en tête plus importants que dans le domaine du bâtiment et que, par conséquent, des aciers passifs sont ajoutés au niveau de ces têtes. La solution qui consisterait à utiliser, pour tout un pieu, dosage en fibres susceptible de reprendre les efforts appliqués au niveau de sa tête, ne serait pas économiquement viable.

- **Le resurfaçage des chaussées, et les pistes aéroportuaires en béton :**

L'utilisation des BFM pour le resurfaçage des chaussées, et les pistes aéroportuaires procède de la même logique et a les mêmes objectifs que ceux relatifs l'utilisation des BFM dans le domaine de la réparation par béton projeté.

- **les parois clouées :**

Les parois clouées sont, généralement, utilisées pour le confortement de déblais. La technique classique est de projeter du béton sur des nappes de treillis soudé traditionnel, la paroi étant ancrée dans le sol à l'aide de tirants.

La mise en place des nappes de treillis soudé est longue et fastidieuse, si l'on désire en effectuer un positionnement correct vis-à-vis du remblai.

Le remplacement du treillis soudé par des fibres métalliques, projetées en même temps que le béton, paraît d'évidence très intéressant du point de vue économique.

Il reste à vérifier que le BFM projeté est, au moins mécaniquement, équivalent au béton armé, notamment au niveau des zones d'ancrage des tirants qui constituent les zones sensibles.

- **Les dalles de pont mixte :**

Il nous semble qu'une solution mixte, béton armé (armatures transversales) et fibré, ou béton précontraint (précontrainte transversale) et fibré, est mécaniquement plus adaptée que la solutions classiques béton armé (armatures transversales et longitudinales), et béton armé (armatures longitudinales) et précontraint (précontrainte transversale).pour éviter le retrait le poinçonnement de la dalle, Et donner un meilleur comportement en service , donc meilleure durabilité, car la présence des fibres conduit à des fissures de service plus fines.

Il reste à analyser si l'utilisation des BFM dans les dalles de ponts mixtes est économiquement viable. On peut indiquer, comme éléments de réflexion sur le sujet que :

- le coulage d'une dalle en béton armé fibré ou béton précontraint fibré est plus aisée et plus rapide qu'une dalle en béton armé dans deux directions, ou qu'une dalle en béton armé et précontraint ;
- le remplacement d'une partie des armatures par les fibres métalliques constitue un gain de main d'œuvre.

- **Les parois moulées :**

La problématique des parois moulées en BFM est voisine de celle des voiles de bâtiment en béton fibré banché. Les différences les plus notables entre ces deux applications

industrielles sont, d'une part, un ferrailage plus dense dans le cas des parois moulées (les contraintes y sont plus importantes) et, d'autre part, une hauteur plus importante de ces dernières. Ce dernier point conduit au fait que la mise en œuvre correcte des ferrillages classiques est délicate, et qu'il faut utiliser, le plus souvent, des guides qui « roule » contre les parois du moule pour permettre un bon positionnement du ferrailage vis-à-vis de ces parois (la distance entre les parois et le ferrailage doit être maîtrisée). Le fait que l'utilisation de fibres métalliques supprime ce problème de mise en place du ferrailage est loin d'être négligeable dans la gestion d'un chantier.

- **Le renforcement des buses métalliques corrodées :**

Le nombre de buses métalliques sur les réseaux routiers et autoroutiers français est important (plus de 1800 ouvrages sur les seules routes nationales). Ces ouvrages présentent à long terme des risques de corrosion non négligeables et quasi inévitables, les sinistres observés en sont la preuve malheureuse. Il faut donc réparer si l'on veut éviter de fermer l'accès à ces ouvrages.

La solution qui consiste à projeter un BFM fibré sur les parois de la buse métallique, afin de constituer une nouvelle coque, paraît la plus pertinente techniquement, et la plus économique. Elle conserve une grande souplesse (qui constitue l'avantage fondamental de ce type d'ouvrage) à l'ouvrage, souplesse qui lui permet de s'adapter aux mouvements des terrains environnants et de faire participer ces derniers à la résistance générale.

Des calculs réalisés dans le cadre du projet national BEFIM et mettant en œuvre les méthodes de dimensionnement proposées par l'AFREM, conduisent, en effet à des épaisseurs faibles de BFM fibré. Des études expérimentales sont actuellement en cours au sein du projet national BEFIM pour démontrer que les calculs conduisent à des solutions mécaniquement pertinentes.

Préfabrication :

- **Voussoirs préfabriqués de tunnel :**

Le remplacement de la totalité du ferrailage des voussoirs par des fibres métalliques est aujourd'hui d'actualité. La raison est que, si l'on fait une analyse économique complète, c'est-à-dire pas uniquement limitée au seul coût matière, la solution BFM semble plus intéressante que la solution classique béton armé.

Utilisation de Fibraflex : [44] annexe 2.5**La première application**

C'est une gaine de ciment qui consiste à renforcer et à assurer l'étanchéité entre la formation forée et le chemisage métallique. C'est pour cette application que le Durastone a été initialement développé.

La raréfaction des ressources pétrolières pousse aujourd'hui les exploitants à explorer les couches les plus profondes et à optimiser le rendement des installations. Une solution largement développée depuis une vingtaine d'années est le forage de puits multilatéraux, c'est-à-dire de puits uniques auxquels sont raccordées plusieurs branches latérales. Cela permet d'augmenter la production à partir d'une installation déjà existante, ce qui se traduit par un gain substantiel que de temps et d'argent. Dans ce cas, le ciment qui constitue la gaine doit être reforé. Il est alors soumis à des contraintes mécaniques élevées, des chocs et/ou de l'abrasion. Dans les circonstances extrêmes, le ciment ne peut pas garder son intégrité mécanique. On cherche alors à limiter les effets liés à la rupture du matériau en modifiant son comportement post-rupture.

L'étanchéité du puits est cruciale à cause de la différence de pressions entre les différentes zones du forage. C'est la clé du succès des puits multilatéraux. Le Durastone assure cette étanchéité parfaitement et de façon durable grâce à une excellente résistance aux vibrations et à l'impact apportée par les fibres.

La seconde application

Le Durastone consiste à réaliser, dans les formations géologiques particulièrement dures, des "bouchons" qui vont permettre de dévier la trajectoire du puits au droit de ces formations.

Il arrive que l'outil de forage retrouve la trajectoire originelle à travers le ciment au lieu de partir latéralement dans la formation.

En effet, le bouchon de ciment ne permet la déviation de la trajectoire que la formation environnante. Lorsque l'on utilise un bouchon en ciment conventionnel, le temps de forage moyen est de 25,5 heures, et plusieurs tentatives sont nécessaires. De plus, l'opération est un échec dans près de 40 % des cas.

Au contraire, avec le système Durastone, l'opération de forage est un succès à 100%. Une seule tentative est nécessaire, et le temps de forage moyen tombe à 11 heures.

Ce coulis de ciment, renforcé par Fibraflex (septembre 2002), possède des propriétés exceptionnelles :

- caractéristiques mécaniques :

3 fois plus résistant au perçage, 10 fois plus résistant à l'impact, et nécessitant une énergie 1.5 à 3 fois plus importante en rupture par flexion qu'un coulis de ciment conventionnel.

- homogénéité du mélange :
lorsqu'ils sont bien formulés, les coulis pompables peuvent parfaitement être mélangés sans ségrégation des fibres. Le renfort est ainsi bien homogène.
- facilité de mise en œuvre :
la flexibilité de la fibre Fibraflex, couplée à des dimensions adéquates, permet également son

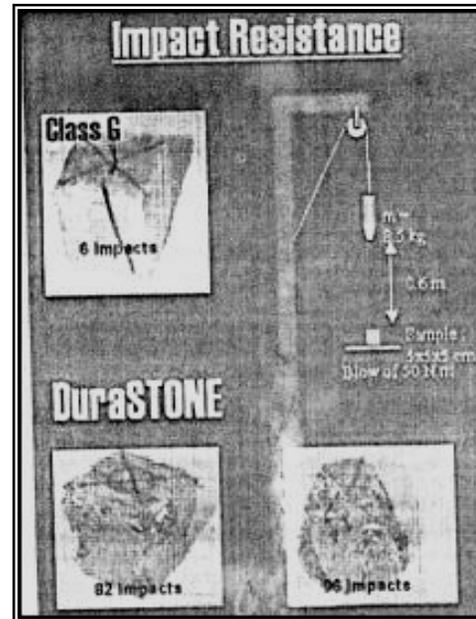


Fig.2.20. Coulis de ciment

passage aisé dans les équipements standards de pompage et d'injection de ciment, dont les conduits étroits et tortueux sont pourtant réservés à des coulis très fluides.

Fibres d'acier et polypropylène pour le béton en construction de logements :

Pour un béton encore meilleur

L'addition de fibres d'acier Fatek et fibres de polypropylène Fibril a comme objectif d'améliorer encore davantage la qualité du béton.

Fortius veut convaincre les entreprises de construction, fabricants de béton et concepteurs en mettant en évidence les avantages techniques et économiques du béton à fibres pour une construction meilleure et plus économique à l'avenir.

Fortius offre des fibres de qualité avec une mise en œuvre optimal.

Fotius offre aussi un support technique à travers un conseil direct et une assistance de calcul.

En comparaison avec des éléments analogues en béton sans fibres, les propriétés suivantes sont améliorées.

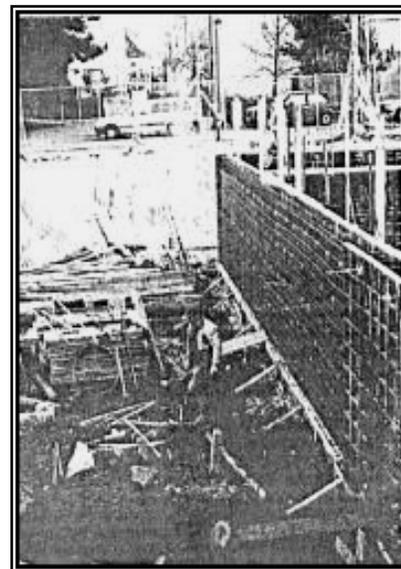


Fig. 2.21. Treillis soudé pour murs de cave dans la construction de logements.

Le facteur de travail
La force portante à la traction
La résistance à l'arrachement
La résistance aux chocs
La résistance à la fatigue
La tenue au retrait

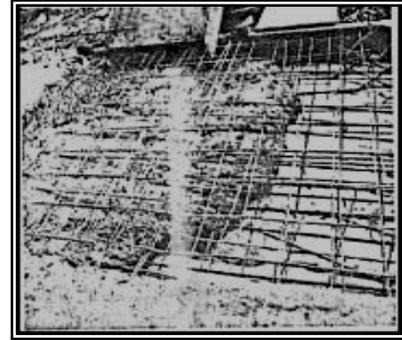


Fig. 2.22. Treillis posé sur un sol de cave

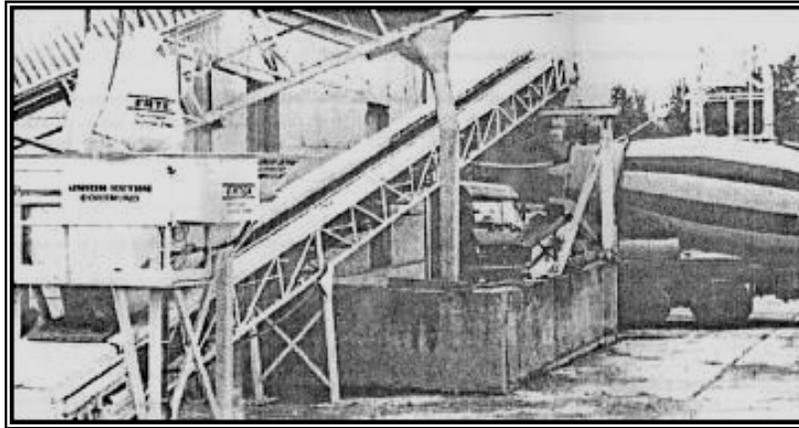


Fig. 2.23. Le béton à fibres d'acier et de polypropylène est confectionné à l'usine à béton prêt à l'emploi

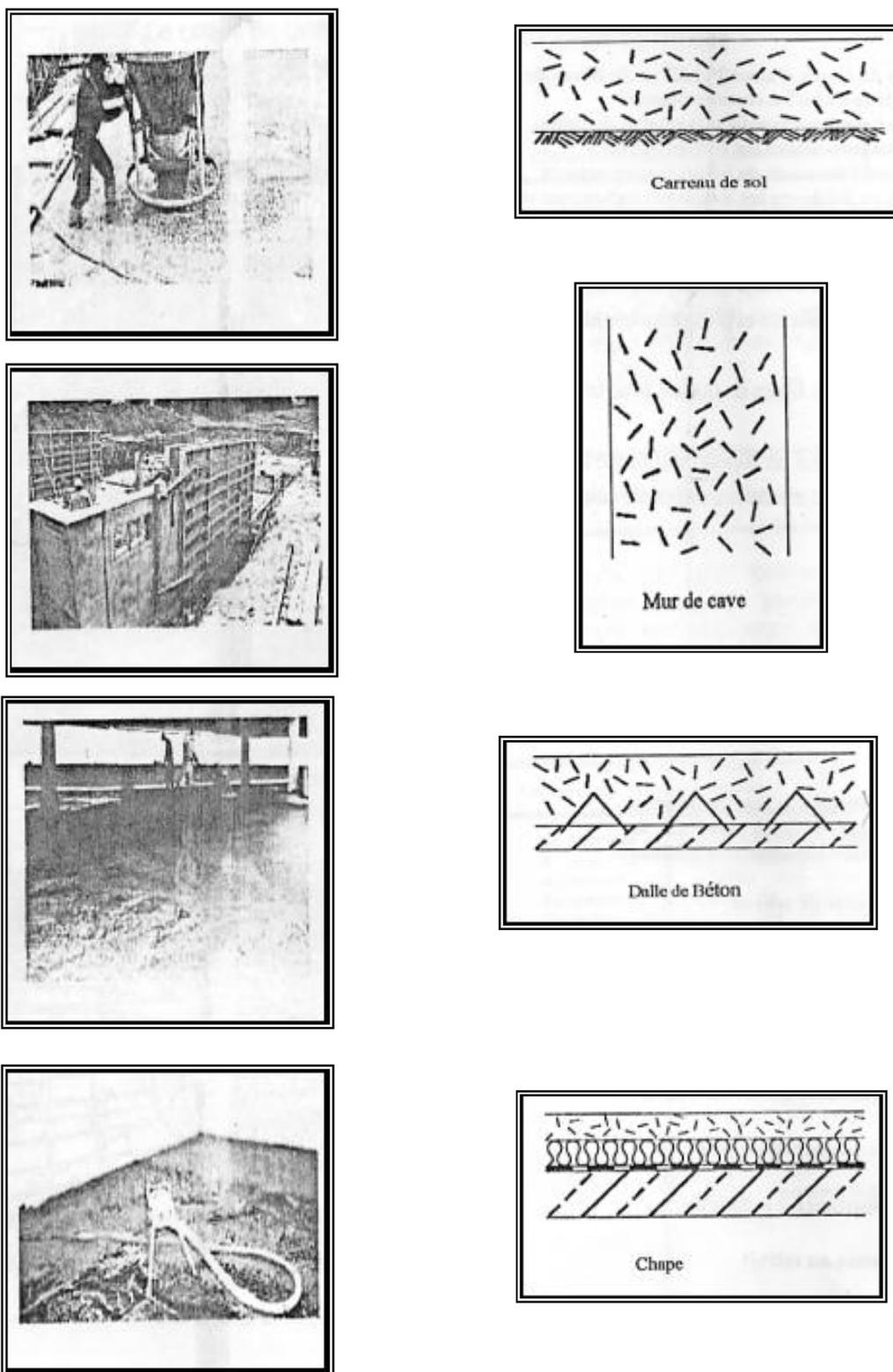


Fig.2.24. Domaine d'utilisation de fibres dans le béton

Des fibres parce qu'il est difficile de pomper des treillis :

Les dalles et murs de cave, fondations, dalles de béton pour planchers et chapes de ciment sont traditionnellement armées de grillages soudés. Cette armature n'est nécessaire, dans la plupart des cas, que sur le plan constructif et non statique. De plus, la pose de grillages nécessite un travail considérable. A cela vient s'ajouter qu'une pose non conforme peut causer des dommages prévisibles.

Dans les zones soumises à des charges moins importantes, les grillages soudés ont plutôt pour tâche d'absorber les forces statiques que de réduire les fissures.



Fig.2.25 . Coulage d'une dalle de cave avec du béton à fibres Fortius

On sait qu'une réduction de fissures est d'autant plus efficace que la section des barres est petite. Cette considération a conduit, entre autres, à la mise au point de fibres d'acier et polypropylène.

L'avenir de la construction de logements : le béton à fibres FOTIUS.

L'idéal c'est que ces fibres sont ajoutées à l'usine à béton prêt à l'emploi. Cela permet à l'entreprise de construction de livrer du béton à fibres de haute qualité constante. Au chantier, le béton à fibres est coulé sur la plateforme, l'isolant ou dans le coffrage au moyen d'une pompe, d'une benne à béton ou directement par la bétonnière sur camion. La suppression de grillages, leur pose et la couche de propreté représentent un gain de temps et d'argent.

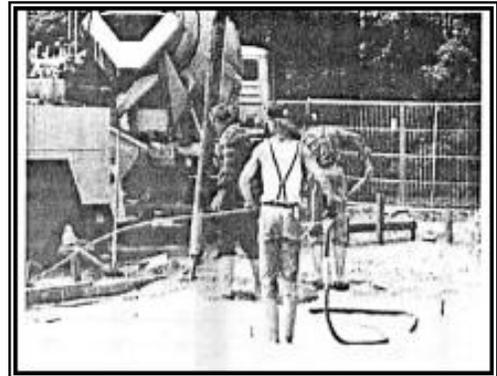


Fig.2.26.Coulage de béton à fibres d'acier Fortius dans un coffrage de mur de cave

Dans la construction de logements, les éléments tels que les dalles et murs de cave, fondations sur semelles, chapes de ciment et dalles de béton pour planchers préfabriqués, sont réalisés à base de fibres d'acier Fatek Fibril ou de polypropylène Fibril. Ces fibres empêchent toute fissuration. Cela concerne aussi bien la fissuration par retrait que l'effet portant après apparition d'une fibre appropriée a été choisie.

2.2.2.2 Fibre Polypropylène:

Fibril f : [46]

Est la marque déposée pour un groupe de fibres de polypropylène résistantes aux alcalis et destinées au microrenforcement du béton et des produits liés au ciment.

Caractéristiques : Annexe 2.3

- Petits paquets de fibres fibrillées, les fibres se détachent sous l'effet abrasif des agrégats
- Résistance à la traction supérieure
- Module d'élasticité élevé
- Très bonne répartition dans la matrice du béton, grâce au revêtement spécial des fibres
- Chimiquement inerte: excellente résistance aux acides et bases

Applications :

- Prévention de l'apparition de fissures dans le béton suite aux contractions plastiques et de séchage, (spécialement pour sols industriels et béton routière) par suite de l'augmentation de la résistance à la traction du béton vert.
- Augmentation de la ductilité du béton
- Amélioration de la résistance à l'impact, prévient les dégâts aux bords et coins.
- Diminution de dégâts pendant le transport du béton préfabriqué.
- Permet un décoffrage plus rapide suite à une cohésion améliorée.
- Augmentation de la densité de liquide et par conséquent une résistance améliorée au gel et dégel. La pénétration de sel de salage est entravée.
- Amélioration des caractéristiques anti-feu du béton; pas de giclement des parcelles du béton.
- Réduction d'une éventuelle dissociation prématurée du béton et, par voie de conséquence, de son dégorgeement.

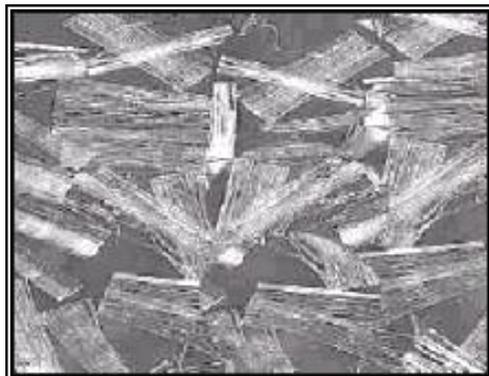


Fig.2.27. Polypropylène Fibril

2.2.2.3.Fibres de verre:

Bien que le béton armé de fibre de verre soit un produit industriel récent il a trouvé des applications diverses.

Son application dans les panneaux de revêtement de façade découle de la possibilité qu'offre la fabrication par projection de donner au produit l'aspect (couleur, texture de la surface) désiré par l'architecte et de pouvoir enrober des âmes isolantes. Avec les techniques complémentaire (emboutissage, pressage), il est possible d'obtenir une gamme de produits de formes variées tels que :

- huisseries et dormants des fenêtres ;
- coffrages perdus pour les pièces en béton coulées sur place (augmentant leur résistance au feu) ;
- gaines de ventilation, boisseaux, palplanches, tuyaux, etc.

pour les tuyaux, il faut souligner la possibilité d'y incorporer une armature continue bobinée, leur donnant la résistance exigée par la pression intérieure et les charges extérieures. Cette technique empiète, au moins en partie, sur le domaine du fibrociment classique.

Les ciments armés de verre pourraient remplacer les revêtement ignifuges isolants (construction navale) en amiante projetée, suspectée cancérigène.

Une technique également intéressante a été développée récemment au Building Research Establishment (B.R.E.) : des fibres de verre sont incorporées dans un matériau silico -calcaire et l'ensemble durci par autoclavage. Les résultats obtenus laissent pressentir la possibilité d'élaboration d'un matériau d'isolation entièrement minéral, meilleur que l'amiante-ciment du point de vue santé (J.M. West et Al.) [27]

- **Barres d'armature en fibre de verre [47]** annexe 2.4

Les barres d'armature en fibre de verre sont composées d'un faisceau de fibres de verre tendues, imprégnées dans une résine therm durcissable qui assure que les fibres sont maintenues ensemble et agissent comme une barre.

