

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de

Magister

Spécialité: **Génie civil**

Option: **Géomatériaux**

Présentée par:

Setti Fatima

Thème

*Comportement mécanique et rhéologique
d'un mortier contenant des fibres métalliques*

Soutenu Publiquement le :

Devant le jury composé de:

Ghrici Mohamed

Professeur (UHB Chlef)

Président

Boukandakji Othmane

MCA (Université de Médéa)

Examinateur

Debièb Farid

MCA (Université de Médéa)

Examinateur

Boulekbache Bensaid

MCB (UHB Chlef)

Examinateur

Ezziane Karim

MCA (UHB Chlef)

Encadreur

Juin 2012

REMERCIEMENTS

Avant tous je tiens à remercier Dieu le tout puissant qui m'a donné la santé et la volonté de réaliser et achever ce travail.

Je tiens à remercier tout d'abord Dr. Ezziane Karim, mon encadreur pour avoir accepté de diriger ce travail avec beaucoup de patience et de présence. Qu'il soit remercié en premier pour sa grande disponibilité, son suivi continu, ses aides utiles, ses discussions fructueuses et ses conseils constructifs et précieux afin d'assurer l'encadrement de mes travaux de recherche.

De même, je remercie monsieur Ghrici Mohamed professeur à l'UHB Chlef, Qui a bien voulu accepter de présider ce Jury, de même messieurs : Dr Boukandakji Othmane Maître de conférences à l'université de Médéa, Dr Debièb Farid Maître de conférences à l'université de Médéa, Dr Boulekbache Bensaid ; Maître de conférences à l'UHB Chlef qui ont bien voulu me faire l'honneur d'examiner ce travail

Je voudrais également adresser mes sincères remerciements à mon père et mon professeur M. Setti Bakhti qui, a été, et est la personne sur qui j'ai pu toujours compter. Je le remercie pour son aide précieuse et pour ses encouragements. La qualité de ses idées m'a permis d'atteindre la finalité de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à mon frère Hichem pour son soutien et surtout pour son aide au laboratoire durant la tâche la plus ardue qui est la confection des éprouvettes.

Je remercie également tous les professeurs de la faculté de génie civil de l'université de Chlef.

Je me permets aussi d'adresser mes remerciements et mes reconnaissances à tous ceux qui ont contribué de façon directe ou indirecte à la réalisation de ce travail. Je souhaiterais dire à tous ceux dont je n'ai pas cité les noms et qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de cette étude de recherche, que je suis grandement sensible à leurs gestes et gentillesse.

Enfin, je m'incline envers ceux à qui je dois l'essentiel, en particulier à ma mère pour son soutien continu et ses sacrifices, à mes sœurs pour leurs encouragements incessants, enfin à tous les membres de la famille pour la confiance et l'intérêt qu'ils ont accordé à mes études et à ma réussite.

A vous tous, du fond du cœur : Merci

Résumé

Le but de ce travail est de quantifier l'effet des fibres métalliques sur le comportement mécanique et rhéologique du béton. A cet effet quatre mélanges ont été utilisés, un béton sans fibres servant de béton témoin, et un béton renforcé contenant trois dosages de fibres métalliques. L'étude expérimentale a été menée sur plusieurs éprouvettes de caractéristiques géométriques adaptées aux essais effectués, (sur béton frais et durci). Les résultats montrent que la résistance à la compression et à la flexion augmente lorsque le taux d'incorporation des fibres augmente, de même une meilleure déformabilité et une amélioration de la résistance à l'abrasion jusqu' au taux optimale de 1% de fibres. La déformation due au retrait du béton est diminuée par la présence des fibres. Les résultats obtenus sont susceptibles d'élargir le champ d'application de ce nouveau matériau.

Mots-clés : *Abrasion, béton, compression, déformabilité, fibres métalliques, retrait, flexion.*

Abstract

The objective of this study is to quantify the effect of steel fibers on the mechanical and rheological behavior of concrete. For this purpose four mixtures was used, a concrete without fibers serving as control concrete, and steel fibers reinforced concrete with three dosages of steel fibers. The experimental study was conducted on several test specimen adapted to the geometric characteristics of the tests, (to fresh and hardened concrete). The results show that the compressive strength and bending increases when The incorporation rate of the fibers increases, with a better deformability and an improvement of the abrasion resistance up to the optimum rate of 1% fiber. The deformation due to shrinkage of concrete is decreased by the presence of fibers. The results are likely to broaden the applications of this new material.