Le produit fini est entièrement inerte,

non corrosif et résistant aux alcalis. Afin d'améliorer

l'adhérence, la face externe est déformée et ensablée. Les spécialistes connaissent les barres armées fibre de verre sous le nom de barres d'armature GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic ou Polymer Drebars). Les barres GFRP sont fabriquées en usine par pultrusion et sont disponibles dans différents diamètres allant de 6 mm jusque 32 mm.

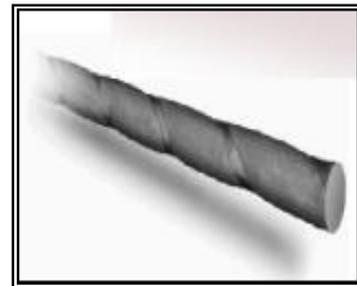


Fig.2.28Barres d'armature en fibre

Elles peuvent être mises en œuvre au lieu de l'acier inoxydable ou d'acier d'armature enduit (époxy, zinc).

Avantages :

- Augmentent considérablement la durée de vie de constructions en béton dans des atmosphères agressives
- Ne nécessitent ni réparations, ni entretien

Spécifiquement

- Non corrosives : ne se corrodent pas en cas d'exposition à des éléments agressifs ; ne peuvent être attaquées par des ions de chlorure
- Chimiquement résistantes
- Résistance à la traction plus élevée que celle de l'acier (1 à 2 fois) pour un poids d'à peine de celui de l'acier : peut facilement être transportée et placée sans appareil de levage spécial
- Transparentes pour les champs magnétiques et radiofréquences
- Non conductrices d'électricité, non thermoconductrices
- Bonne résistance à l'impact :résiste à des charges ponctuelles soudaines et élevées
- Excellente résistance au vieillissement en cas de conditions de charge cycliques
- Indéformable en cas de fluctuations de la température; la dilatation / la compression des barres d'armature en fibre de verre sont proches de celles du béton.

Utilisation :**a. Béton soumis aux sels de dégel**

- tabliers
- new-jerseys
- garages
- entrepôts de stockage de sel

b. Béton exposé au sel marin

- murs de quai, digues de mer
- bâtiments et ouvrages d'art à proximité de la mer
- constructions spéciales tels qu'aquariums, parcs d'attractions
- récifs artificiels, brise-lames
- bassins flottants
- jetées

c. Béton exposé à d'autres éléments agressifs

- usines chimiques (zones de captage pour fuites de citerne)
- béton autour des pipelines et citernes pour carburants fossiles
- industrie de la pulpe et industrie papetière
- stations d'épuration d'eau
- usines pétrochimiques
- tours de refroidissement
- cheminées
- installations nucléaires
- réservoirs de saumure
- citernes et puits chimiques
- béton entourant les piscines intérieures



Fig. 2.29. brise-lame renforcé de fibre

d. béton à faible recouvrement

- élément imitant les pierres de taille
- béton préfabriqué architectonique, corniches
- panneaux de façade, éléments de façade
- balcons.



Fig. 2.30. balcon renforcé de fibre de verre

c. Chevauchement, raccordement et tension

Afin d'obtenir une transmission optimale de la force dans 2 barres chevauchantes, il est prévu une longueur de chevauchement de 40 fois le diamètre pour l'armature en fibre de verre alors que celle de l'acier est de 30 fois le diamètre (degré BE400 pour des diamètres inférieurs de 19).



Fig.2.31. Chevauchement, raccordement et tension par d'armature en fibre de verre

- **Performances à long terme d'un ciment renforcé de fibres de verre résistantes aux alcalis : [48]**

Depuis la fin des années 1960, l'utilisation des fibres de verre résistantes aux alcalis pour le renforcement du ciment a éveillé passablement d'intérêt en raison des excellentes qualités mécaniques de celles-ci. On s'est cependant préoccupé des, réactions possibles avec la matrice. Les valeurs de ténacité et de résistance à la flexion données aux tableaux 2.1 et 2.2 pour les composites contenant des fibres de verre ont été obtenues à partir d'échantillons dans lesquels les fibres n'ont pas subi de corrosion.

La résistance en traction et la résistance au choc des produits en ciment renforcé de fibres de verre diminuent avec l'âge si ceux-ci sont exposés à l'extérieur. Cette diminution de la résistance en traction avec le temps, qui a été notée pour les produits renforcés de fibres de verre résistantes aux alcalis, a aussi été observée dans les ciments sursulfatés et à forte teneur en alumine qui ne contiennent que de petites quantités d'alcalis. Les produits à base de ciment renforcé de fibres de verre dont la résistance à la traction et au choc diminue avec l'âge ne devraient pas être utilisés dans la fabrication des éléments structuraux principaux. Les fibres de verre ont été utilisées avec succès dans la fabrication de voiles minces pour éviter des problèmes de fissuration dus aux contraintes de retrait.

La plupart des autres fibres utilisées sont relativement stables lorsqu'elles sont dans la masse du ciment. Des baisses de résistance n'ont pas été observées dans les échantillons contenant des fibres de carbone et des fibres de Kevlar. La combinaison de différents types de fibres dans des produits à base de ciment constitue une nouvelle façon d'améliorer les performances à long terme de ces produits. Les mélanges de fibres de polypropylène et de verre, ou de particules de mica utilisées comme des fibres, peuvent aider à prévenir l'affaiblissement à long terme de la résistance à la traction et au choc.

Remarque sur l'élaboration du ciment armé de fibres de verre:[27]

Pour les matériaux en plaques relativement minces à orientation plane des fibres, une technologie industrielle poussée a été développée, surtout au Building Research Establishment, en Angleterre.

Le procédé consiste à projeter simultanément, sur un moule permettant l'essorage, les fibres coupées et la pâte de ciment. Une fois obtenue l'épaisseur suffisante, on procède à l'essorage par le moule et au compactage par calandrage. La longueur des fibres projetées peut être réglée. Le moule peut avoir une forme quelconque : il peut être formé par un tambour, tournant pendant la projection. Cette dernière disposition est particulièrement propice à l'addition d'une armature continue bobinée.

Ce procédé, élégant au point de vue technologique, comporte encore deux autres avantages.

* La quantité des fibres qu'il est possible d'incorporer atteint 10% dans le cas de distribution aléatoire plane simple et 15 % avec des fils bobinés, parallèles .

* Le coefficient d'efficacité, qui pour l'orientation aléatoire plane est presque double de celui correspondant à une orientation aléatoire triaxiale, est quintuplé pour les fibres continues bobinées

* Le matériau frais obtenu peut être formé par découpage, emboutissage, pliage, etc.

La technologie de projection peut être facilement adaptée aux fibres autres que le verre et aux liants autres que le ciment. Le plâtre offre certains avantages par sa bonne compatibilité avec le verre. Les plaques formées de ce matériau armé de fibres de verre ont un bel aspect et une résistance mécanique dépassant de beaucoup celle des planches à plâtre

L'élaboration par malaxage simple a fait l'objet d'un travail de développement important au Building Research Establishment [Hills (D.L.)]. En utilisant les adjuvants appropriés (oxyde de polyéthylène et méthylcellulose). On arrive à incorporer aisément 5 % de fibres. Une certaine tendance au ressuage de l'eau est l'inconvénient propre aux mélanges frais obtenus.

Les mises en œuvre par moulage en coffrage ouvert avec vibration, moulage par injection, moulage à la presse avec essorage, moulage par extrusion, ont été essayées avec succès

- **Mise en œuvre et pose et mesures de sécurité[47]** (barre d'armature de fibre de verre) :

Il est conseillé de porter des gants de travail lors de la mise en œuvre et de la pose des barres d'armature en fibre de verre. Le cas échéant, celles-ci peuvent être portées à longueur au moyen d'un disque de meulage. Le port d'un masque anti-poussière et de lunettes de sécurité est recommandé.

L'armature en fibre de verre ayant un poids spécifique faible, elle aura tendance à monter à la surface pendant les vibrations du béton. Il faut donc veiller à attacher solidement l'armature aux cales de réglage et écarteurs au moyen de fil de fer plastifié ou de fil en nylon.

Tous les coudes et étriers doivent également être fabriqués en fibre de verre (ou acier inoxydable).

2.2.3. Les avantages du béton à fibres et sa technologie :

- gain de temps et de matériau ;
- utilisation sans difficultés, grâce à une mise en œuvre facile ;
- livraison du béton à fibres prêt à l'emploi par votre usine à béton ;
- réduction du danger de fissuration par retrait ;
- amélioration logistique et garantie de la qualité.

2.3. Conclusion :

L'étude bibliographique présentée ici résume, au travers des écrits les plus récents, l'états de connaissance sur le mécanisme interne particulier des matériaux composites (bétons de fibres), ainsi que sur les problèmes technologiques découlant de leur élaboration et mise en œuvre.

Les béton de fibres font l'objet, de puis environ trente ans d'un effort de recherche important.

Le béton de fibre est un matériau composite formé de béton ou mortier mélangé avec des fibres métalliques, de verre ou de synthèse, dont la section est de l'ordre du millimètre et la longueur de quelques centimètres. Les bétons de fibres présentent une très bonne résistance aux chocs et un comportement à la rupture supérieur à celui des bétons courants, donc l'incorporation de fibres diverses dans le bétons ou les mortiers en vue d'améliorer leurs performances mécaniques :

- Où les bétons avec fibres métalliques ont des résistances en traction et aux chocs améliorées et sont moins sensibles à la fissuration.
- Ainsi, les bétons avec fibres synthétiques offrent une meilleure résistance à la fissuration de retrait au jeune âge (les deux premiers jours), au gel et à l'abrasion.

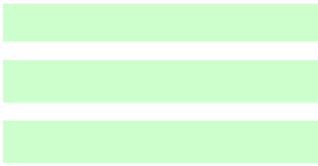
Ces fibres (métalliques ou synthétiques) doivent faire l'objet d'un cahier des charges approuvé par un bureau de contrôle agréé, dont ce dernier est impérativement nécessaire pour la stratégie nouvelle mise en place en France par AFREM [Association française de recherche et d'essais sur les matériaux et les constructions] et BEFIM [Bétons de fibres métalliques], où cette stratégie s'articule de la manière suivante :

- 1) – Définition d'un cahier des charges « mécaniques » exigées à la suite d'une étude de prédimensionnement ;
- 2) – Choix des différents constituants du béton de fibres lié, par exemple aux matériaux locaux disponible, aux conditions de la mise en œuvre, au rapport longueur de la fibre / diamètre de plus gros grains de la matrice à respecter, etc.
- 3) – Optimisation de la composition du béton de fibres en fonction des caractéristiques mécaniques visées : rapport eau/ciment, pourcentage de fibres, rapport sable/granulats, etc.
- 4) – Caractérisation mécanique complète du béton de fibres ;

- 5) – Comparaison entre les caractéristiques exigées et celles du béton de fibres formulé. Si cette comparaison n'est pas satisfaisante, on peut être amené à reformuler le béton de fibres ;
- 6) – Bilan économique de la solution béton de fibres, qui doit prendre en compte, impérativement, tous les aspects, et pas seulement le coût matière direct, tels que la main d'œuvre, les investissements, le transport, la rapidité d'exécution, etc. on pourra alors évaluer si la solution BF est viable d'un point de vue technico-économique.

NB : Le choix des constituants d'un béton de fibres dépend directement de l'application industrielle concernée. En effet, le cahier des charges d'un béton, quel qu'il soit, impose, généralement, une résistance caractéristique en compression au regard de cette application industrielle. Or, le pourcentage de fibres à incorporer dépend de cette résistance en compression, et la longueur au moins deux fois supérieure au diamètre de plus gros grain de la matrice.

En fin donc l'incorporation de fibres diverse dans les bétons et les matériaux fragiles du type mortier, ciment ou plâtre en vue d'amélioration leurs performances mécaniques et faciliter la mise en œuvre des structures.



chapitre

3

Matériaux utilisés et méthodologie d'essais

3.1. Introduction	75
3.2. Programme expérimental.....	76
3.3. Types des éprouvettes utilisées.....	79
3.4. Matériaux utilisés.....	79
3.4.1. Les granulats.....	79
3.4.2. Le ciment.....	80
3.4.3. L'eau de gâchage.....	82
3.4.4. Les fibres.....	84
3.5. Confection du mortier.....	88
3.5.1. Malaxage.....	88
3.5.2. Analyse à l'état frais.....	88
3.5.2.1. mesure de l'affaissement.....	88
3.5.2.2. mesure du temps d'écoulement :Maniabilimètre.....	90
3.5.2.3. mesure de la densité réelle du mortier frais.....	91
3.5.3. Confection des éprouvettes.....	91
3.6. Essais mécaniques.....	92
3.7. mesure l'absorption capillaire et de perte en poids.....	94
3.7.1. mesure l'absorption capillaire	94
3.7.2. mesure de la perte en poids.....	94
3.8. conclusion.....	96

3.1. Introduction :

De part son originalité, ce sujet concernant l'influence du polystyrène, copeaux d'acier et de bois sur le mortier a constitué notre premier choix. Nous n'avions au départ aucune base de recherche sur ces produits sur laquelle s'appuyer.

En effet, il n'existe pas ou très peu de travail de recherche à ce sujet localement.

Nous avons donc commencé dans un domaine très ouvert où nous avions pas d'objectif fixe à atteindre.

La première des choses qu'il fallut se fixer était les dosages (teneurs) des sous produits que nous allions étudier ; ce dosage étant un pourcentage du poids du ciment. A partir de là, nous ne savions pas si 4% était peu ou pas assez car il est difficile de se rendre compte du volume que peut représenter cette teneur. Nous avons donc dû rechercher la plage de dosages que nous allions étudier et pour cela, nous avons fabriqué du mortier uniquement pour tester si les dosages étaient réalistes du point de vue du malaxage et de la mise en œuvre. Nous nous sommes alors arrêtés sur un maximum (au delà duquel par exemple le volume occupé par le polystyrène devenait tellement important qu'il devenait difficile pour le malaxeur de mélanger le tout, (nous commençons à obtenir du polystyrène au mortier...).

De ce fait, nous avons décidé d'étudier les pourcentages suivants

Polystyrène : 0.5% ,1% ,1.5% ,2% ,3% et 4%.

Copeaux d'aciers : 1% ,2%.

Copeaux de bois : 1% ,2%.

Ceci pour bien mettre en évidence l'influence de ces sous produits dans les faibles dosages. Bien que entendu, nous avons pour chaque caractéristique étudiée - comparé nos résultats avec un mortier de référence (témoin) réalisé selon les mêmes procédés de mise en œuvre et dosages en sable, ciment et eau.

Le seul paramètre changeant d'un mélange à l'autre étant le dosage (teneur)des fibres.

Les caractéristiques que nous avons étudiées sont les suivantes :

- la maniabilité ;
- La masse volumique ;
- La résistance à la compression et à la traction par flexion ;
- La perte en poids ;
- L'absorption capillaire.

Par conséquent, nous avons cherché dans ce sujet à déterminer les avantages et ou les inconvénients qu'ils pouvaient y avoir à fabriquer du mortier contenant des fibres locaux. Ce qui est aussi intéressant de connaître c'est l'ordre de grandeur dans lequel influe le polystyrène, copeaux d'acier et de bois et surtout le ou les dosages optimums.

le mortier soumis aux essais dans la présente étude est un mortier renforcé par des fibres (sous produits) .Il résulte du malaxage de sable, ciment, de l'eau et des fibres. Ces constituants sont des produits locaux. La confection du mortier et tous les essais ont été réalisés au sein du laboratoire des travaux publics (LTP Est) de l'est. Tous les essais normalisés ont été réalisés dans le cadre des normes AFNOR (et leurs équivalentes des normes Algériennes NA).

3.2. programme expérimental :

Notre objectif est de trouver un mortier de maniabilité fluide facile à mettre en œuvre comme le stipulent les normes françaises. (temps d'écoulement de compris $0 < t < 5$).

Nous prenons un rapport pondéral sable/ciment constant égal à 3 et un rapport Eau /ciment constant égal à 0.5 pour toutes les compositions.

Puis en jouant sur la quantité de fibres introduites en mesurant le temps d'écoulement de chaque mélange.

Cette méthodologie est critiquable, mais elle est recommandée, par la plupart des chercheurs (travaillant avec un rapport E/C constant). Par contre Jonhnston 1987, propose de travailler à maniabilité constante en modifiant le rapport E/C .

Quelques essais préliminaires ont effectivement montre que l'ouvrabilité du mortier est fortement influencée par l'introduction des fibres.

Le faible volume des sous produits (fibres) : billes de polystyrène par rapport aux fibres de copeaux de bois et aux fibres copeaux d'acier font que le mortier fabriqué avec le même % massique contient plus de billes de polystyrène que les deux autres.

A masse constante, il y a plus de billes de polystyrène que fibres de copeaux d'acier et plus de fibres de copeaux de bois.

Ainsi, différentes méthodes de renforcement de la matrice sont comparées.

La Matrice :

Comme matrice, c'est un mortier qui est retenu avec les corps d'épreuve choisi sont de taille modeste .

Ainsi, cela donne une grande homogénéité à la matrice.

Nous ferons varier le type des fibres.

La notation M désigne (mortier témoin sans fibres, suivie de la lettre P désignant la nature de la fibre (le mortier de fibres de billes de polystyrène) ,

ou A fibres de copeaux d'acier

B fibres de copeaux de bois,

Suivie d'un chiffre qui représente le pourcentage de fibres introduit x 10

DESIGNATION	NOTATION
1/ mortier témoin.	M
2/ mortier renforcé de 0.5 % de polystyrène.	MP5
3/ mortier renforcé de 1% de polystyrène.	MP10
4/ mortier renforcé de 1.5 % de polystyrène.	MP15
5/ mortier renforcé de 2 % de polystyrène	MP20
6/ mortier renforcé de 3 % de polystyrène.	MP30
7/ mortier renforcé de 4 % de polystyrène.	MP40
8/ mortier renforcé de 1 % de copeaux d'acier.	MA10
9/ mortier renforcé de 2 % de copeaux d'acier.	MA20
10/ mortier renforcé de 1%de copeaux de bois.	MB10
11/ mortier renforcé de 2% de copeaux de bois.	MB20

TABLEAU 3.2 GROUPE DE MESURES :					
Type de mortier	Nombre de gâchée ou d'éprouvette	Corps d'épreuve	Conservation	Age de chargement	Type d'essai
M	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MP5	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MP10	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MP15	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MP20	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MP30	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MP40	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
M	03	16X32	/	1j	M V apparente
MP5	03	16X32	/	1j	M V apparente
MP10	03	16X32	/	1j	M V apparente
MP15	03	16X32	/	1j	M V apparente
MP20	03	16X32	/	1j	M V apparente
MP30	03	16X32	/	1j	M V apparente
MP40	03	16X32	/	1j	M V apparente
M	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MP5	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MP10	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MP15	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MP20	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MP30	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MP40	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
M	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MCA10	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MCA20	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
M	03	16X32	/	1j	M V apparente
MCA10	03	16X32	/	1j	M V apparente
MCA20	03	16X32	/	1j	M V apparente
M	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MCA10	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MCA20	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
M	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MCB10	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
MCB20	03	/	/	Instantanée	Maniabilité
M	03	16X32	/	1j	M V apparente
MCB10	03	16X32	/	1j	M V apparente
MCB20	03	16X32	/	1j	M V apparente
M	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MCB10	03	7X7X28	/		Absorption capillaire
MCB20	03	7X7X28	/		Absorption capillaire

	NOMBRE D'ÉPROUVETTES	VOLUME DU BETON (M ³)
Essais mécanique	60	0.0823
Perte en poids	30	0.0412
Total	90	0.1235

3.3. Types d'éprouvettes utilisées :

Dans ce programme expérimental, trois types de moules ont été utilisés ;

Les éprouvette de forme cylindrique normalisées et d'élanement 2 (16x32 norme NF P 18-400, NA 2600)utilisées pour la détermination des résistances à la compression .

Les éprouvettes prismatiques normalisées (NF P 18-400, NA2600) de dimensions 7x7x28 cm pour la détermination des résistances à la flexion 3 points, la perte en poids et l'absorption capillaire.

Les éprouvettes cubiques équivalentes (7x7x7 cm) dont les résultats sont donnés à titre indicatif, ont été obtenues par l'écrasement des cubes équivalents résultants des demi-prismes des essais de traction par flexion.

3.4. Matériaux utilisés :

Tous les matériaux utilisés dans notre recherche sont de provenance locale. Pour la confection des mélanges nous avons utilisé ciment CPJ 45, du sable, de l'eau et des fibres , ce dernier composant est d'ailleurs le seul paramètre variable .

3.4.1.Les granulats (sable) :

Le sable utilisé est le sable de mer provenant de la Wilaya de Jijel. Les résultats de l'analyse granulométrique réalisée conformément à la norme NF P 18-560 (NA 2607) sont portés sur le tableau (3.3) .

Essais réalisés :

- Analyse granulométrique ;
- Equivalent de sable ;
- Analyse chimique sommaire.

Résultats des essais et commentaires :



Fig.3.1.Sable

a/ Analyse granulométrique :

<i>Tableau.3.3. Résultats de l'analyse granulométrique</i>							
<i>Tamis (mm)</i>	<i>5.0</i>	<i>2.5</i>	<i>1.25</i>	<i>0.63</i>	<i>0.315</i>	<i>0.16</i>	<i>0.08</i>
<i>Tamisats (%)</i>	<i>100</i>	<i>99</i>	<i>98</i>	<i>89</i>	<i>41</i>	<i>03</i>	<i>02</i>

Module de finesse de sable de mer = 1.70

b/ Equivalent de sable :

la propreté du sable est déterminée par la mesure de l'équivalent de sable (E.S) d'après la norme NF P 18-541

<i>Tableau.3.4. résultats d'équivalent de sable</i>		
<i>Désignation</i>	<i>Equivalent de sable</i>	<i>Spécification du béton hydraulique</i>
<i>Sable de mer</i>	<i>68</i>	<i>>65</i>

c/ Analyse chimique sommaire:

<i>Tableau.3.5. résultats d'analyse chimique sommaire</i>				
<i>Désignation</i>	<i>Insolubles</i>	<i>Sulfates</i>	<i>Carbonates</i>	<i>Chlorures</i>
<i>Sable de mer</i>	<i>95.90%</i>	<i>Traces</i>	<i>3.25 %</i>	<i>Traces</i>

**selon les essais d'identification sur le matériau en question nous remarquons que d'après :

- L'analyse granulométrique : le matériau analysé présente les caractéristiques d'un sable très fin (module de Finesse $M_f = 1.70$)
- Equivalent de sable : cette valeur caractérise un sable propre
- Analyse chimique sommaire : les analyses chimiques montrent que le sable analysé présente un fort pourcentage d'insoluble ce qui montre que le matériau est issu d'une roche dure.

3.4.2. Le ciment :

Le ciment utilisé pour la confection du béton est de type CPJ 45 norme Algérienne NA 442 (équivalent au CEM II ENV. 197), qui provenant de l'usine ERCE (Hamma Bouziane-Constantine). La composition chimique, les caractéristiques physiques, les résistances mécaniques et la composition minéralogique du ciment sont portées sur les tableaux suivants

SiO₂	27.83
Al₂O₃	6.21
Fe₂O₃	3.12
CaO	57.22
MgO	0.94
SO₃	2.02
Na₂O	/
K₂O	/
Chlorures	0.00
CaO libre	0.88
Rés.Insoluble	2.28
P.A.F	2.41

Temps de début de prise	2h :50
Temps de fin de prise	4h :06
Expansion de CHATELIER à chaud	2.90
Expansion de CHATELIER à froid	1.65
Surface spécifique (BLAINE)	3891
Consistance normale	26.91

Age	à la compression	à la flexion
2j	143.2	35.7
7j	266.4	58.3
28j	433.1	77.9

C3S	C2S	C3A	C4AF
56.60	22.98	9.87	8.25



Fig.3.2.Ciment utilisé

3.4.3. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage du mortier est de l'eau potable. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont représentés dans le tableau (3.10) selon la norme NF P18-303 (NA 1966) relative au concentration en matières en suspension et sel dissout.

Tableau .3.10.Concentration en matières et sel dissout dans l'eau (mg/l)

<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Cl</i>	<i>SO₄</i>	<i>CO₃</i>	<i>NO₃</i>	<i>insoluble</i>
<i>116</i>	<i>36</i>	<i>80</i>	<i>3</i>	<i>140</i>	<i>170</i>	<i>305</i>	<i>5</i>	<i>786</i>

a)caractéristiques et tolérances :[32]

Cphysiques :

les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de matières en suspension au-delà des proportions suivantes :

- 2 grammes par litre pour béton ou mortier type A et B
- 5 grammes par litre pour béton ou mortier type C

Cchimiques :

les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de sels dissous au-delà des proportions suivantes :

- 15 grammes par litre pour béton ou mortier type A et B.
- 30grammes par litre pour béton ou mortier type C.

les bétons ou mortiers de types A sont de haute qualité et de forte résistance, ceux de type B sont des mortiers à grande imperméabilité, tandis que le type C représente ceux dits courants.

On devra veiller à ce que cette proportion de matières dissoutes (par exemple : acide, sulfate de magnésie, etc.) ne puisse pas nuire à la conservation des bétons et mortiers.

Ces limites comprennent les déchets industriels. En outre, les eaux douteuses ou soupçonnées de contenir des matières organiques seront soumises à l'analyse chimique.

b) Technique des essais : Norme NF P 18-303

Cphysiques :

Pour obtenir la proportion des impuretés en suspension dans l'eau, prélever deux litres de liquide dans un volume d'eau bien brassée.

Filtrer cette eau avec un filtre en proportion, parfaitement sec, dont on aura au préalable déterminé la masse.

Filtrer l'eau prélevée jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement claire.

Sécher le filtre et le résidu à 110 °C jusqu'à masse constante.

L'augmentation de la masse du filtre donnera la masse des impuretés en suspension .

Cchimiques :

Pour déterminer la proportion des impuretés dissoutes, évaporer l'eau précédemment filtrée jusqu'à séchage complet et peser le résidu.

Sa masse rapportée à 2 litres représentera la masse des sels dissous.

c) Méthodes d'analyse d'eau :

Pour le gâchage du mélange de béton, il faut utiliser de l'eau qui ne contient par d'addition affectant le durcissement du ciment ou bien altérant la qualité du ciment.

Au cours de la préparation du mélange du béton, il est recommandé d'utiliser de l'eau potable dont la qualité ne provoque pas de doute.

Si on est obligé d'utiliser, pour le gâchage, de l'eau des bassins, il est nécessaire de faire le contrôle préalable de sa qualité, le laboratoire contrôle l'acidité d'eau et de la teneur en sulfates.

d) Prélèvement des échantillons d'eau :

Le laborantin doit prélever l'eau de sorte que son composé ne soit accidentel. C'est pourquoi il est déconseillé de prélever l'eau des bassins juste après la pluie. Si on prend de l'eau des puits ou l'eau de robinet, il faut laisser couler pendant 5 mm. Après, on fait le prélèvement dans le récipient bien propre. Il est préalable de prélever les échantillons d'eau

de 3 litres dans des bouteilles avec bouchon. Après cela, on colle la fiche correspondante. Les échantillons sont envoyés au laboratoire pour analyse de l'acidité et de la teneur en sulfates.

e) Essai de l'acidité de l'eau :

On verse de l'eau dans une éprouvette bien propre, lavée préalablement avec de l'eau distillée ; on plonge un papier tournesol bleu pour quelque temps. Si le papier tournesol de vient rose, ça veut dire que la teneur en acide dans cette eau est élevée.

f) Essai des sulfates en eau :

Cette méthode s'effectue de la manière suivante : on verse l'eau, avec quelques gouttes de solution à 10% d'HCl, dans une éprouvette de 150 à 200 ml. On fait bouillir ensuite au compte-gouttes la solution de 10 % de chlorure de baryum.. le précipité qui descend prouve l'existence des sulfates ou des acides est assez considérable, alors il est nécessaire de faire une analyse chimique complète.

/ Remarque sur la qualité d'eau :

L'eau pour le gâchage du béton doit être propre (pas d'acide), le pH ne doit pas être inférieur à 4, c'est-à-dire à ne pas changer la couleur bleu en rouge. Outre cela, les sulfates dans l'eau ne doivent pas dépasser 2700 mg/l (SO_4) et tous les sels 5000 mg/l.

Le béton à base de ciment alumineux ne doit pas être gâché par l'eau de mer ou l'eau salée. Ne pas utiliser l'eau avec les conditions organiques des eaux industrielles et des eaux de décharge pour le gâchage.

3.4.4. Les Fibres :

Les fibres utilisés dans notre projet sont les suivants :

- Copeaux d'acier ; [provienne de SONACOM Ain Smara Constantine]
- Copeaux de bois; [provienne de l'entreprise des meubles de Bentalha à Boumerzouk - Constantine]
- Polystyrène [provienne de KAPLAST- Sétif]

a- Caractéristique et analyse chimique des copeaux d'acier :

Fig.3.3.Copeaux d'acier utilisés



Tableau.3.11. . caractéristiques des copeaux d'acier

Tableau.3.11. . caractéristiques des copeaux d'acier								
Numéro du matériaux		1.0402						
Pays	Allemagne							
Symbole	C 22							
Normes	DIN 17204 - Tubes circulaires sans jointe en acier de traitement DIN EN 10083-2 - Aciers pour trempe et revenu Aciers de qualité non alliés DIN EN 10250-2 - Pièces forgées en acier pour usage général Aciers de qualité non alliés et acier spéciaux.							
Groupe d'acier	Aciers de qualité non alliés : Aciers avec un C moyen $>0.12 < 0.25 \%$ ou $R_m > 400 < 500 \text{ N/mm}^2$							
But d'utilisation	Aciers d'amélioration Eléments de construction faiblement chargés							
Analyse chimique								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr +Mo+Ni
0.17-0.24	≤ 0.40	0.40-0.70	≤ 0.0450	≤ 0.045	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.4	≤ 0.63

b -Caractéristique et analyse chimique des copeaux de bois :

Fig.3.4.Copeaux de bois utilisés

*Tableau 3.13. caractéristiques de copeaux de bois*

Les copeaux de bois utilisées sont de nature " hêtre" .		
Densité : dureté		0.50-0.70
	tendre mi lourds	
Retrait		moyen
Provenance		Europe centrale
Résistance à la rupture en compression axiale		550-650

c -Caractéristique et analyse chimique de polystyrène :

Fig.3.5.Polystyrène utilisé



Tableau 3.13. caractéristiques de billes de polystyrène

Les billes de polystyrène expansé utilisées sont adéquates pour être incorporées dans les mortiers et bétons. Elles présentent des diamètres variables de 1.5 à 2.5 mm et sont livrées par sac variant de 100 à 500 litres.

Sa masse volumique est de 25 kg/m^3 , ce qui est 100 fois plus petite que la masse volumique du béton.

3.5. Confection du mortier :

pour la confection des gâchées, nous avons utilisé beaucoup de matériels et fournitures courants (balances, récipients, truelles, spatules, huile de coffrage.....), mais également des appareils tels que le cône d'Abrams, malaxeur.. maniabilimètre LCPC,.....)

3.5.1. Malaxage :

Les granulats , le ciment et les fibres sont placés, après pesage, dans un malaxeur de laboratoire à axe vertical (marque ZYKLOS Fig.3.6) d'une capacité de 0.25 m³. un premier malaxage à sec a été effectué durant 30 secondes. On ajoute l'eau, par la suite, un deuxième malaxage de deux minutes a été réalisé.



Fig.3.6. malaxeur utilisé

3.5.2. Analyse à l'état frais :

Nous nous intéressons ici à l'analyse du mortier frais, à sa sortie de malaxeur, et de ce fait sur le dosage en eau qu'il est encore possible d'agir pour régler l'affaissement au cône d'Abrams désiré ($10 \text{ cm} \leq A \leq 15 \text{ cm}$ n béton très plastique de classe S3 selon NF P 18-305).

3.5.2.1.Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams :

A. Objet :

Le présent essai a pour but de définir un essai des mortiers frais dit « essai d'affaissement » ou « essai au cône d'Abrams »

B. Domaine d'application :

Le présent essai s'applique aux bétons ou mortiers dont les granulats ont une dimension D inférieure ou égale à 40 mm.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams ou slump-test est l'essai le plus employé pour la mesure de consistance du béton. Cet essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-451(NA 431).

C. Appareillage :[32]

CMoule :

Le moule, sans fond, de forme tronconique, a les dimensions inférieures suivantes (en millimètres) :

- diamètre du cercle de la base supérieure : 100 ± 0.5 ,
- diamètre du cercle de la base inférieure : 200 ± 0.5 ,
- hauteur : 300 ± 1 .

il est construit de manière à être indéformable. La paroi inférieure est non absorbante, non réactive au liant, lisse et sans aspérités.

Il doit être muni :

- aux 2/3 de la hauteur, à partir de la base, de deux poignée,
- à la partie inférieure, de dispositifs de fixation ou d'appuis pour les pieds de l'opérateur, permettant de l'assujettir sur la surface d'appui.

CTige de piquage :

Tige en acier, diamètre 16 mm, longueur 600 mm, à extrémités hémisphériques.

Portique de mesure :

Portique constitué par deux montants verticaux distants d'environ 300 mm et reliés rigidement à la partie supérieure, sur laquelle coulisse une règle de lecture susceptible d'être immobilisée par une vis de pression.

Surface d'appui de l'ensemble :

La surface d'appui doit être plane et horizontale, rigide et non absorbante .

Elle ne doit pas recevoir de chocs ou de vibrations pendant l'essai.

Mode opératoire :

Humidifier la surface d'appui et y assujettir le moule dont la paroi intérieur, bien propre, aura été légèrement huilée.

Au moyen d'une pelle creuse, introduire le béton ou le mortier dans le moule en trois couches, chacune ayant une hauteur égale au tiers de la hauteur du cône. Cette introduction doit commencer une à deux minutes, au maximum, après prélèvement et homogénéisation du mélange destiné à l'essai.

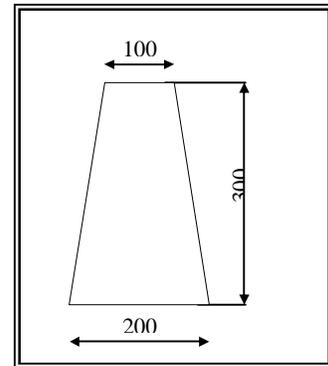


Fig.3.7. Cône d'Abrams

Piquer chaque couche 25 fois, avec la tige de piquage, en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du mélange et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu.

A la dernière couche, au cours du compactage, ajouter le béton nécessaire pour que le moule soit juste rempli à ras bords.

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton.

Après avoir arasé le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure, exprimé en cm, est réalisée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

3.5.2.2. Mesure du temps d'écoulement (Maniabilimètre):

Cet appareil est utilisé soit :

- sur chantier pour contrôler la consistance de la fabrication d'un mortier.
- En laboratoire pour déterminer les pourcentages optimaux des conditions d'un mortier, ou bien comparer plusieurs mortiers.

Le maniabilimètre utilisé dans notre étude est conçu pour les mortiers dont la dimensions du plus gros granulat $D < 12.5$ mm. Il est composé d'un moule sur lequel un repère horizontal est gravé, d'une paroi amovible qui sépare le maniabilimètre en deux volumes inégaux, d'un vibreur et d'une aiguille de piquage nécessaire pour la mise en place du mortier.

Mode opératoire :

Le principe est simple, mais doit être effectué avec une grande rigueur et selon la norme afin d'éliminer d'éventuelles erreurs dues aux manipulations.

L'essai consiste à mesurer le temps que met le mortier pour atteindre le trait. Le déroulement de la manipulation c'effectue comme suit :

- Introduire le mortier frais dans le grand volume de l'appareil en quatre couches identiques (pour chaque couche, il est nécessaire de piquer six fois à l'aide de l'aiguille).
- Enlever le paroi amovible est lancer le chronomètre simultanément (le vibreur se déclenche automatiquement) .
- Arrêter le chronomètre lorsque le mortier atteint le repère (si le mortiers n'est pas parallèle au repère, ou arrête le chronomètre lorsque le mortier recouvre 2/3 du repère).
- Arrêter l'appareil, le nettoyer et l'huiler.

3.5.2.3. Mesure de la densité réelle du mortier frais :

Pour la mesure de la densité réelle du mortier frais, on s'est servi de la chambre inférieure de l'aéromètre. La densité réelle est obtenue à partir de différence de poids du récipient (pesé vide puis remplis de mortier) sur le volume de cette chambre (huit litres). La densité réelle est donc calculée par l'expression suivante :

$$\rho = (\rho_{\text{plain}} - \rho_{\text{vide}}) / V \quad (3.1)$$

3.5.3 Confection des éprouvettes :

A. Remplissage des moules :

Le remplissage des moules prismatiques effectué en deux couches conformément aux prescriptions de la norme NF P18-423 (NA 426). Une vibration de 10 secondes a été faite après chaque couche à l'aide d'une table vibrante (fig3.8).

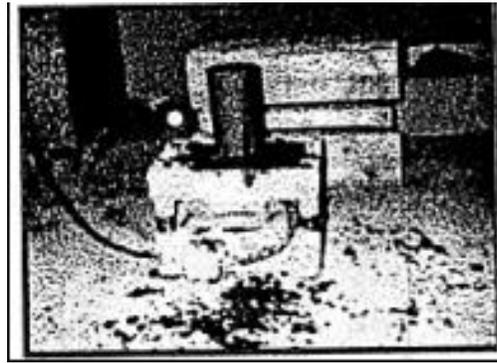


Fig.3.8. Vibration des éprouvettes

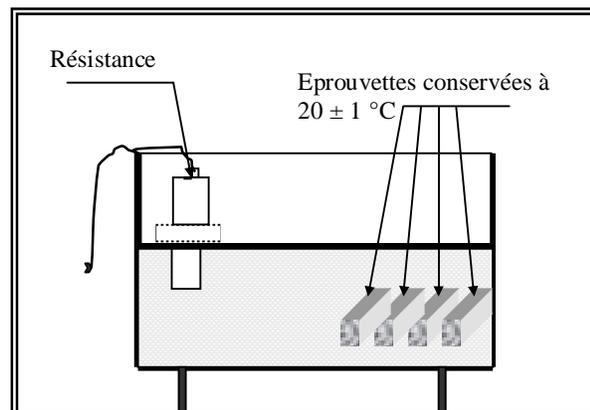
B. Arasement des éprouvettes :

Cette opération de finition a été effectuée à l'aide d'une règle à arasement comme mentionnée dans les prescriptions de la norme NF P18-423.

C. Conservation des éprouvettes :

Le mode de conservation utilisé est la conservation saturée, les éprouvettes ont été immergées avec précaution pour éviter un délavage de la surface supérieure du mortier, dans l'eau à une température de 20 ± 1 °C (100% HR). Ces conditions doivent être maintenues continuellement

Fig.3.9. Conservation des éprouvettes à 20°C



Le démoulage des éprouvettes a été effectué avec précaution 24 h après leurs remplissages, puis il faut identifier chaque éprouvette à l'aide d'un marqueur.

D. Surfaçage des éprouvettes :

Avant les essais d'écrasement les extrémités des éprouvettes cylindriques ont été surfacées conformément à la norme NF P18-416 (NA 427).

3.6. Essais mécaniques :

3.6.1. Essais de compression :

L'essai de compression consiste à rompre le corps d'épreuve entre les deux plateaux d'une presse de compression. La presse utilisée, est une machine de compression de classe 'B' et d'une capacité maximale de 1500KN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).

A. Essais de compression sur éprouvettes cylindrique d'élanement 2 :

L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-406 (NA427), sur des éprouvettes cylindriques $\varnothing 16 \times 32$. Après un centrage parfait, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante.

Au moment de la rupture (fig.3.10), on ouvre lentement la vanne de chargement et on lit alors la charge de rupture. En divisant la charge de rupture sur la section d'une éprouvette, on obtient la contrainte en compression « f_c » de cette éprouvette.

$$f_c (Mpa) = P_r (N) / S (mm^2) \quad (3.2)$$

P_r : la charge de rupture en Newton.

S : la section d'une éprouvette

$$(\varnothing 16 \times 32 \text{ P } S = 20106 \text{ mm}^2)$$

Fig. 3.10. Essais de compression sur éprouvette $\varnothing 16 \times 32$ réalisés dans notre recherche



B. Essai de flexion :

La résistance à la traction par flexion a été déterminé à l'aide d'une machine de flexion 3 points de 150 KN, sur des éprouvettes prismatique 7x7x28 cm conformément à la norme NF P18-407. (NA 428).

Les éprouvettes ont été disposées dans la machine d'essai comme indiquée sur la figure (3.11).

Après un centrage parfait, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante.

Au moment de rupture , on ouvre lentement la vanne de chargement. L'aiguille du manomètre intégrée dans la machine indique la charge de rupture.

La résistance à la traction par flexion est calculée ;

$$M_r = P_r l / 2 \quad (3.3)$$

$$f_r = M_r . v / I \quad (3.4)$$

En supposant que la contrainte est affectée par la valeur 0.6, on trouve :

$$f_r = 1.8 P_r / a^2 \quad (3.5)$$

P_r ; la charge de rupture. Et 'a' le coté de la section carrée de l'éprouvette (7 cm)

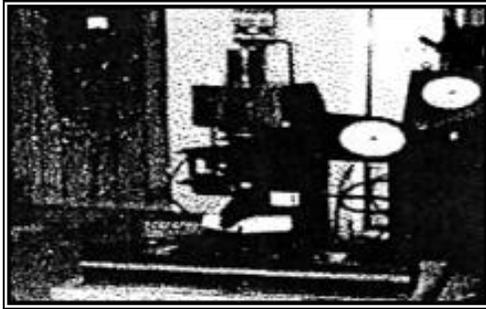


Fig.3.11. machine de flexion utilisée

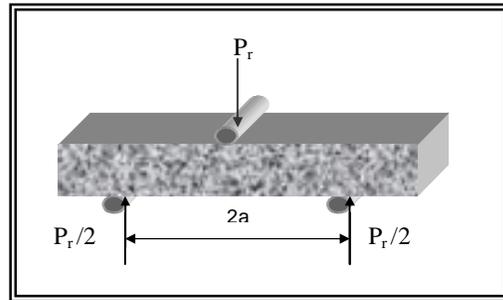


Fig.3.12. Dispositif de rupture en traction par flexion

C. L'essai de compression sur des cubes équivalents :

L'essai de compression sur des cubes équivalents de 7x7x7 cm, a été réalisé sur la même machine de compression. Les demi prismes des éprouvettes 7x7x28 obtenues après rupture en flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la figure (3.13).

La contrainte en compression sur cube est alors :

$$f_{cc} (Mpa) = P_r(N) / 4900 \quad (3.6)$$

P_r : la charge de rupture en Newton.

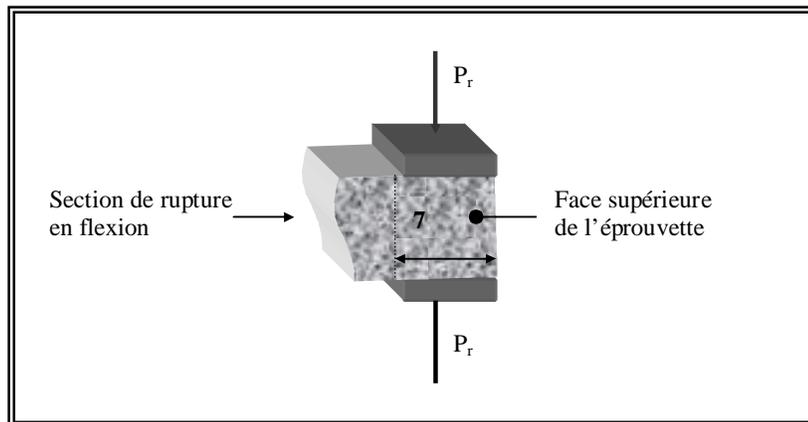


Fig.3.13 Dispositif de rupture en compression

3.7. Mesure de l'absorption capillaire et de perte en poids :

3.7.1. Mesure de l'absorption capillaire :

Nous nous sommes intéressés à l'absorption capillaire du mortier pour connaître son comportement en présence d'eau.

L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps.

Pour ce faire, il suffit de positionner les éprouvettes dans le sens vertical dans 7 mm d'eau après avoir soin d'enrouler la base dans du papier aluminium.

Puis on procède à de relevés de masses successifs sur des intervalles de temps très courts au début puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience.

Une fois les relevés de masses effectués, on en déduit par un calcul le coefficient d'absorption capillaire "Ca" qui permettra de tracer la courbe de la remontée capillaire en fonction du temps.

$$Ca = \text{masse d'eau / aire (kg/m}^2\text{)}.$$

3.7.2. Essai de la perte en poids :

Les mesures de retrait ont été accompagnées par les pesées des éprouvettes 7x7x28 dans le but de suivre l'évolution des échanges hydriques entre les éprouvettes et le milieu de conservation.

Les mesures de variation du poids ont été réalisées l'aide d'une balance électromécanique permettant une précision de 0.1 gramme (fig.3.14)

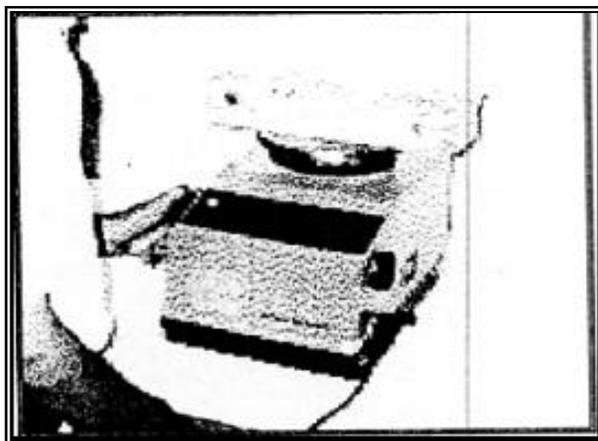


Fig.3.14. Balance utilisée pour la mesure des variations en poids

3.8. Conclusion :

L'étude de tous les paramètres susceptibles d'influencer sur les propriétés du mortier est très difficile à réaliser dans un laboratoire, car cela nécessite du temps, des moyens parfois sophistiqués et la collaboration de plusieurs chercheurs.

La résistance en compression et la résistance à la traction par flexion qui constituent les propriétés les plus utilisées ont été étudiées sous l'influence de deux paramètres importants qui sont la nature des fibres, le pourcentages des fibres.

Les procédures d'essais étant décrites ci avant, les différents résultats obtenus seront présentés et commentés dans le chapitre suivant.



Résultats *et* *discussions*

chapitre

4

4.1.	
Introduction	98
4.2. Etude de l'influence de l'introduction des billes de polystyrène sur le comportement des mortiers	101
4.2.1. Introduction.....	101
4.2.2. L'ouvrabilité	102
4.2.3. La masse volumique apparente.....	104
4.2.4. Absorption capillaire.....	106
4.2.5. Perte en poids.....	108
4.2.6. performances mécaniques.....	110
4.2.6.1. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques.....	111
4.2.6.2. Résistance à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	115
4.2.7. Bilan	117
4.3. Etude de l'influence de l'introduction des billes de copeaux d'acier sur le comportement des mortiers	119
4.3.1. Introduction.....	119
4.3.2. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques.....	119
4.3.3. Résistance à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	122
4.3.4. Bilan	124
4.4. Etude de l'influence de l'introduction des billes de copeaux de bois sur le comportement des mortiers	126
4.4.1. Introduction.....	126
4.4.2. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques.....	126
4.4.3. Résistance à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	130
4.4.4. Bilan	132
4.5. Etude de l'influence de la nature de fibres sur les performances mécaniques de bois sur le comportement des mortiers	134
4.5.1. Dosage des fibres 1%.....	134
4.5.2. Dosage des fibres 2%.....	138
4.5.3. Bilan	142
4.6. conclusion.....	144

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats obtenus dans cette recherche et cela pour montrer l'influence de type de fibre et le pourcentage de fibres sur la résistance en compression sur cylindres et sur les éprouvettes de forme cubique équivalent, la résistance en traction, en fin l'absorption capillaire et la perte en poids.

*INFLUENCE DU POURCENTAGE
DE FIBRES
SUR
LES PERFORMANCES
MECANIQUES*

*Résultats et discussions d'un
mortier renforcé
de billes de polystyrène*

4.2.Etude de l'influence de l'introduction des billes de polystyrène sur le comportement du mortier :

4.2.1.Introduction :

Nous avons donc commencé notre recherche dans un domaine très ouvert où le champ d'investigation est très vaste vu le nombre important des paramètres.

Des essais préalables sur la rhéologie, nous a guidé à fixer les dosages des billes de polystyrène à introduire dans les mortiers.

Chaque gâchée est préparée de la même manière, en effet seul le polystyrène est variable. C'est d'ailleurs l'objet de notre recherche .

TABLEAU 4.1.QUANTITE DES MATERIAUX MISE EN ŒUVRE							
	QUANTITE						
Ciment	450 g						
Sable	1350 g						
% de polystyrène	0%	0.5%	1%	1.5%	2%	3%	4%
Masse de polystyrène en fonction de la masse de ciment	0 g	2.25 g	4.5 g	6.75 g	9 g	13.5 g	18 g
Eau	225 g						
Notation	MT	MP5	MP10	MP15	MP20	MP30	MP40

Le tableau 4.1 regroupe les quantités des différents constituants des mortier élaborés.

Nous présentons ci-après les résultats obtenus de l'étude expérimentale qui nous avons mené pour quantifier l'apport des billes de polystyrène sur les principales caractéristiques du composite.

4.2.2.1. L’ouvrabilité :

Il est important de connaître et de quantifier la facilité qu’a un mortier à se mettre en œuvre.

L’interprétation des résultats se fait en comparant les temps obtenus lors des essais avec la norme.

Les critères suivants donnent la consistance du mortier.

TEMPS	CONSISTANCE
0<t<5	Mortier très fluide
5<t<10	Mortier fluide
10<t<20	Mortier très plastique
20<t<30	Mortier plastique

Nous avons cherché, dans cette étude, à connaître l’influence du polystyrène sur l’ouvrabilité du mortier.

Après plusieurs essais, nous avons obtenu les résultats suivants regroupés dans le tableau.4.2

TABLEAU.4.2. MANIABILITE DES MORTIERS RENFORCEE DE POLYSTYRENE							
Mélange	MT (0%)	MP5 (0.5%)	MP10 (1%)	MP15 (1.5%)	MP20 (2%)	MP30 (3%)	MP40 (4%)
Temps (s)	4	4	4	5	6	12	22

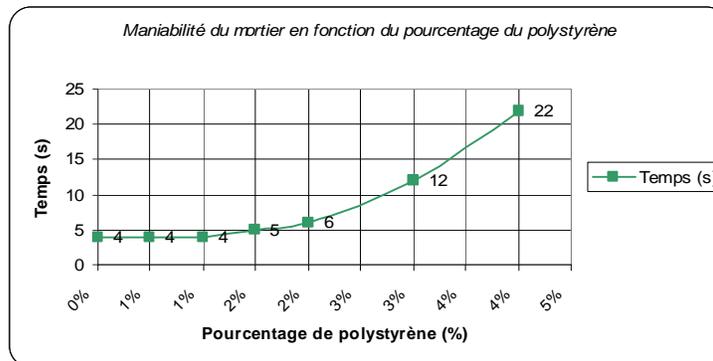


Fig.4.1.maniabilité du mortier en fonction du pourcentage de polystyrène

Commentaires :

Sur cette figure on constate que le polystyrène a peu d'influence sur la maniabilité pour les teneurs inférieures à 2%, les temps d'écoulement sont inférieurs à 10 secondes : le mortier est donc fluide.

Par contre, à partir de 3%, le mélange devient plastique .

Donc au-delà de cette valeur critique, la structure du mortier change, les fines étant remplacées par les billes de polystyrène d'un diamètre supérieur, la pâte liante est en faible quantité et n'assure plus son rôle de lubrifiant.

Ainsi que les grains s'arrangent moins bien entre eux et le mortier de vient plus difficile à mettre en œuvre.

4.2.3. La masse volumique apparente :

la masse volumique nous servira à expliquer le comportement du mortier aux résistances mécaniques :

les résultats obtenus sont les suivants :

TABLEAU.4.3. LES MASSES VOLUMIQUES DES DIFFERENTS MORTIERS RENFORCE DE POLYSTYRENE EN FONCTION DE LEURS POURCENTAGE DES BILLES DE POLYSTYRENE							
MELANGE	MT	MP5	MP10	MP15	MP20	MP30	MP40
Masse volumique (kg/m ³)	2212	1939	1705	1563	1326	1208	1111
% de la masse volumique / Témoin	100%	87.66%	77.08%	70.66%	59.95%	54.61%	50.23%

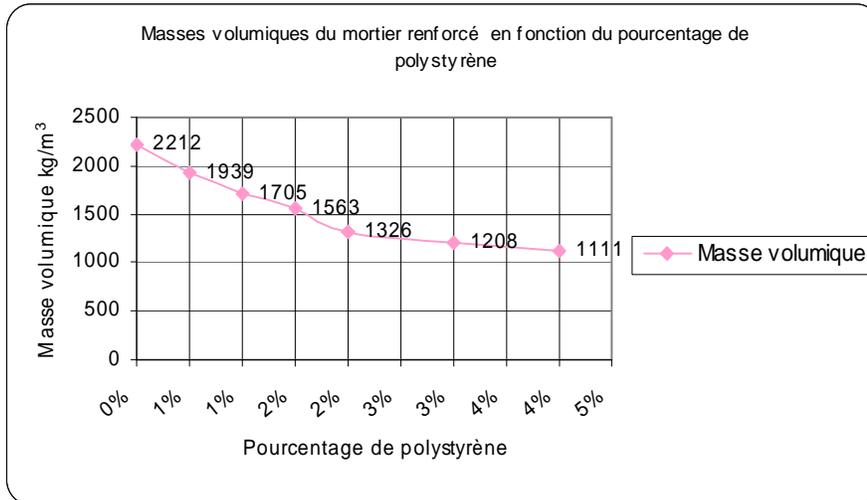


Fig.4.2. masses volumiques en fonction du pourcentage des billes de polystyrène

Commentaires :

D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que la masse volumique fraîche d'un mortier témoin est d'environ 2200 kg/m³.

Alors que celle d'un mortier renforcé de 4% de polystyrène à une masse volumique de 1100 kg/m³, d'où une diminution de la masse volumique de 50 % entre un mortier sans fibres et un mortier à 4 % de fibres de polystyrène.

De plus, nous pouvons remarquer qu'il existe des paliers pour les quels la masse volumique diminue remarquablement.

Le premier palier s'observe très rapidement, pour une teneur de 0.5% de polystyrène, la masse volumique est de 1939 kg/m^3 soit 10% de moins que celle du mortier de référence.

Ensuite, nous avons un deuxième palier pour un dosage à 1% et pour lequel, une diminution supplémentaire de 10 % de la masse volumique.

En fin le troisième palier regroupant les mortiers dont le pourcentage de polystyrène dépasse les 2%. Au-delà de ce seuil, la masse volumique se stabilise.

Ainsi, la masse volumique apparente du mortier diminue lorsque le dosage en polystyrène augmente car la densité du polystyrène est égale à 1/100 de la densité du mortier. Donc à volume égal, le mortier contenant du polystyrène sera léger.

Nous avons remarqué que les billes de polystyrène conservent leurs formes et leur répartition dans le mortier reste homogène quelque soit le dosage.

4.2.4. Absorption capillaire :

Nous nous sommes intéressés à cette caractéristique afin de connaître le comportement des matrices renforcées de polystyrène en présence d'eau. En effet il est très important de quantifier la présence des vides dans le mortier afin d'anticiper la compréhension des phénomènes d'éclatement du béton liés au gel.

Les résultats obtenus sur les différents mélanges (0% - 0.5% et 1%) sont illustrés sur la figure 4.3.

Nous pouvons observer que l'absorption capillaire d'un mortier qui contient 1 % de polystyrène est plus faible que celles du mortier dosé à 0.5% et du mortier témoin (0%).

Donc plus le mortier est riche en polystyrène et moins il absorbe de l'eau.

Ce phénomène peut être expliqué par :

- le polystyrène est matériaux non poreux, l'eau ne peut pas pénétrer à l'intérieure des billes de polystyrène.

TEMPS	0%	0.50%	1%
0	0	0	0
3	630	490	280
6	780	620	400
9	830	660	420

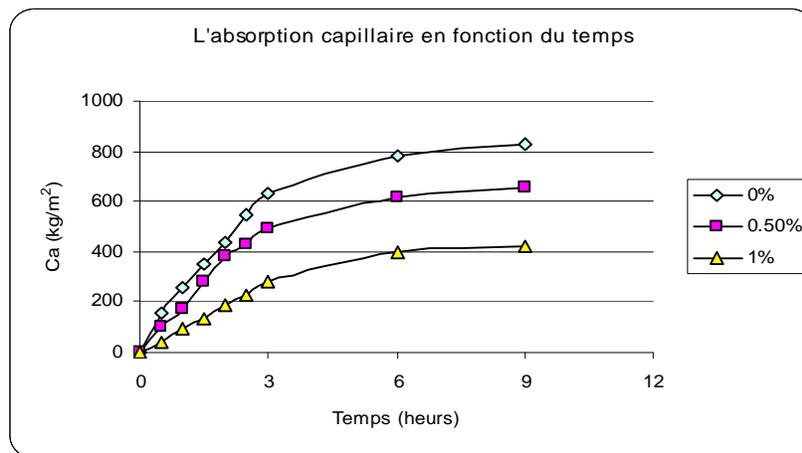


Fig.4.3.courbes d'absorption capillaire en fonction du temps pour de différents mélanges (MT, MP5, MP10)

- Un mortier témoin est composé d'un grand nombre de vides, or, lorsque on introduit les billes de polystyrène dans le mélange, elles occupent la place des vides empêchant ainsi l'eau de les remplir.

En effet, lorsque le mortier est immergé dans l'eau, cette dernière entre par les capillaires et l'infiltré dans le matériau pour aller remplir les vides existants, faisant ainsi augmenter les poids total.

Cependant, les billes que l'on introduit dans le mortier, elles prennent la place des vides, l'eau pénètre mais en plus faibles quantité dans le matériau considéré et le poids total augmente peu.

4.2.5.perte en eau (poids) :

Le tableau suivant 4.5. regroupe les résultats de la perte en poids des différents mélanges à différents échéances.

Echéances Mélanges	0	2j	7j	14j	28j
MT (0%)	0	31.2	91.9	108.5	116.3
MP5(0.5%)	0	14.8	105.1	112.3	125.5
MP10(1%)	0	15.6	123.4	139.4	145.6
MP15(1.5%)	0	21.3	145.2	154.8	154.8
MP20(2%)	0	26.7	223.4	279.2	286.1

Tableau.4.5. perte en poids $\times 10^{-3}$ d'un mortier renforcé de billes de polystyrène

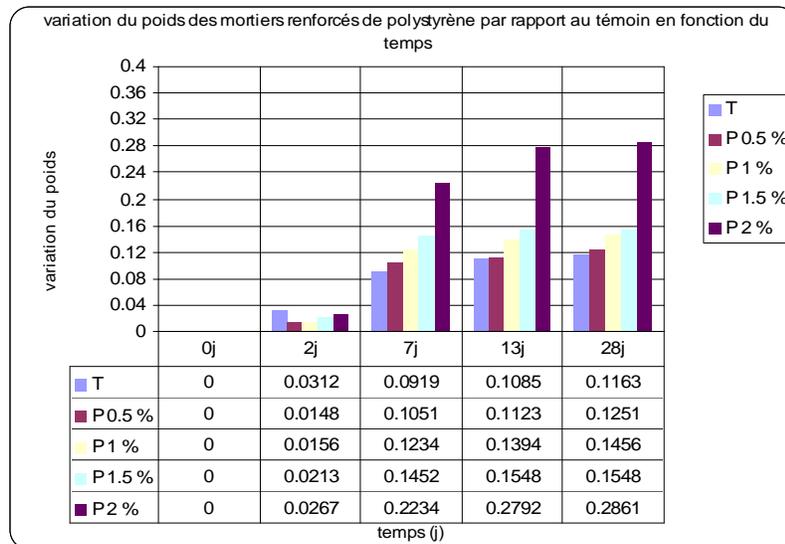


Fig. 4.4. Evolution de la perte en poids a partir du décoffrage (polystyrène)

Commentaires :

On constate qu'à très jeune âge, le mortier témoin perd plus d'eau (presque le double) que les autres mélanges, cela est dû sans doute à la structure poreuse du mortier sans polystyrène, dans de dernier l'eau se trouve piégée (emprisonnée).

Au delà de cette échéance, l'effet s'inverse complètement, où on remarque que la perte en poids augmente avec l'augmentation du dosage en polystyrène, cela est dû à la quantité d'eau libre évaporée d'un mortier à un autre en fonction de quantité de polystyrène introduite.

4.2.6. Performances mécaniques :

L'un des points importants à étudier dans notre recherche est en effet les performances mécaniques.

Nous avons comparé nos mortiers renforcés de polystyrène à notre mortier témoin afin de déterminer son influence en fonction de son dosage.

Les essais sur les différents éprouvettes doivent être effectués à certaines échéances.

- Eprouvettes cylindriques 16x32 cm – Elancement 2 : destinées aux essais de la résistance à la compression aux échéances de 7j et 28 jours.
- Eprouvettes prismatiques 7x7x28 cm : destinées aux essais de la résistance à la flexion trois points.
- Demi-éprouvettes rompues en deux parties lors de l'essai de flexion sans en modifier les caractéristiques mécaniques.

4.2.6.1. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques :

Une partie très importante de cette recherche a porté sur l'étude des performances mécaniques tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant 4.6 :

TABLEAU .4.6. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR EPROUVETTES							
16X32 CM							
	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %	3 %	4 %
Rc7 (Mpa)	29.9	14.6	7.5	6.1	3.8	3.3	2.7
% Rc7 / Témoin	100 %	48.8%	21.1 %	20.4 %	12.7 %	11 %	9 %
Rc28 (Mpa)	38.0	21.6	11.1	9.2	5.0	4.3	3.5
% Rc28 / Témoin	100 %	56.8 %	37.18 %	24.2 %	16.7 %	14.4 %	11.7 %

Commentaires :

Nous remarquons que la résistance à la compression évolue en fonction du temps d'écrasement. Elle atteint plus de 65% de sa résistance finale à 7 jours quel que soit le mélange considéré .

Nous allons procéder en exploitant ces résultats par une série d'histogrammes et de courbes.

En signalant qu'il est très important de se référer à ce tableau en parallèle de ces histogrammes et courbes surtout quand il s'agit de constater des différences de valeurs ou pour des proportions.

L'histogramme de la figure 4.5. suivante montre une particularité évidente du polystyrène : il fait chuter la résistance à la compression du mortier et ce quelle que soit l'échéance.

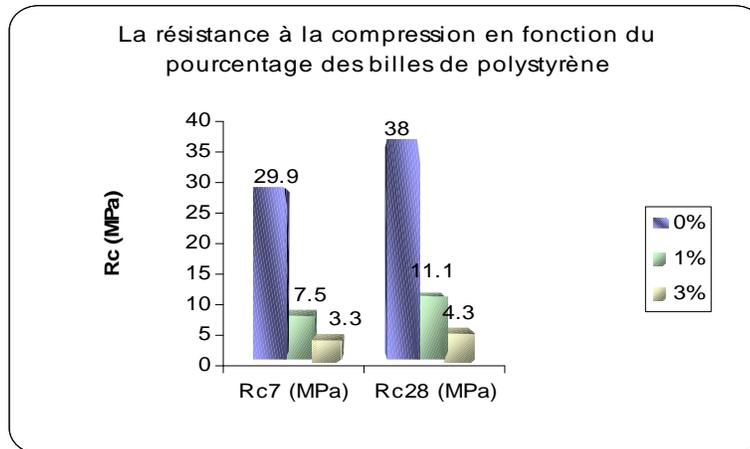


Fig.4.5. Histogramme de la résistance à la compression pour des différents pourcentages de polystyrène [0, 1 et 3 %]

La figure 4.5. montre l'influence du polystyrène sur la résistance à la compression pour les différentes échéances, on constate que l'introduction de 1% de polystyrène diminue la résistance à la compression d'environ 35% par rapport au mortier témoin.

Par contre, on constate malgré la présence du polystyrène que le mortier est de plus en plus résistant avec le temps. On peut dire que le polystyrène n'a pas d'influence significative sur l'évolution de la résistance du mortier au cours du temps.

A 3% de polystyrène, on constate une diminution de la résistance en cors plus forte que pour le mortier à 1 %. Ceci confirme le fait que le polystyrène ait une influence très importante sur la résistance du mortier et plus que le pourcentage est important, plus son influence est grande.

Une question s'impose : y'a-t-il proportionnalité entre la quantité de polystyrène introduite dans la matrice et sa résistance ?

L'histogramme de la figure ci-dessous présente plusieurs points intéressants il compare tous les mortiers contenant du polystyrène entre eux :

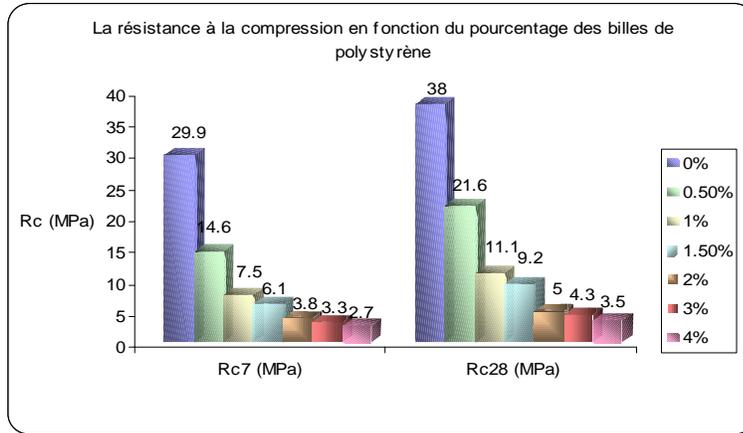


Fig.4.6. Histogramme de la résistance à la compression pour des différents pourcentages de polystyrène

On constate qu’entre 0.5% et 2%, il y a effectivement proportionnalité

- Si on double le dosage de polystyrène, on réduit de moitié la résistance.
- Par contre, ceci n’est plus valable en dépassant le seuil de 2% la différence de résistance entre un mortier à 2% et un autre à 4% est très faible [il n’y a plus alors de réduction de moitié de la résistance lorsqu’on double le dosage en polystyrène].

Ceci est nettement visible sur la courbe de la figure.4.7.suivante qui montre très bien la saturation qui apparaît au-delà de 2% de polystyrène.

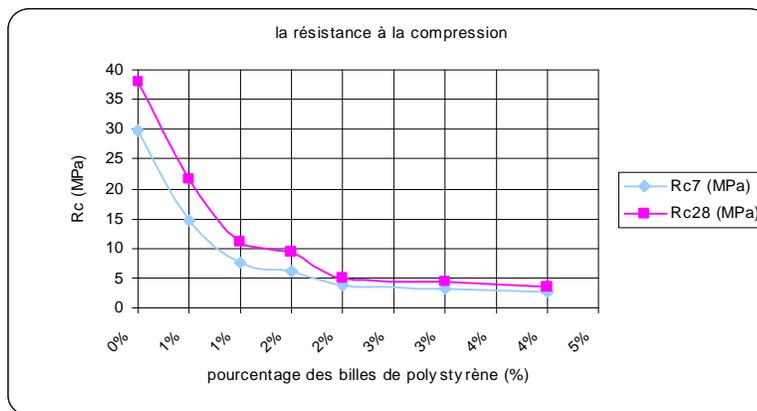


Fig.4.7.Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène

On peut dire que les résistances sont proportionnelles au cours du temps.

Le mortier contenant un certain pourcentage de polystyrène résistera toujours d’une certaine proportion par rapport au témoin.

- Un mortier à 0.5% de polystyrène résiste à environ 2/3 du mortier témoin ;
- Un mortier à 1% de polystyrène résiste à environ 1/3 du mortier de référence ;
- Un mortier de 2% à 4% de polystyrène résiste à environ 1/10 du mortier sans polystyrène.

Ceci constate quel que soit l'âge du mortier, et confirme l'hypothèse que le polystyrène n'influe pas sur l'évolution de la résistance au cours du temps [c'est à dire ne perturbe pas le durcissement]

La présence du polystyrène dans le mortier lui confère une modification de la rupture.

Nous avons constaté, lors de l'écrasement des différents mélanges que les éprouvettes ne cassaient pas du tout de la même manière.

L'apparition du cône de rupture est présenté dans tous les mortiers de référence, mais elle est de plus discret lorsqu'on augmente le dosage en polystyrène et très rarement à fort dosage.

Un autre point très significatif, le mortier témoin " explose " tandis que les autres mortiers contenant du polystyrène ont plutôt une rupture interne, moins visible externe. On peut dire que la présence du polystyrène modifié l'endommagement des matrices cimentaires en donnant une certaine cohésion et une souplesse à la ruine.

4.2.6.2. Résistance à la flexion sur éprouvettes prismatiques :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant tableau.4.7.

TABEAU .4.7. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA FLEXION SUR EPROUVETTES PRISMATIQUE 7X7X28 CM							
	0 %	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %	3 %	4 %
Rt7 (Mpa)	5.1	2.99	3.0	2.6	2.2	1.6	0.95
% Rt7 / Témoin	100 %	57.8%	58.8%	51%	43.1%	31.4%	18.6%
Rt28 (Mpa)	6.2	4.0	3.7	3.2	2.6	2.0	1.2
% Rt28 / Témoin	100 %	64.5%	59.7%	54.6%	41.9%	32.3%	19.4%

Les courbes de la figure ci dessous (fig.4.8) montre et confirme que l’ajout de polystyrène engendre une diminution de la résistance des mortiers.

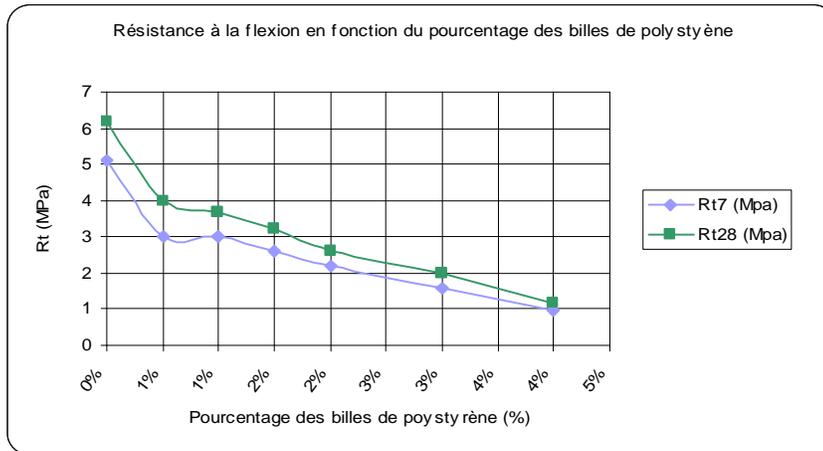


Fig.4.8.Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène

Cette figure ne fait pas apparaître le seuil qui existait à partir de 2% pour la compression.

L'évolution de la résistance en flexion est moins accentuel que pour la compression.

L'histogramme de la figure suivante fig.4.9. montre que le polystyrène à moins d'influence en flexion qu'en compression.

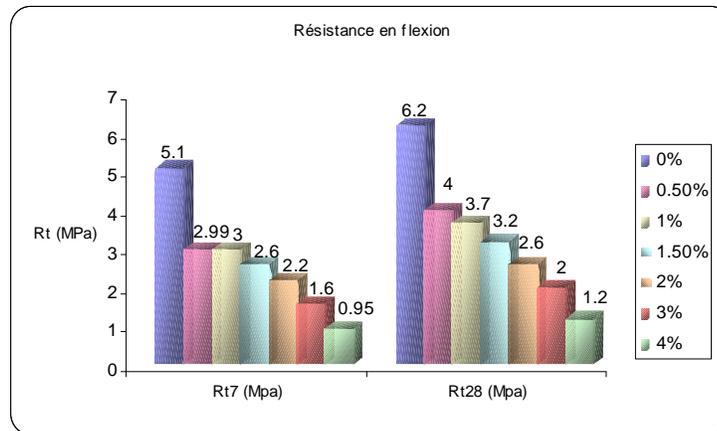


Fig.4.9. Histogramme de la résistance à la traction par flexion pour des différents pourcentages de polystyrène

Ces résultats peuvent être très intéressants selon l'emploi du matériau élaboré.

En effet, lorsqu'un mortier à 2 % avait une résistance à la compression que de 1/10 du mortier témoin, il en aura en flexion 4/10 c'est à dire quatre fois plus.

Pour expliquer cette différence de comportement entre l'influence du polystyrène en compression ou en flexion, il faut faire le lien entre le mode de rupture selon qu'il contient du polystyrène ou non.

En effet, nous avons constaté qu'en compression, les éprouvettes contenant du polystyrène n'explosaient pas contrairement à celles du témoin.

Nous avons signalé une certaine cohésion de la matrice due à l'adhérence entre la pâte de ciment et les billes. C'est cette même adhérence qui est utile à la flexion et qui permet de garder des proportions de résistance plus élevées qu'en compression malgré la présence de polystyrène.

4.2.7. Bilan :

Nous avons mis en évidence les effets de l'introduction du polystyrène dans les matrices cimentaires.

- une chute de résistance était prévisible, car le polystyrène réduit la surface résistance d'une section. Il consiste à fabriquer un mortier plein de poches d'air qui n'ont aucune résistance ;
- Un seuil est observé, qui est atteint pour dosage de 2 %, où l'évolution de la résistance à la compression diminue ;
- Un comportement très différent entre les sollicitations de compression et de flexion ;
- Modification de l'endommagement ;
- En faisant une analogie avec les résistances obtenus lors des essais de résistance à la compression, nous constatons que les paliers (seuils) sont identique à ceux des masses volumiques apparentes, il y a donc une corrélation entre les deux caractéristiques ;
- La chute de la résistance à la compression du mortier s'explique par la diminution de sa masse volumique due au chargement de la structure interne du mortier.

*Résultats et discussions d'un
mortier renforcé
de copeaux d'acier*

4.3. Etude de l'influence des fibres "copeaux d'acier" sur les performances des mortiers :

4.3.1. introduction :

L'une des caractéristiques les plus importante à étudier dans notre recherche est en effet les performances mécaniques.

Il est très important de connaître la résistance du mortier à différents âges. Car il faut être capable de déterminer l'évolution de ces caractéristiques au cours du temps afin de pouvoir la résistance d'un mortier au l'instant "t".

Dans ce sens, nous effectués une série d'essais de résistance à la compression et à la traction par flexion.

Ainsi, nous avons réalisés des essais à 7 et 28 jours.

4.3.2. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

TABLEAU .4.8. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR EPROUVETTES 16X32 CM			
	0 %	1 %	2 %
Rc7 (Mpa)	29.9	24.31	27.73
% Rc7 / Témoin	100 %	81.30 %	92.7 %
Rc28 (Mpa)	38.00	35.83	36.27
% Rc28 / Témoin	100 %	94.30 %	95.4 %

Nous constatons que les résistances à la compression sur éprouvettes 16x32 évoluent en fonction du temps. Elles atteignent plus de 70 % de sa résistance finale à 7 jours et ce quel que soit la composition considéré .

On peut dire que les fibres de copeaux d'acier n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. On remarque une diminution, ce qui explique que la fibre crée des défauts supplémentaires à l'interface fibre-matrice qui peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc la charge maximale.

Nous allons procéder en exploitant ces résultats par une série d'histogrammes et de courbes. En signalant qu'il est très important de se référer à ce tableau en parallèle de ces histogrammes et courbes surtout quand il s'agit de constater des différences de valeurs ou pour des proportions.

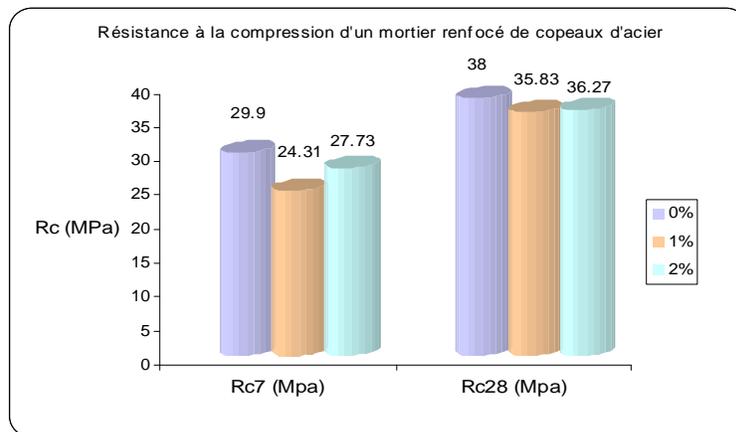


Fig.4.10. Résistance à la compression d'un mortier renforcé de copeaux d'acier

La figure 4.10. montre l'influence des copeaux d'acier sur la résistance à la compression pour les différentes échéances. On constate que l'introduction de 1% de copeaux d'acier diminue la résistance à la compression d'environ 70 % par rapport au mortier témoin. Par contre, on constate malgré la présence de copeaux d'acier que le mortier est de plus en plus résistant avec le temps. On peut dire que les copeaux d'acier n'ont pas d'influence significative sur l'évolution de la résistance du mortier au cours du temps.

A 2% de copeaux d'acier, on constate une légère augmentation de la résistance à la compression par rapport au mortier à 1%. Ceci confirme le fait que les copeaux d'acier ont une influence importante sur la résistance du mortier et que plus le pourcentage est important, plus l'influence est grande.

Donc on constate que la présence des fibres dans la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes.

Ainsi que la présence des copeaux d'acier dans le mortier lui confère une modification de la rupture.

4.3.3. résistance à la traction par flexion

Tableau.4.9. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA FLEXION SUR EPROUVETTES PRISMATIQUE 7X7X28 CM			
	0 %	1 %	2 %
Rt7 (Mpa)	5.1	5.35	4.93
% Rt7 / Témoin	100 %	104.90 %	96.66 %
Rt28 (Mpa)	6.2	7.19	6.77
% Rt28 / Témoin	100 %	115.37 %	109.19 %

Les courbes de la figure ci dessous (fig.4.11) montre et confirme que l’ajout de copeaux d’acier engendre une augmentation de la résistance en flexion des mortiers. Cette amélioration est importante pour un dosage de fibres égal à 1% et elle se rapproche au mortier témoin pour un dosage de fibres égal à 2% .

Par contre, malgré la présence des copeaux d’acier le mortier est de plus en plus résistant avec le temps.

Ainsi, que malgré l’augmentation de pourcentage de fibres " copeaux d’acier " à 2% on observe une diminution de résistance en flexion par rapport au mortier à 1% de fibres.

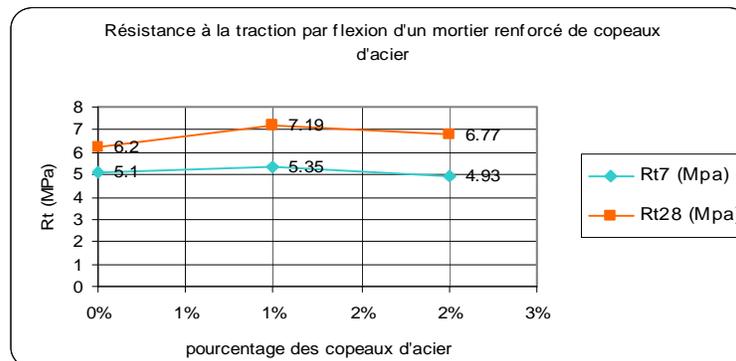


Fig.4.11. courbes de la résistance à la traction par flexion d’un mortier renforcé de copeaux d’acier

L 'histogramme ci-dessous de la fig.4.12. montre que les copeaux d'acier ont une influence en flexion importante qu'en compression.

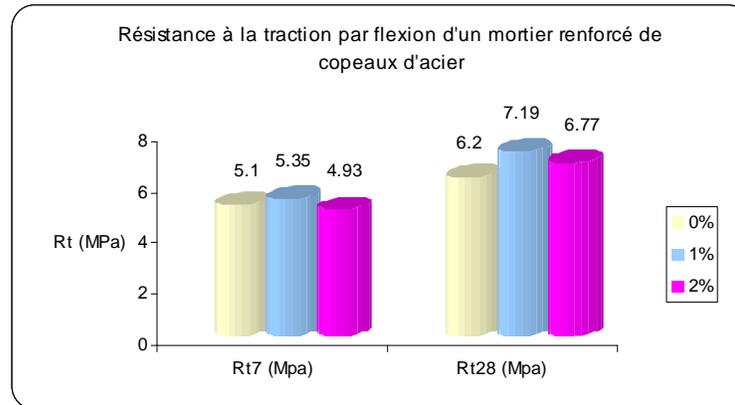


Fig.4.12. Histogrammes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux d'acier

On trouve que la présence des fibres de copeaux d'acier augmente fortement la résistance à la flexion, cette augmentation est de l'ordre 115 % à 1% de fibres c'est à dire 1.15 fois par rapport au témoin.

Donc, les fibres modifient le mécanisme d'endommagement.

4.3.4. Bilan :

Nous avons mis en évidence les effets de l'introduction de copeaux d'acier dans les matrices cimentaires.

- On observe pour un dosage de 2% de fibres " copeaux d'acier", une évolution de la résistance à la compression qui augmente par rapport à 1% de fibres .
- Un comportement très différent entre les sollicitations de compression et de flexion.
- Modification de l'endommagement.
- D'après l'augmentation de la résistance à la compression de mortier de fibres de copeaux d'acier on conclut que la présence des fibres la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes.
- Ainsi, que la rupture fragile caractéristique du mortier sans fibres n'est plus observé en présence des fibres.

*Résultats et discussions d'un
mortier renforcé
de copeaux de bois*

4.4. Etude de l'influence des fibres "copeaux de bois" sur les performances des mortiers :

4.4.1. introduction :

L'une des caractéristiques les plus importante à étudier dans notre recherche est en effet les performances mécaniques.

Il est très important de connaître la résistance du mortier à différents âges. Car il faut être capable de déterminer l'évolution de ces caractéristiques au cours du temps afin de pouvoir la résistance d'un mortier au l'instant "t".

Dans ce sens, nous effectués une série d'essais de résistance à la compression et à la traction par flexion.

Ainsi, nous avons réalisés des essais à 7 et 28 jours.

4.4.2. Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

TABLEAU .4.10. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR EPROUVETTES 16X32 CM			
	0 %	1 %	2 %
Rc7 (Mpa)	29.9	9.37	5.73
% Rc7 / Témoin	100 %	31.34 %	19.16 %
Rc28 (Mpa)	38.00	13.57	7.28
% Rc28 / Témoin	100 %	35.71 %	19.16 %

Nous constatons que les résistances à la compression sur éprouvettes 16x32 évoluent en fonction du temps. Elles atteignent plus de 30 % de sa résistance finale à 7 jours et ce quel que soit la composition considéré .

On peut dire que les fibres de copeaux de bois n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. On remarque une diminution, ce qui explique que la fibre crée des défauts supplémentaires à l'interface fibre-matrice qui peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc la charge maximale.

Nous allons procéder en exploitant ces résultats par une série d'histogrammes et de courbes. En signalant qu'il est très important de se référer à ce tableau en parallèle de ces histogrammes et courbes surtout quand il s'agit de constater des différences de valeurs ou pour des proportions.

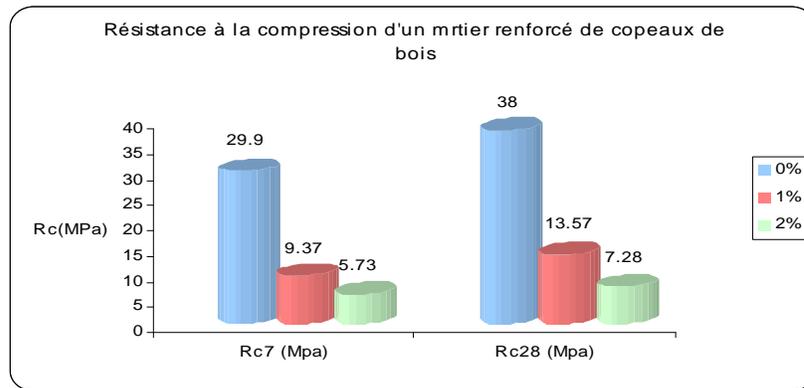


Fig.4.13. Résistance à la compression d'un mortier renforcé de copeaux de bois

La figure 4.13. montre l'influence des copeaux de bois sur la résistance à la compression pour les différentes échéances. On constate que l'introduction de 1% de copeaux de bois diminue la résistance à la compression d'environ 35% par rapport au mortier témoin. Par contre, on constate malgré la présence de copeaux de bois que le mortier est de plus en plus résistant avec le temps. On peut dire que les copeaux de bois n'ont pas d'influence significative sur l'évolution de la résistance du mortier au cours du temps.

A 2% de copeaux de bois, on constate une diminution de la résistance à la compression encore plus forte que pour le mortier à 1%. Ceci confirme le fait que les copeaux de bois ont une influence très importante sur la résistance du mortier et que plus le pourcentage est important, plus l'influence est grande.

Une question s'impose : y'a-t-il proportionnalité entre la quantité de fibres de copeaux de bois introduite dans la matrice et sa résistance ?

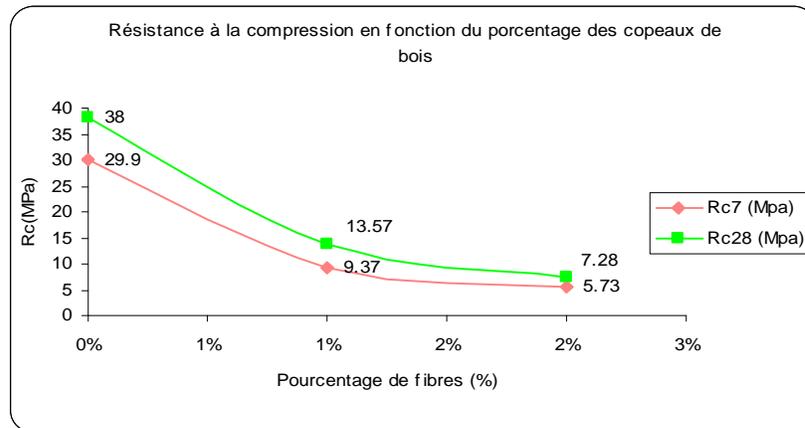


Fig.4.14. Résistance à la compression d'un mortier renforcé de copeaux de bois en fonction du pourcentage de fibres

D'après la fig.4.14 il est nettement visible qu'il y'a une proportionnalité entre la quantité de copeaux de bois introduite dans la matrice et sa résistance et la fig ci-dessus montre bien la saturation qui apparaît au-delà de 2% de copeaux de bois.

On peut dire donc que les résistances sont proportionnelles au cours du temps.

Le mortier contenant un certain pourcentage de copeaux de bois résistera toujours d'une certaine proportion par rapport au témoin.

- un mortier à 1 % de copeaux de bois résiste à environ 1/3 du mortier témoin ;
- un mortier à 2 % de copeaux de bois résiste à environ 1/10 du mortier de référence.

Ceci se constate quel que soit l'âge du mortier et confirme l'hypothèse que les copeaux de bois n'influe pas sur l'évolution de la résistance au cours du temps (c'est à dire ne perturbe pas le durcissement).

La présence de copeaux de bois dans le mortier lui confère une modification de la rupture.

Nous avons constaté, lors de l'écrasement des différents mélanges que les éprouvettes ne cassaient pas du tout de la même manière.

L'apparition du cône de rupture est présentée dans tous mortiers de référence, mais elle est de plus en plus discret lorsqu'on augmente le dosage en copeaux de bois et très rarement à fort dosage.

Un autre point très significatif, le mortier témoin "explose" tandis que les autres mortiers contenant de copeaux de bois ont plutôt une rupture interne, moins visible externe. On peut dire que la présence de copeaux de bois modifie l'endommagement des matrices cimentaires en donnant une certaine cohésion et une souplesse à la ruine.

4.4.3. résistance à la traction par flexion

Tableau.4.11. RESULTATS DE LA RESISTANCE A LA FLEXION SUR EPROUVETTES PRISMATIQUE 7X7X28 CM			
	0 %	1 %	2 %
Rt7 (Mpa)	5.1	2.63	2.01
% Rt7 / Témoin	100 %	51.57 %	39.41 %
Rt28 (Mpa)	6.2	3.09	1.98
% Rt28 / Témoin	100 %	49.83%	31.93 %

Les courbes de figure ci-dessous fig.4.15 montre et confirme que l'ajout de copeaux de bois engendre une diminution de la résistance des mortiers.

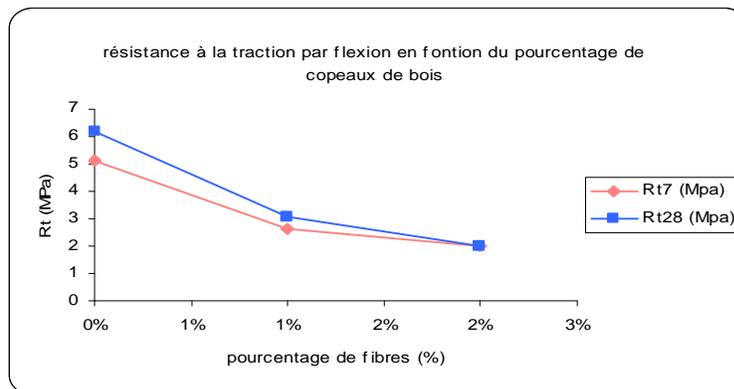


Fig.4.15. courbes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux de bois en fonction du pourcentage de fibres

Cette figure ne fait pas apparaître le seuil qui existait à partir de 2% pour la compression l'évolution de la résistance en flexion est moins accentuée que pour la compression.

L'historgramme de la figure suivante fig.4.16. montre bien que les copeaux de bois ont moins d'influence en flexion qu'en compression

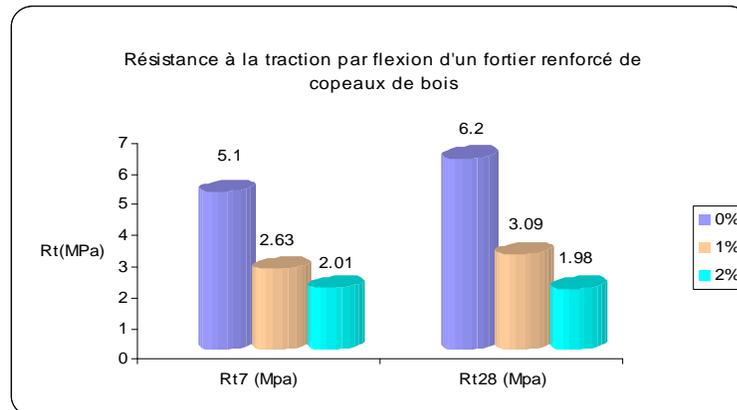


Fig.4.16.Histogrammes de la résistance à la traction par flexion d'un mortier renforcé de copeaux de bois

Ces résultats peuvent être très intéressants selon l'emploi du matériau élaboré.

En effet, lorsqu'on un mortier à 2% avait une résistance à la compression que de 1/10 du mortier témoin, il en aura en flexion 3/10 c'est à dire trois fois plus.

Pour expliquer cette différence de comportement entre l'influence de copeaux de bois en compression ou en flexion, il faut faire le lien entre le mode de rupture du mortier selon qu'il contient de copeaux de bois ou non. En effet, nous avons constaté qu'en compression, les éprouvettes contenant de copeaux de bois n'explosaient pas contrairement à celles du témoin. Nous avons signalé une certaine cohésion de la matrice due à l'adhérence entre la pâte de ciment et les copeaux, c'est cette même adhérence qui est utile à la flexion et qui permet de garder des proportions de résistance plus élevées qu'en compression malgré la présence de copeaux de bois.

4.4.4. Bilan :

Nous avons mis en évidence les effets de l'introduction de copeaux de bois les matrices cimentaires.

- une chute de résistance était prévisible, car les copeaux de bois réduit la surface résistance d'une section. Il consiste à fabriquer un mortier plein de poches d'air qui n'ont aucune résistance.
- Un seuil est observé, qui est atteint pour un dosage de 2%, où l'évolution de la résistance à la compression diminue.
- Un comportement très différent entre les sollicitations de compression et de flexion.
- Modification de l'endommagement.
- La chute de la résistance à la compression du mortier s'explique par la diminution de sa masse volumique due au changement de la structure interne du mortier

*INFLUENCE DE LA NATURE DE
FIBRES
SUR
LES PERFORMANCES
MECANIQUES*

4.5. Influence de la nature des fibres sur les performances mécaniques des mortiers :

4.5.1. Dosage de fibres 1 % en masse :

4.5.1.1. L'influence sur la résistance à la compression :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant tableau 4.12.

TABLEAU.4.12 INFLUENCE DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION				
	<i>M</i>	<i>MP10</i>	<i>MC10</i>	<i>MB10</i>
<i>Rc7 (Mpa)</i>	29.9	7.5	24.31	9.37
<i>Rc28 (Mpa)</i>	38	11.1	35.83	13.57

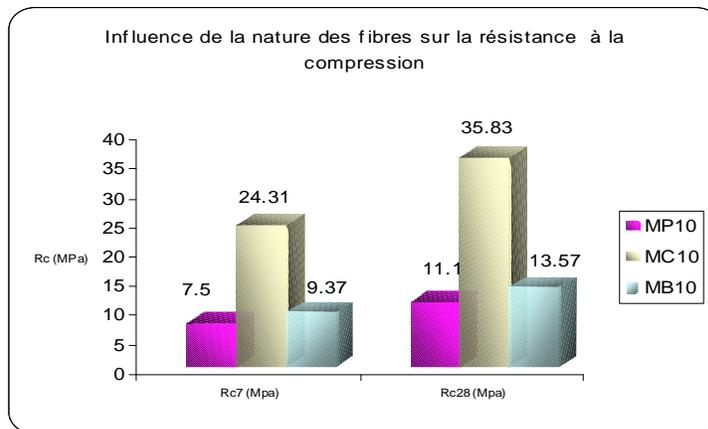


Fig.4.17. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 1% en masse

On constate, d'après les résultats obtenus, pour une teneur de 1% de fibres, l'ordre de classement reste inchangé, quelque soit l'échéance.

Les meilleurs performances sont obtenues avec les mélanges renforcés de fibres de copeaux d'acier.

A 7 jours ; on obtient :

Un gain de 61 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 50% par rapport aux fibres de copeaux de bois

A 28 jours ; on obtient :

Un gain de 59 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 57% par rapport aux fibres de copeaux de bois

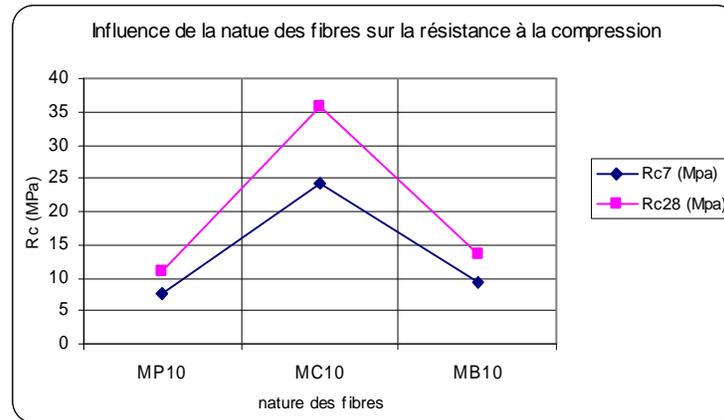


Fig.4.18. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 1% en masse

Par contre, les plus faibles résistances mécaniques (Rc) sont obtenues avec les mélanges renforcés de fibres de billes de polystyrène comme illustré sur la figure. 4.18

4.5.1.2.L'influence sur la résistance à la traction par flexion :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant tableau 4.13.

TABLEAU.4.13 INFLUENCE DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION				
	<i>M</i>	<i>MP10</i>	<i>MC10</i>	<i>MB10</i>
Rt7 (Mpa)	5.1	3	5.35	2.63
Rt28 (Mpa)	6.2	3.7	7.19	3.09

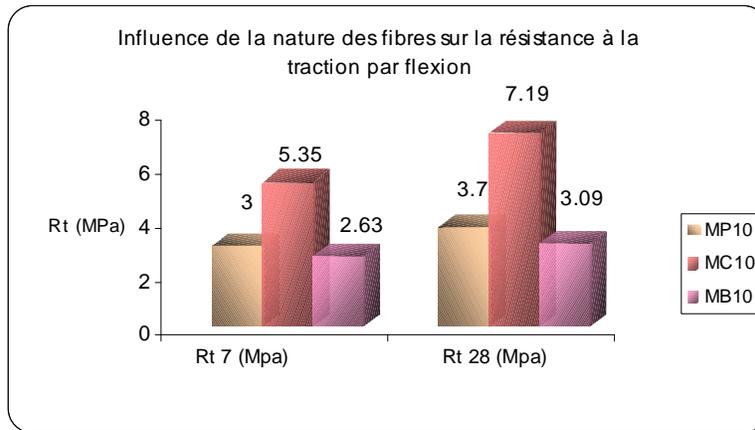


Fig.4.19. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 1% en masse

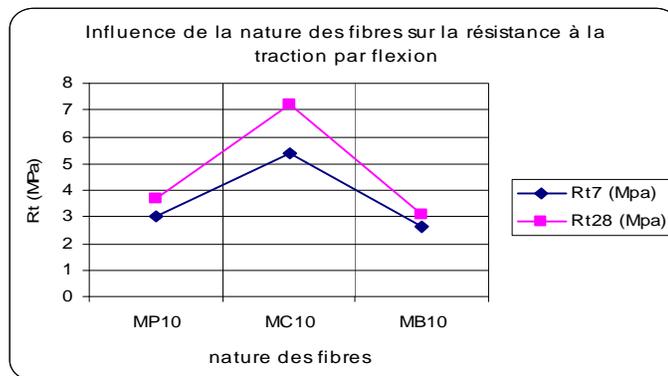


Fig.4.20. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 1% en masse

On constate, d'après les résultats obtenus, pour une teneur de 1% de fibres l'ordre de classement, n'est pas le même par rapport à la compression.

Les meilleurs performances sont obtenues avec les mélanges renforcés de fibres de copeaux d'acier.

A 7 jours ; on obtient :

Un gain de 46 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 54% par rapport aux fibres de copeaux de bois

A 28 jours ; on obtient :

Un gain de 56 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 66% par rapport aux fibres de copeaux de bois

4.5.2.Dosage de fibres 2 % en masse :

4.5.2.1.L'influence sur la résistance à la compression :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant tableau 4.14.

TABLEAU.4.14 INFLUENCE DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION				
	<i>M</i>	<i>MP20</i>	<i>MC20</i>	<i>MB20</i>
<i>Rc7 (Mpa)</i>	29.9	3.8	27.73	5.73
<i>Rc28 (Mpa)</i>	38	5	36.27	7.28

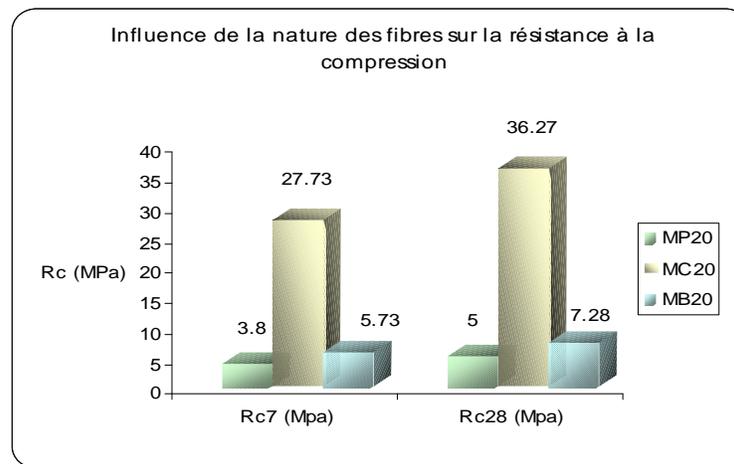


Fig.4.21. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 2% en masse

On constate, d'après les résultats obtenus, pour une teneur de 2% de fibres, l'ordre de classement reste inchangé par rapport aux mélanges ont un taux de fibres égal à 1% ,et quelque soit l'échéance.

Les meilleures performances sont obtenues toujours avec les mélanges renforcés de fibres de copeaux d'acier.

D'où à 7 jours ; on obtient :

Un gain de 80 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 75% par rapport aux fibres de copeaux de bois

A 28 jours ; on obtient :

Un gain de 79 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 77% par rapport aux fibres de copeaux de bois

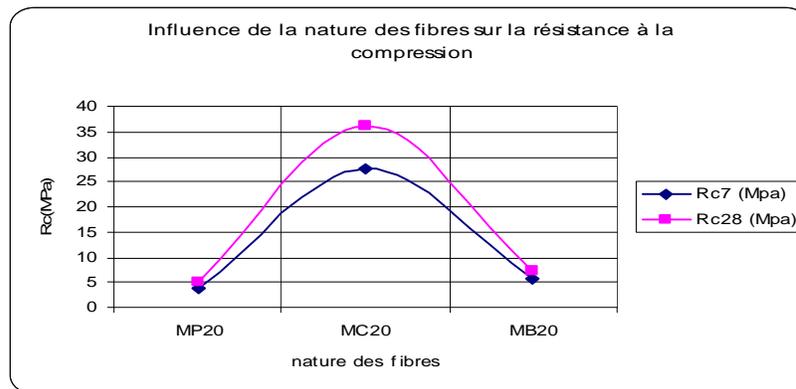


Fig.4.22. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la compression pour un dosage 2% en masse

les plus faibles résistances mécaniques (Rc) restent toujours obtenues avec les mélanges renforcés de fibres de billes de polystyrène comme illustré sur la figure. 4.22

On remarque que la teneur de 1 % représente l'optimum concernant les mélanges renforcés de fibres de copeaux de bois et renforcés de billes de polystyrène, d'où une diminution de la Rc est constaté à 2%.

Par contre à ce seuil de 1%, les mélanges renforcés de copeaux d'acier, continus à s'améliorer à des taux plus élevés. Le seuil de 2% représente l'optimum, où on obtient les meilleures performances.

4.5.2.2.L'influence sur la résistance à la traction par flexion :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant tableau 4.15.

TABLEAU.4.15 INFLUENCE DE LA NATURE DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION				
	M	MP20	MC20	MB20
Rt7 (Mpa)	5.1	2.2	4.93	2.01
Rt28 (Mpa)	6.2	2.6	6.77	1.98

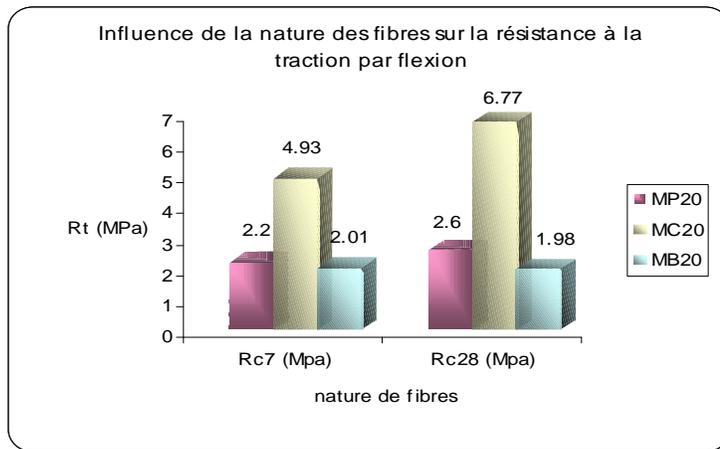


Fig.4.23. Histogramme représente l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 2% en masse

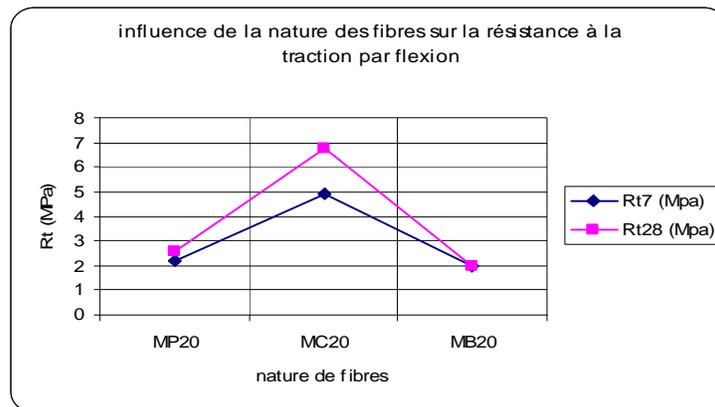


Fig.4.24. courbes représentent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction par flexion pour un dosage 2% en masse

On constate, d'après les résultats obtenus, pour une teneur de 2% de fibres, l'ordre de classement reste inchangé par rapport aux mélanges ont un taux de fibres égal à 1% ,et quelque soit l'échéance.

Les meilleurs performances sont toujours obtenues avec les mélanges renforcés de fibres de copeaux d'acier.

D'où à 7 jours ; on obtient :

Un gain de 52 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 57% par rapport aux fibres de copeaux de bois

A 28 jours ; on obtient :

Un gain de 68 % par rapport aux billes de polystyrène et un gain de 77% par rapport aux fibres de copeaux de bois

D'après l'histogramme on obtient aussi un gain de 10% par rapport à une teneur de fibres égale à 1% .

Ceci confirme que les seuils de différents renforts varies selon la nature des fibres :

- Pour les copeaux de bois et les billes de polystyrène c'est 1%.
- Pour les copeaux d'acier c'est 2%.

4.5.3. Bilan :

nous avons mis en évidence les effets de l'introduction de différentes natures de fibres dans les matrices cimentaires :

- Les meilleures performances mécaniques (résistance à la compression et à la traction par flexion) sont obtenues toujours avec les mélanges renforcés de fibres de copeaux d'acier quelque soit le taux de fibres.
- Les plus faibles résistances mécaniques (résistance à la compression) sont obtenues avec les mélanges renforcés de billes de polystyrène. Par contre, les plus faibles résistances mécaniques (résistances à la traction par flexion) sont obtenues avec les mélanges renforcés de copeaux de bois.
- Pour la résistance à la compression l'ordre de classement reste inchangé quelque soit le taux de fibres
- Pour la résistance à la traction par flexion l'ordre de classement est aussi inchangé quelque soit le taux de fibres.
- Par contre, l'ordre de classement de la résistance à la traction par flexion se change par rapport à la résistance à la compression.
- Le seuil de 2% représente l'optimum concernant les mélanges renforcés de copeaux d'acier où on obtient les meilleures performances.
- La teneur de 1% représente l'optimum concernant les mélanges renforcés de copeaux de bois et renforcés de billes de polystyrène, d'où une diminution de la résistance à la compression et à la traction par flexion est constatée à 2% donc les seuils de différents renforts varient selon la nature des fibres :

* Pour les copeaux de bois et les billes de polystyrène c'est 1%.

* Pour les copeaux d'acier c'est 2%.

-
- Le gain de la résistance à la compression pour une teneur de fibres égale à 2% est de 20% par rapport à une teneur de fibres égale à 1% .
 - Le gain de la résistance à la traction par flexion pour une teneur de fibres égale à 2% est de 10% par rapport à une teneur de fibres égale à 1% .
 - Donc le gain de la compression est 2 fois plus que de la traction par flexion.

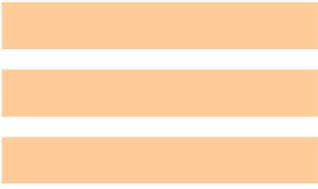
4.6.Conclusion :

Nous avons mis en évidence les effets de l'introduction de fibres "billes de polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois" dans les matrices cimentaires.

- Une chute de résistance était prévisible pour les mortiers renforcés de polystyrène et de copeaux de bois , car le polystyrène et les copeaux de bois réduisent la surface résistance d'une section. Il consiste à fabriquer un mortier plein de poches d'air qui n'ont aucune résistance. Par contre, on observe pour un dosage de 2% de fibres " copeaux d'acier", une évolution de la résistance à la compression qui augmente par rapport à 1% de fibres ;
- La chute de la résistance à la compression du mortier s'explique par la diminution de sa masse volumique due au changement de la structure interne du mortier
- D'après l'augmentation de la résistance à la compression de mortier de fibres de copeaux d'acier on conclut que la présence des fibres la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes. Cet effet est dû aux fibres qui continuent à "coudre" les fissure qui se produisent.
- Une perte en poids qui s'accroît respectivement en fonction du pourcentage de polystyrène et de copeaux de bois avec l'âge cela peut mène à des dégâts par le temps sur la construction donc il faut être vigilant pour sont utilisation dans leur domaine d'application à cause de phénomène gel et dégel.
- Un comportement très différent entre les sollicitations de compression et de flexion.
- Modification de l'endommagement.
- La rupture fragile caractéristique du mortier témoin n'est plus observée en présence des fibres.
- Tant que le volume de fibres est relativement important dans notre recherche pour tous les mortiers utilisés, il devient très difficile d'observer des affaissements

significatifs de renforcé de fibres c'est pour cette raison on a utilisé le maniabilimètre et non pas le cône d'Abrams pour mesuré l'ouvrabilité des mortiers.

- La nature des fibres influe sur les performances mécaniques des mortiers où le mortier renforcé de copeaux d'acier ayant un comportement qui se rapproche au comportement mécanique du témoin en plus qu'il résiste bien à la flexion qu'à la compression par rapport aux autres mortier renforcés ou non, d'où Le seuil de 2% représente l'optimum concernant les mélanges renforcés de copeaux d'acier, et la teneur de 1% représente l'optimum concernant les mélanges renforcés de copeaux de bois et renforcés de billes de polystyrène, d'où une diminution de la résistance à la compression et à la traction par flexion est constatée à 2% .



Conclusion générale

Conclusion générale

Le thème traité s'inscrit dans l'axe très général de la valorisation des sous produits . Dans ce domaine, en il existe très peu de travail de recherche à ce sujet localement à l'heure actuelle .

L'amélioration se fait par l'introduction de fibres (polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois) de façon à améliorer les caractéristiques mécaniques du matériaux élaborés

C'est le premier aspect qui est analysé, par l'étude de l'influence du taux de fibres et sa nature

Le domaine de la recherche se limite à l'influence de l'introduction des fibres dans une matrice cimentaire.

Cette contribution est présentée en une thèse, constitue les trois grandes parties, en faisant ressortir l'intérêt des paramètres retenus et leur lien avec la démarche adoptée

L'étude d'un mortier consiste souvent à rechercher conjointement deux qualités essentielles, résistance mécanique et l'ouvrabilité. Ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre, quant aux facteurs dont elles dépendent mais elle varie en sens inverse le plus souvent.

Dans cet ordre d'idées, cette recherche se fixe principalement comme objectif de faire une étude sur le comportement des mortiers de fibres (pour la confection de ce matériaux on a utilisé comme fibres billes de polystyrène, copeaux de bois et copeaux d'acier) qui dépend principalement :

- Des propriétés des fibres tel que (polystyrène, copeaux de bois et copeaux d'acier)
- Des propriétés de la matrice
- Des propriétés des interfaces (fibres-matrice).

On a aussi étudié la corrélation entre les différents paramètres retenus dans des conditions suivantes :

- Age de chargement [7], 28jours]
- Mode de conservation identique pour l'ensemble des éprouvettes
- Le rapport E/C constant égal à 0.5
- Même procédure de conception dans toute la chaîne de production : approvisionnement, échantillonnage, caractérisation, formulation, malaxage, remplissage, serrage, conservation et essais ou mesures.

La première partie à caractère bibliographique, expose l'identification et caractérisation des différents bétons renforcés de fibres et l'influence de chaque fibres sur le comportement du béton et leur domaine d'application.

La deuxième partie traite l'identification et la caractérisation des différents matériaux retenus dans le programme expérimental, ainsi la formulation de chaque mélange et présente la méthodologie des essais et les mesures.

La troisième partie présente l'ensemble des résultats obtenus pour les trois types de mortiers avec la variation de leur taux de fibres utilisées, et une étude comparative des caractéristiques mécaniques à plusieurs échéances. L'influence de la variation du taux de fibres sur les propriétés du mortier frais et durci, mais aussi la corrélation entre les différents facteurs.

D'après les résultats on déduit une constatation que la présence des fibres modifie la porosité de la matrice de mortier. Dans notre cas, l'éprouvette avec fibres est plus poreuse que celle sans fibres et que cette porosité augment par l'augmentation du taux de fibres d'une part et de la nature de fibres d'autre part. Ceci rend délicat l'interprétation des essais mécaniques, par référence à la théorie traditionnelle des matériaux composites, dans laquelle les propriétés des matériaux constitutifs peuvent être pris en compte séparément.

Les résultats des essais de compression et de traction par flexion montrent que la résistance en compression et la résistance en traction sont sensibles à la nature de fibres et beaucoup plus au taux de fibres.

Nous avons mis en évidence plusieurs points importants concernant l'influence de l'induction des fibres sur le mortier.

- Dans premier temps, l'effet sur les performances mécaniques.

L'introduction des billes de polystyrène fait diminuer considérablement la résistance, moins un palier à partir de 2% . Ceci a été vérifié avec la masse volumique.

En effet, on peut dire qu'à partir de 2%, qu'il y a une modification de la structure de la matrice. Et la part des billes de polystyrène par rapport à la pâte devient prépondérante. Ce phénomène est observé lors des essais d'écoulement ce qui confirme ce palier de saturation.

- Concernant la masse volumique, nous avons remarqué un gain très intéressant entre le témoin sans fibres et le mélange à 4 % de billes de polystyrène
- L'introduction des billes de polystyrène n'augmente pas la remontée capillaire mais au contraire la fait diminuer. Car, le polystyrène prend une part importante des vides dans le mortier de référence ce qui laisse beaucoup moins de place à l'eau pour remonter.
- Nous avons aussi constaté une diminution de la capacité très importante du mortier à ce mettre en œuvre à partir d'un seuil optimum (2%)

La résistance se développe suivant l'augmentation du taux de fibres pour les mortiers renforcés de copeaux d'acier, par contre pour un mortier renforcé de fibres de polystyrène la résistance se diminue par la l'augmentation de taux de fibres, cela ne mène pour constaté aussi qu'il y a d'autre paramètres qui influent sur la résistance du mortier l'un de ces paramètres l'élanement que notre recherche n'a pas basé effectivement sur ce dernier

*Si l'élanement de fibres est long on aura systématiquement l'augmentation du taux de fibres pour augmenté la résistance en compression

*Si l'élanement de fibres est court on aura systématiquement diminution du taux de fibres pour augmenté la résistance en compression .

Suite aux résultats que nous avons mis en évidence :

Nous savons à présent que le dosage permettant de bénéficier de tous les avantages sans plus perdre trop en résistance et en maniabilité se situe entre 1% et 2% selon la nature de renforcement.

Du fait des caractéristiques trouvées, plusieurs applications peuvent être envisagées pour ce type de mortier.

En effet, ses très bonnes capacités thermiques, son gain de poids permettent de réaliser des chapes, cloisons isolants (tous en allégeant les structures).

De plus, l'imputrescibilité et l'élasticité permet d'absorber les chocs sans les transmettre. Donc un gain acoustique non négligeable.

L'enrobage des fibres confère au mortier une meilleure résistance au feu par rapport aux isolants classiques.

Travaux de recherches suggérés en prolongement :

Nos critères de résistance demandant d'être complétés par l'étude de l'influence des autres paramètres sur cette résistance comme l'élanement de fibres ,l'orientation de fibres, le rapport E/C, la géométrie des fibres et d'autres types de fibres (d'autres natures).....etc. Et aussi d'être complété par d'autres essais qui nous donne le rôle de fibres utilisées sur le mécanisme de fissuration sur l'échelle micromécanique et macromécanique et d'autre étude comme :

- Etude thermique ;
- Durabilité des composites ;
- En fin l' étude économique.



Annexes

nAnnexe :2.1

✓ Les avantages des fibres d'acier dans Les poutres en T inversé précontraintes :

Les avantages supplémentaires sont les suivants :

- vis-à-vis d'une fissuration liée à des contraintes très localisées, il est clair que, si le choix du BFM a été correctement réalisé (pourcentage et longueur de la fibre tout particulièrement), les fibres métalliques sont plus efficaces que les cadres d'effort tranchant ;
- le fait de ne plus avoir aucun acier passif dans l'âme de la poutre permet d'y faire un certain nombre de « trous » de forme souhaitée, notamment dans les parties de la poutre où l'effort tranchant est faible. L'intérêt d'une telle opération est de permettre de faire passer au travers de la poutre, les tuyaux et câbles qui sont inhérents à la construction d'un bâtiment, et par la même de faciliter l'organisation du chantier, et de gagner du temps sur la construction du bâtiment, et par là même de faciliter l'organisation du chantier, et de gagner du temps sur la construction du bâtiment. Il est évident que dans le cadre d'une usine de préfabrication, le percement de ces trous est aisé et automatisable ;
- comme dans le cas des poutres en béton armé, les fibres peuvent contrôler et maîtriser les fissures qui peuvent se créer dans la zone d'enrobage des aciers de précontrainte. Ce faisant, il est tout à fait acceptable d'avoir une poutre précontrainte, initialement dimensionnée pour n'être jamais fissurée, présenter des fissures peu ouvertes, en fibre inférieure. Cette situation peut avoir pour conséquence de permettre à la poutre de changer de classe de vérification en passant de la classe I à la classe II à la classe III.

n *Annexe :2.2*

✓ **Les avantages fibres d'aciers dans les panneaux de façade et plus généralement les élément minces :**

Les avantages supplémentaires sont les suivants :

- Dans le cas d'utilisation des panneaux de façade préfabriqués, les deux étapes délicates sont le transport et la mise en place des panneaux. Lors de ces deux étapes, ce qui est important c'est, d'une part, d'avoir des panneaux les plus légers possibles (tout en respectant les critères de stabilité géométrique), pour faciliter la manutention et transportant le plus de panneaux possible, et, d'autre part, que ces panneaux se comportent bien vis-à-vis des chocs, potentiellement nombreux, qui occasionnent des épaufrures, donc un déchet non négligeable.
- Dans le cas des éléments minces qui sont dimensionnés vis-à-vis de la flexion composée, et des forces concentrées, les BFM sont plus efficaces que dans le cas de toute autre application industrielle. La raison principale en est simple : du fait des rapports longueur de la fibre/épaisseur de l'élément, les fibres ont une orientation préférentielle très forte dans la direction perpendiculaire à cette épaisseur, ce qui induit une efficacité maximale des fibres vis-à-vis des fissures de flexion composée, et de celles générées par les forces concentrées. La distribution des fibres est le plus souvent orthotrope.

n Annexe : 2.3

Polypropylène Fibril F

Fibril F :

est la marque déposée pour un groupe de fibres de polypropylène résistantes aux alcalis et destinées au microrenforcement du béton et des produits liés au ciment.

CARACTERISTIQUES

- Petits paquets de fibres fibrillées, les fibres se détachent sous l'effet abrasif des agrégats

- Résistance à la traction supérieure
- Module d'élasticité élevé
- Très bonne répartition dans la matrice du béton, grâce au revêtement spécial des fibres

- Chimiquement inerte: excellente résistance aux acides et bases

APPLICATION

- Prévention de l'apparition de fissures dans le béton suite aux contractions plastiques et de séchage, (spécialement pour sols industriels et béton routière) par suite de l'augmentation de la résistance à la traction du béton vert.

- Augmentation de la ductilité du béton
- Amélioration de la résistance à l'impact, prévient les dégâts aux bords et coins.
- Diminution de dégâts pendant le transport du béton préfabriqué.
- Permet un décoffrage plus rapide suite à une cohésion améliorée.
- Augmentation de la densité de liquide et par conséquent une résistance améliorée au gel et dégel. La pénétration de sel de salage est enravée.

- Amélioration des caractéristiques anti-feu du béton; pas de giclement des parcelles du béton.

- Réduction d'une éventuelle dissociation prématurée du béton et, par voie de conséquence, de son dégorgeement.

Données Techniques :

MATIERE PREMIERE	POLYPROPYLENE C3H6
Densité	910 kg/m ³
Longueur	12,8 - 19,3 - 38,6 mm
Section	45 x 550 µm
Couleur	Transparent
Tension de rupture	> 300 Mpa
Allongement à la rupture	<11 %
Module d'élasticité (1%)	4 - 5 GPa
Absorption d'humidité	0 %
Temp. d'utilisation max	145 °C

Dosage :

Fibril peut être mélangé dans la bétonneuse centrale ou sur camion toupie sur le chantier, aussi bien avant qu'après l'adjonction d'eau. S'il est ajouté ultérieurement, mélanger pendant 5 minutes.

On peut pomper ou projeter le **Fibril**. Pour empêcher la formation de fissures dans le béton plastique, on dosera 900 grammes de fibres par m³. Dans des applications spécifiques, où on souhaite améliorer la résistance à la flexion et au chocs, on ajoutera de 2 à 5 kg de fibres par m³.

Traitement :

En cas d'ajout de 900 g par m³ (0,1%), il n'y a pas lieu de modifier la composition du béton. En cas de dosage plus important, il y a lieu d'augmenter le facteur E/C de 5 à 10 % pour maintenir la même maniabilité.

Référence et domaine d'utilisation :

Fibril 12 Longueur 12,8 mm

Domaines d'utilisation béton architectural, (béton lavé), mortiers sans retrait, chapes, enduits

Fibril 25 Longueur 19,3 mm

Domaines d'utilisation dallages industriels, parkings, revêtements de routes en béton, réservoirs, piscines, sols de silos à lisier, éléments préfabriqués à cloisons minces (tuyaux en béton, caves, dalles de couverture...)

Fibril 45 Longueur 38,6 mm

Domaines d'utilisation dallages industriels, accotements d'autoroutes

sécurité :

Pas de risques d'ordre écologique, toxicologique ou

de sécurité. Contrairement aux armatures de fibres d'acier, on ne risque pas de se blesser au contact des fibres saillantes. Ces dernières disparaissent après le polissage, mais on peut également les faire fondre à la flamme.

Conditionnement :

Emballage pesé à l'avance :

* Sacs en papier répulable 600 grammes

- 25 sacs par boîte 80 x 40 x 33 cm, net 15 kg

- 18 boîtes par palette 80 x 120 cm, net 270 kg

* Sacs en papier répulable 900 grammes

- 20 sacs par boîte 80 x 40 x 33 cm, net 18 kg

- 18 boîtes par palette 80 x 120 cm, net 324 kg

emballage en vrac :

Boîte 80 x 40 x 33 cm, net 20 kg

- 18 boîtes par palette 80 x 120 cm, net 360 kg

Boîte 120 x 100 x 90 cm, net. 225 kg

- 2 boîtes par palette 80 x 120 cm, net 450 kg

rappports techniques:

“ Influence des fibres de polypropylène sur l'apparition de

fissures de retrait plastiques dans du béton” IBBC TNO B-89-761

“Test d'un type de fibre de PP conformément à la recommandation CUR 42 “ Intron

“ Essais de flexion à déformation asservie sur prismes en béton à base de fibres en polypropylène“ Université de Gent - Labo Magnel

nAnnexe :2.4

Considérations conceptuelles

Il n'est pas possible de remplacer directement l'acier traditionnel pour béton par l'armature en fibre de verre en raison des propriétés mécaniques différentes de ces 2 matériaux.

Le coefficient d'élasticité et la résistance au cisaillement des barres en fibre de verre sont inférieurs à ceux de l'acier et limitent donc les applications.

La fibre de verre présente une élasticité linéaire jusqu'à la rupture et une faible ductilité.

En raison de ce caractère fragile, on utilise des facteurs de sécurité qui limitent la tension de conception par rapport à la résistance à la traction extrême moyenne des barres.

Ces facteurs de sécurité diffèrent suivant la norme appliquée et sont plus élevés que ceux de l'acier.

Lors de la conception du béton pourvu d'une armature traditionnelle, on part du principe que l'acier est le maillon faible et on calcule la quantité maximale d'acier nécessaire pour laquelle le béton ne se casse pas. Une importante flexion et des fissurations peuvent alors être des signes que l'intégrité de l'ensemble est mise en péril.

Lors de l'utilisation d'armature en fibre de verre, on calcule une quantité minimum de GFRP au lieu d'une quantité maximale.

Lorsqu'un élément en béton rompt, le béton constitue le maillon faible et il sera broyé sous pression. Ceci signalera alors la possibilité de formation de grandes déformations, mais la résistance à la traction présente dans l'armature en fibre de verre sera encore suffisante afin d'éviter un effondrement.

Une autre distinction importante réside dans le fait que lors de la conception d'une armature GFRP, la situation limite d'utilisation sera déterminante par rapport à la situation limite extrême. En raison de son coefficient d'élasticité plus faible, des flexions et fissures se formeront plus rapidement. Il s'agit là d'un avertissement supplémentaire qui se produira avant que le béton ne rompe sous la pression, mais qui doit être limité dans la phase de conception par un over-design des barres d'armature en fibre de verre.

Données techniques

Propriétés mécaniques

Adhérence maximale de la barre au béton basée sur des essais d'arrachement : 11,6 MPa

Résistance à la traction : 655 MPa (barre dia. 16)

Résistance au cisaillement : 140 MPa (barre dia. 16)

Coefficient de traction : 40.800 MPa (barre 210.000 MPa)

Coefficient de dilatation : (basé sur ACI 440)

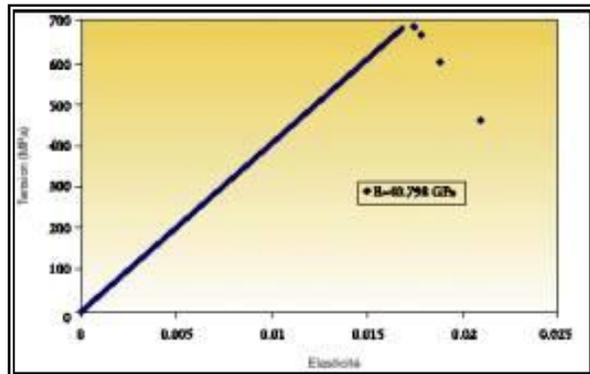
Sens transversal : $21-23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Sens longitudinal : $6-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Dureté” Barcol : min. 60 (ASTM D2583)

Charge fibre de verre par poids : 70% minimum (ASTM D2584)

Poids spécifique : 1,9 g / cm³ (ASTM D792)



Courbe de tension / d'élasticité typique pour le GFRP
(par exemple pour une barre d'un diamètre de 12 mm)

Livraison / types / conservation

L'armature en fibre de verre est livrée en barres d'une longueur de 6 mètres.

Dimensions : diamètres 6, 8, 9, 10, 12, 16, 19, 22, 25, 28 et 32 mm (dérivés des types US#2 à #10).

Coudes standard en stock : 90° en 6 mm, 25 cm de longueur et en 8 mm, 37 cm de longueur

Les armatures en fibre de verre ne peuvent pas être stockées trop longtemps au soleil et ne peuvent être posées sur palettes afin d'éviter qu'elles ne s'encrassent.

Etriers, profils, barres pliées

Les barres pliées en armature de fibre de verre sont produites en préformant les barres en fibre de verre non encore durcies au moyen d'un ensemble de mandrins ou blocs avant que la matrice résineuse ne soit durcie.

Le pliage sur chantier n'est pas possible. Toutes les pièces pliées doivent donc être fabriquées en usine.

On peut également travailler avec des chevauchements ; par exemple, un crochet biais à l'extrémité d'une longue barre d'armature peut être obtenu avec un chevauchement d'une longueur de 40 x le diamètre.

Les étriers peuvent être posés avec un chevauchement de 30 x le diamètre.

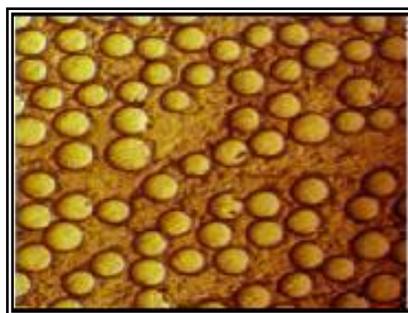
La dimension d'étrier intérieure la plus étroite est de 25 cm.

Les barres pliées en armature de fibre de verre ont une résistance à la traction plus faible que des pièces droites.

Des études ont démontré que la résistance à traction admissible d'une barre pliée s'élève 40% à de celle d'une barre droite.



Section de la barre - 60 x agrandi
Photo : Hughes Brothers



Section de la barre - 240 x agrandi
Photo : Hughes Brothers

Assurance-qualité

L'armature en fibre de verre est produite à l'aide d'une technologie unique et brevetée, garantissant des dimensions constantes dans un processus de qualité contrôlé en permanence.

La résistance à la traction des barres d'armature individuelles est testée régulièrement.

En outre, autres tests de qualité sont faits.

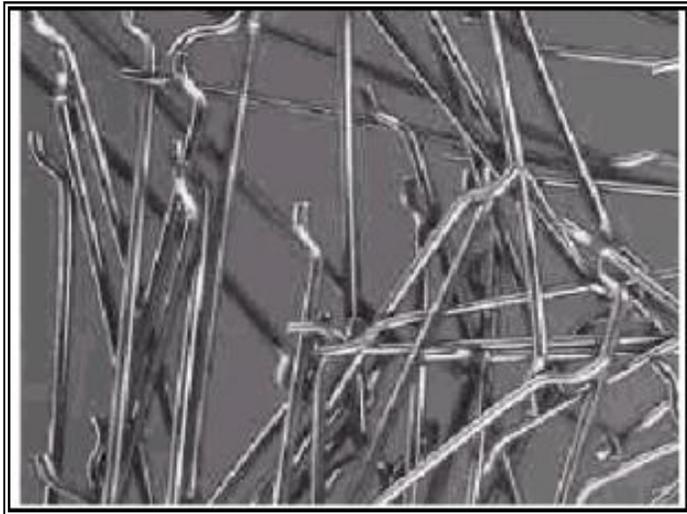
Ces tests concernent :

- le pourcentage de fibre de verre (ASTM D2584)
- la capillarité (espaces creux) (ASTM D5117)
- la dureté Barcol (ASTM D2583)
- la surface de la section (ACI 440-K)
- l'absorption d'eau (ASTM D570)
- le glissement interlaminaire ou glissement à la flexion (ASTM D4475)

n Annexe 2.5

Fatek â â FX

(Fatek ® est la marque déposée d'une gamme de fibres en acier)



PROPRIÉTÉS

Les fibres **Fatek** ® **FX** se composent d'un fil d'acier soumise à une traction importante : elles garantissent ainsi une haute résistance à la traction et des tolérances précises

Les fibres **Fatek** ® **FX** sont de forme circulaire avec des encoches dans la surface de la fibre et sont munies de crochets d'extrémité. Ceux-ci se déforment lentement lors de l'étirement et sont généralement considérés comme les meilleures structures d'ancrage.

APPLICATIONS

- Assure une charge plus élevée du béton normal : surfaces industrielles, éléments de préfabrication, caves étanches, parois tournantes, plateaux de fondation, accroît la portance grâce à une répartition des forces.

- Confère une ductilité élevée au béton.

- Peut remplacer ou réduire les armatures statiques ; peut remplacer les armatures difficiles à poser telles que le béton projeté dans les tunnels.

- Possède un haut pouvoir absorbant des charges dynamiques : accroît la résistance aux chocs.

- Une armature en fibre d'acier posée dans la couche de béton offre une excellente

prévention contre les fissures. Les zones proches de la surface sont également couvertes, ce qui permet d'éviter les dégâts sur les côtés et dans les coins et donc de protéger plus efficacement l'ensemble de la structure.

- Réduit la formation de fissures dues à des changements de température soudains.
- Réduit le nombre des fissures dans les murs incorporés à une surface déjà durcie.
- La structure tridimensionnelle de l'armature en fibre d'acier permet une plus forte

adhérence au béton. Lors du dallage : réduit le temps de pose : pas d'installation de filet nécessaire, ni de bêche, versement immédiat à partir de la bétonnière sans pompe à béton ; réduit fortement les assemblages.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Matière première : Plaque en acier

Contrainte de rupture : 1.100 Mpa

Longueur de la fibre : 50 mm

Diamètre de la fibre : 0,8 mm ou 1mm

Quantité Type 0,80 5.100 par kg

Type 1,00 3.250 par kg

Module d'élasticité 210 MPa

Forme circulaire, avec crochets

d'extrémité

TYPES

Fatek® FX 50 /1,00

Longueur de la fibre l : 50 (± 2) mm

Épaisseur de la fibre d: 1 (± 0,05) mm

Taille l/d : 50

Fatek® FX 50/0,80

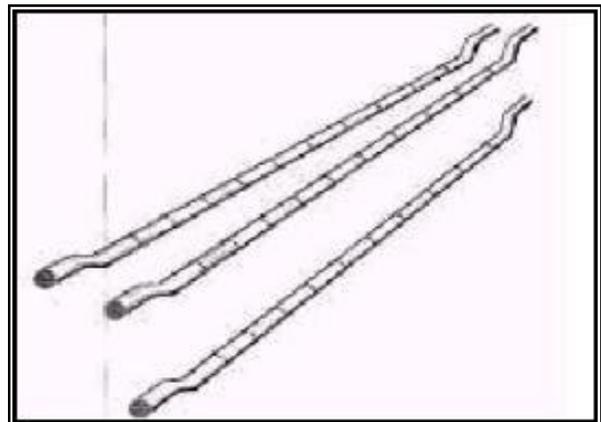
Longueur de la fibre l: 50 (± 2) mm

Largeur de la fibre d: 1 (± 0,05) mm

Taille l/d : 62,5

DOSAGE

Les fibres **Fatek** ® **FX** peuvent être préparées dans un malaxeur ou dans une bétonnière ou ajoutées à la main. Ne pas ajouter plus de 25 kg par minute. La durée de mélange est d'au moins 2 minutes par m² de béton.



Les fibres **Fatek** ® **FX** peuvent être aussi bien pompé qu'extrudés.

La bonne proportion des fibres **Fatek** ® **FX** à utiliser est déterminée par un calcul statique ou sur la base des proportions recommandées. Une modification de la consistance du béton peut être balancée uniquement en ajoutant au béton un plastifiant prévu à cet effet.

VALEURS EQUIVALENTES DE LA RESISTANCE AU PLIAGE		
f_{ctm} en MPa en B25		
Nombre de fibres	l/d = 62,5	l/d = 50
20 kg/m ³	1,31	1,52
25	1,97*	1,64
35	2,43	1,90
40	3,22	-
50	3,71	-
80	4,43	-
* = extrapolation		

INSTALLATION

L'armature en fibre d'acier **Fatek** ® **FX** 50/1,00 ou **FX** 50/0,80 peut être posée immédiatement à partir de la bétonnière ou par déversement. En cas de pose du béton au moyen d'une pompe, la teneur maximale en fibres ne doit pas excéder 50 kg/m³. Avant de commencer à pomper, commencez toujours par effectuer plusieurs essais afin de vous assurer du bon déroulement des opérations.

EMBALLAGE

20 kg par seau, 32 seaux par palette = 640 kg

25 kg par boîte, 40 boîtes par palette = 1000 kg

Big Bags sur demande.



*Références
bibliographiques*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **A.C.I COMMITTEE 506.**, "State of the art report on fiber reinforced shotcrete" *Concrete international and Design and construction*, 1984, Vol. 6, N°12, pp.15-27.
- [2] **A.C.I COMMITTEE 544.**, "Measurement of properties of fiber reinforced concrete" *A.C.I Materials Journal*, 1988, Vol. 85, N°6, pp.583-593
- [3] **A.C.I COMMITTEE 544- IR 82.**, " State of the art report on fiber reinforced concrete " *Concrete international*, 1982, Vol. 4, N°5, pp.9-30.
- [4] **ABSI E., NAAMAN A.E.**, " Modèle rhéologique pour les bétons de fibres ", In : *FRC 86 – Developments in the fibre reinforced cement and concrete*, RILEM Symposium, Sheffield, 1986, London, Ed : Swamy – Wagstaffe – Oakley, 1986,6p.
- [5] **ACKER P., EYMARD R.**, " Fluage du béton. Un modèle plus performant et plus simple à introduire dans les calculs numériques ", *Annales Institut Technique Bâtiment Travaux Publics*, 1992, N° 507, Série : Béton 295, pp.58-75 .
- [6] **BALAGURU P., RAMAKRISHNAN.**, " Fiber reinforced concrete properties : Workability –Behavior under long-term loading and Air –Void characteristics", *A.C.I Materials journal*, 1988, Vol.85, N°3, pp.189-196 .
- [7] **BARR B., MOHAMAD NOOR M.R.**, "The toughness index fiber reinforced concrete", *A.C.I Materials journal*, 1985, Sept-Oct., pp.622-629 .
- [8] **BATSON G., JENKINS E.**, "Steel fibers on shear reinforced in beams ", *Inst. of Cement Composites*, 1982, Vol.4, N° 3, 5p .
- [9] **CUYKEN T., VENSTERMANS J.**, "Béton renforcé de fibres d'acier ", Bruxelles, C.S.T.C, *Revue* 1977, N° 3, 11p .
- [10] **DARDARE J.**, " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène ", In : *fibre reinforced cement and concrete*, RILEM

Symposium, 1975, Edited by A. NEVILLE, Lancaster, Construction Press, 1975, pp.227-235, Communication 5.2.

[11] **DEBICKI G J.**, " Contribution à l'étude du rôle des fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement- les critères de résistance et la fissuration du matériau", Thèse d'état : I.N.S.A de Lyon, 1988, 360p.

[12] **DEHOUSE N., LE JEUNE A.**, "Les mortiers et bétons renforcés de fibres", Bruxelles, C.S.T.C, *Revue* 1974, N° 2, 15p .

[13] **DEHOUSE.**, " Méthodes d'essais et caractéristiques mécanique des bétons armés de fibres de polypropylène ", In : *fibre reinforced cement and concrete, RILEM Symposium*, 1975, Edited by A. NEVILLE, Lancaster, Construction Press, 1975, pp.119-136, Communication 4.1.

[14] **DEHOUSE., SALHOUL.**, "Considération relatives au comportement à la fissuration et à la rupture du béton renforcé de fibres", Matériaux et Constructions, 1985, Vol 8, N° 104, pp .83-92

[15] **DURAND G.**, "les bétons à base de fibres d'acier" *CERILH stage* 26-02-1986 N° 6 p6 et *Annales N°347 Février* 1977 pp 48-49 .

[16] **DUPAIN R., LANCHON R.**, "Granulats, sols, ciments et bétons " Editions CASTELLA 75005 PARIS 1995, pp. 122-136

[17] **EDGINGTON J., HANNANT D.J., WILLAMS R.I.T.**, "Steel fiber reinforced concrete ", LONDRES: Building Res. Est., July 1974, 17p, Current paper, CP69/74.

[18] **EZELDIN A.S., BALAGURN P.N.**, "Bond performance of reinforced bars embedded in fiber reinforced concrete and subjected to monotonic and cyclic loads", Construction materials serviceability/durability. Fiber reinforced concrete, BOSTON: American Society of Civ . Eng., 1990, pp. 145-154.

[19] **FANELLA D., NAAMAN A.E.**, "Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression ", *A.C.I Journal*, Proceeding, 1985, Vol.82, N°4, pp.475 - 483 .

[20] **GOPALAVATNAN U.S., SHAH S.P.**, "Fracture and impact resistance of steel fiber reinforced concrete ", *Dissertation*, Northwestern University Evanston, U.S.A., June 1985, pp.250 - 343 .

[21] **HANNANT D.J.**, " Fibre cements and fibre concretes" NEX YORK : J. WILEY and SONS, 1978, 219 p.

[22] **Haidar Khalil.**, " approche numérique et essais de micro-structure sur les propriétés de rupture des structures en béton " Thèse de Doctorat : Ecole centrale de NANTES, 6 décembre 2002, 216p.

[23] **HOUARI H., DEBICKI G., CLASTRES P.**, "Flexural creep behaviour of steel fibre reinforced mortar ", *The Third International Conference on Concrete Technology for Developing Countries*, Tripoli, 26-28 October 1993, LIBYA, 10p.

[24] **HOUARI H., DEBICKI G., CLASTRES P.**, "Flexural fatigue performance of metal fibres reinforced mortar ", *The Third Beijing International Symposium on Cement and Concrete* , Beijing , CHINA, October 1993, 7p.

[25] **HOUARI H., DEBICKI G., CLASTRES P.**, "Behaviour of concrete reinforced with metal fibres under cyclic loading ", *Proceedings of the Second International Symposium, TEXTILE COMPOSITES IN BUILDING CONSTRUCTION*, Held in Lyon, franc, June 23-25, 1992, Edited by Hamelin P., Verchery G., PARIS: Editions Pluralis, 1992, Part 1, pp. 57-67

[26] **HOUARI H.**, "contribution à l'étude du comportement béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques ", Thèse de Doctorat : INSA de Lyon 1993, 244p.

[27] **JECIC D., ZANGHELLINE F.**, "Mortiers et ciments armés de fibres ", Etude bibliographique Annales N°347 Février, pp.75-76.

- [28] **JOHNSON C.D.**, "Steel fiber reinforced and plain concrete factors influencing flexural strength measurement ", *A.C.I. Materials Journal*, 1982, Vol. 79, N°2, 12p.
- [29] **JOHNSTON C., ZEMP R.**, "Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete- influence of fiber content- aspect ratio and Type ", *A.C.I. Materials Journal*, 1991, Vol. 88, N°4, pp.374-383.
- [30] **JOHNSTON CD., CARTER P.D.**, "Fiber reinforced concrete and shotcrete for repair and restoration of highway bridges in Alberta", Intern. Symposium on recent Developments in Concrete Fiber Composites, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1989, pp.7-16. TRR N°1226.
- [31] **JOHNSTON CD., GAMBLE B.R., MALHOTRA V.M.**, "Effets of superplasticizers on properties of fresh and hardened concrete ", Washington, D.C.: Transportation Research Board, Dec1979, pp.1-7,. Transportation Research Record N° 720.
- [32] **KADJOUR N.**, " Laboratoire du béton "
- [33] **RAMAKRISHNAN V., OBERLING G., TATNALL P.**, "Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete. ", *In: Fiber reinforced concrete-Properties and applications*, Detroit, American Concrete Institute, 1987, pp. 225-245, SP –105.
- [34] **ROSSI P.**, " Fissuration du béton : du matériau à la structure. Application de mécanique linéaire de la rupture ", *Bull, de liaison, Laboratoire des ponts et chaussées*, 1980, N°150, 30p.
- [35] **ROSSI P.**, " Formulation et comportement mécaniques des bétons de fibres métalliques", *Annales de LITBTB* , N°492, Série : Béton, pp.279 , 1991, pp.90-107.
- [36] **ROSSI P., HARROUCHE N., BELLOC A.**, " Méthodes de composition des bétons de fibres métalliques", *Annales Institut Technique Bâtiment Travaux Publics*, 1989, N°475, Série : Béton, pp.38-44.

[37] **ROSSI P., HARROUCHE N., LEMAOC F.**, " Comportement mécanique des bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton précontraint ", *Annales Institut Technique Bâtiment Travaux Publics*, 1989, Dec., 15p.

[38] **ROSSI P.**, " les bétons de fibres métalliques ", Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1998., pp279-302.

[39] **SACHAN A.K., RAO C.V.S.K.**, " A cone penetration test for workability of fiber reinforced concrete ", *Materials and Structures*, 1989, Vol. 21, N° 126, 448-452.

[40] **SAKAI M ., NAKAMURA N.**, " Analysis of flexural behaviour of steel fibre reinforced concrete ", Technical Research Centre, Nippon Kokan K.K., Japan JCI., Fiber Reinforced concrete Symposium, 1984, Vol. 2, pp. 11-18.

[41] **SERNA ROS P.**, " Etude de contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement ", Thèse Doct. Ing., E.N.P.C. , Paris, 1984, 77 p.

[42] **SHAH S.P., and al.**, " Complete stress-strain curves for steel fibre reinforced concrete in uniaxial tension and compression ", RILEM Symposium 1978, Testing and test method of fiber cement composites, Sheffield 178, Lancaster : Construction Press Ltd., 1978, pp.399-408, communication 7.3.

[43] **SHAH S.P., BATSON G.B.**, " Fiber reinforced concrete: *properties and Application*" Detroit, American Concrete Institute, 1987, 597p., SP –105.

WEBOGRAPHIE

- [44] <http://www.Fortius.com>
- [45] <http://www.bétons renforcé de fibres>
- [46] http://fortius.irc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd_205f.html
- [47] <http://www.hughesbros.com> **FORTIUS BKI sprl Grasbos 50 329 Diest Belgique**
- [48] <http://www.chairs.gc.ca/genie-civil.scola.ac-paris.fr>

Résumé :

Bien qu'étant un matériau de construction le plus utilisé de nos jours, le béton possède néanmoins une propriété très nocive, pour la sécurité des structures (sa fissuration).

Pour tenter de remédier à cet aspect négatif, on a imaginé plusieurs procédés dont celui d'armer le béton par l'intermédiaire de barre d'acier (Béton armé classique).

Un autre procédé consiste à éviter de faire travailler le béton en traction grâce à une compression préalable: c'est le béton précontraint.

A l'inverse du rôle des armatures passives et de précontraints, il existe actuellement une grande variété de matériaux composites.

Le BF est matériau composite certes (mélange de ciment, granulats, eau et fibres), mais qui doit être considéré comme homogène.

Nous nous intéressons plus particulièrement aux problèmes liés à l'élaboration des mortiers de fibres avec plusieurs types de composites.

Cette recherche comporte deux thèmes qui ont un aspect environnement important.

Les travaux seront orientés vers l'utilisation de sous produits industriels dans le mortier ou béton, vu que l'augmentation de la production et les qualités de ces produits occupent une surface assez vaste dans l'enceinte des complexes.

L'objet de ce travail est d'étudier le comportement des mortiers de fibres qui dépend principalement :

• Des propriétés des fibres tels que (polystyrène, copeaux de bois et copeaux d'acier) ;

• Des propriétés de la matrice;

• Des propriétés des interfaces (fibres-matrice).

L'étude se limite à l'influence de l'introduction des fibres dans une matrice cimentaire.

Nous n'avons au départ aucune base de recherche sur ces produits sur laquelle s'appuyer. En effet il existe très peu de travail de recherche à ce sujet localement.

Dans une première partie, sont présentés les principales caractéristiques de ces fibres et leurs domaines d'application.

La seconde partie est consacrée à l'étude de l'effet ou l'influence du pourcentage et de la nature de ces fibres (polystyrène, copeaux de bois et copeaux d'acier) sur le comportement mécanique de la matrice cimentaire.

Le mortier renforcé a donné de résultats raisonnables, ces résultats de ces investigations sont comparés entre eux et à ceux de matériaux usuels classés par le *RILEM*.

Mots clés: Fibre, Contrôle, Techniques, Propriétés, Béton, Structure, Composite, Matériau, Performance, Formulation.

abstract :

Although being one materials of construction the more used nowadays, the concrete possesses a very harmful property nevertheless, for the security of the structures (his cracking).

To tempt to remedy this negative aspect, one imagined several processes of which the one to arm the concrete through the intermediary of rod of steel (classic Reinforced concrete).

Another process consists in avoiding to make work the concrete in traction thanks to a compression previous : it is the Prestressed concrete.

Contrary to the role of the passive armatures and of Prestressed, a big variety of composite materials exists currently.

The fibres concrete is certainly a composite material (mixture of cement, aggregates, water and fibers), but that must be considered like Homogeneous

We are interested more especially in the problems bound to the development of the mortars of fibers with several types of composites.

This research includes two themes that have an aspect important environment.

Works will be oriented toward the use of coins industrial products in the mortar or concrete, since the increase of the production and the qualities of these products occupy a vast enough surface within the complex.

The objective of this work is to study the behavior of the mortars of fibers that depends mainly:

COf the properties of the fibers as (polystyrene, shavings of woods and shavings of steel)

COf the properties of the matrix

COf the properties of the interfaces (fibers-matrix)

The survey limits itself to the influence of the introduction of the fibers in a matrix cimentaire.

We didn't have to the departure any basis of research on these products on which to lean. Indeed it exists very little research work to this topic locally.

In a first part, are presented the main features of these fibers and their domains of application.

The second part is dedicated to the survey of the effect or the influence of the percentage and nature of these fibers (polystyrene, shavings of woods and shavings of steel) on the mechanical behavior of the matrix cimentaire.

The mortar reinforced to given of reasonable results, these results of these investigating are compared between them and to those of usual materials classified by the *RILEM*

Key words : Fiber, Control, Techniques, Properties, Concrete, Structure, Composite, Material, Performance, Formulation,,

ملخص:

- رغم انه من بين المواد الأكثر استعمالا في الوقت الحاضر الخرسانة او خليط إلا ان الأسمنت يملك خصائص مضرّة تتمثل في الشقوق التي تظهر في المباني. لمعالجة هذه الخاصية السلبية ، تصورنا عدة طرق من بينها تسليح الخرسانة بواسطة القضبان الحديدية (الخرسانة المسلحة الكلاسيكية).

طريقة أخرى استعملت تمثلت في تجنب الخرسانة من العمل في الشد بواسطة الضغط المسبق و هي الخرسانة سابقة الجهد.

لكن حاليا يوجد مجال متنوع من المواد المركبة ، الخرسانة و الألياف هي عبارة عن مادة مركبة (خليط الأسمنت ، الرمل ، الماء، الألياف) لكن لا بد ان يعتبر متجانس.

هذا البحث يحوي محورين لهم وجهة جد مهمة ، الأشغال التي تتوجه الى استعمال شوائب المواد الصناعية في الخرسانة او الخليط الأسمنتي ، نظرا لزيادة الإنتاج و الكمية في هاته المواد التي تشغل مساحة جد واسعة في عالم المواد المركبة ، الهدف من هذا العمل هو دراسة مميزات الخليط الأسمنتي و الألياف معا و هو يتعلق اساسا بدراسة :

B خصائص الألياف مثل : (البولستران ، جذاذا الخشب ، شوائب الحديد)

B خصائص خليط الأسمنت

B خصائص الخليط المركب (اسمنت – الياف)

العمل المقدم في هذا البحث يلقي الضوء على مميزات هذه البقايا(البولستران ، جذاذا الخشب ، شوائب الحديد) و مدى تأثير مقدارها [%] وطبيعتها على الخصائص الميكانيكية.

النتائج المتحصل عليها قورنت ببعضها البعض و بعوامل المواد الاعتيادية المصنفة من

طرف الهيئة العالمية لمخابر مواد البناء (RILEM)

كلمات المفتاح : الياف، مراقبة، تقنيات، خصائص، خرسانة ، هيكل، مركب، مادة، تركيبية.