Keywords: *Abrasion, concrete, compression, deformability, steel fibers, shrinkage, flexural strength.*

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد مدى تأثير الألياف المعدنية على السلوك الميكانيكي والريولوجي للخرسانة. لهذا الغرض تم استخدام أربع خلطات، خرسانة بدون ألياف كمرجع للمقارنة، وخرسانة معززة بثلاث تراكيز مختلفة من الألياف المعدنية. وقد أجريت الدراسة التجريبية على عدة أجسام ذات خصائص هندسية تتلاءم وطبيعة الاختبار، (على الخرسانة الطرية والصلبة). و أظهرت النتائج أن قوة الضغط ومقاومة الانحناء تزداد كلما زادت نسبة الألياف في الخرسانة، مع تحسن ملحوظ في مقاومة التآكل حتى معدل 1 ٪ و هي النسبة المثلى من الألياف. انخفاض التشوه الناتج عن انكماش الخرسانة بسبب وجود الألياف. النتائج التي تم الحصول عليها من المرجح أن توسع من مجال تطبيقات هذه المواد الجديدة.

مقاومة

$f_{100} \beta_{100}$

الكلمات الرئيسية، خرسانة،

Liste des Figures

Figure 1.1 : <i>Caractéristiques des fibres</i>	11
Figure 1.2 : <i>Différentes formes géométriques de fibres métalliques</i>	17
Figure 1.3 : <i>Fibres métalliques</i>	18
Figure 1.4 : <i>Illustration de l'apport du renfort par des fibres</i>	21
Figure 1.5: <i>Exemples d'applications du béton de fibres</i>	24
Figure 1.6: <i>Autres utilisations du béton de fibres</i>	27
Figure 2.1: <i>Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre = 40mm</i>	32
Figure 2.2: <i>Temps de vibration Vé-Bé en fonction de la teneur volumique (Vf) en fibres d'acier</i>	33
Figure 2.3: <i>Schéma de disposition des fibres</i>	33
Figure 2.4 : <i>Effet du rapport de l'aspect l/d sur l'ouvrabilité d'un mortier renforcé de fibres</i>	34
Figure 2.5: <i>Effet de fibres incorporées dans un béton sur son affaissement</i>	35
Figure 2.6: <i>Effet de la teneur en fibres de verre sur l'ouvrabilité</i>	35
Figure 2.7: <i>Effet d'écoulement</i>	37
Figure 2.8: <i>Limites technologiques pour la mise en œuvre du béton de fibres d'acier</i>	38
Figure 2.9 : <i>Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres</i>	40
Figure 2.10 : <i>Rôle des fibres dans le processus de fissuration du béton</i>	42
Figure 2.11: <i>Courbe charge –flèche des BFM avec fibres à crochets et droites</i>	43
Figure 2.12 : <i>Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré</i>	44
Figure 2.13 : <i>Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres</i>	46
Figure 2.14 : <i>Augmentation de la résistance de Traction d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction de l'élancement des fibres</i>	47
Figure 2.15: <i>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</i>	49
Figure 2.16: <i>Effet de l'orientation des fibres sur le comportement de bétons de fibres en Flexion</i>	50
Figure 2.17 : <i>Résistance au cisaillement en fonction du dosage en fibres</i>	51

Figure 2.18: <i>Courbe effort- déformation en compression.....</i>	52
Figure 2.19: <i>Courbes effort- déformation en traction.....</i>	52
Figure 2.20: <i>Courbe charge –flèche en flexion.....</i>	52
Figure 2.21: <i>Relation entre la résistance à l’abrasion et la résistance à la compression..</i>	54
Figure 2.22: <i>Retrait libre d’un mortier sans et avec fibres métalliques.....</i>	56
Figure 2.23: <i>Retrait libre d’un mortier sans et avec des fibres de polypropylène.....</i>	56
Figure 3.1: <i>Analyse granulométrique du sable et gravier.....</i>	60
Figure 3.2 : <i>Carrière d’OUED FODDA.....</i>	61
Figure 3.3: <i>Adjuvant utilisé MEDAFLOW 30.....</i>	61
Figure 3.4: <i>Fibres Arcelor Mittal de type HE++ 75/50.....</i>	62
Figure 3.5: <i>Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.....</i>	63
Figure 3.6: <i>Ouvrabilité du béton en fonction du S/G.....</i>	64
Figure 3.7: <i>Fluidité de béton contenant 0.5% de fibre et 1% de superplastifiant.....</i>	65
Figure 3.8 : <i>la balance électronique utilisée.....</i>	66
Figure 3.9 : <i>Malaxeur utilisé.....</i>	66
Figure 3.10 : <i>Cône d’abrams.....</i>	67
Figure 3.11: <i>Remplissage du moule avec le béton frais.....</i>	67
Figure 3.12 : <i>Differents moules utilisées.....</i>	68
Figure 3.13: <i>Cure sous chiffon avant 24h.....</i>	68
Figure 3.14: <i>Bac de conservation après 24h.....</i>	68
Figure 3.15: <i>Dispositif expérimental pour l’essai de traction par flexion.....</i>	69
Figure 3.16: <i>Presse à l’essai d’ecrasement.....</i>	70
Figure 3.17: <i>Résistance à la compression sur cube d’un demi-prisme.....</i>	71
Figure 3.18: <i>Différentes échelles utilisées pour un seul type de béton.....</i>	72
Figure 3.19: <i>Presse CBR manuelle utilisé pour essai de déformabilité.....</i>	73
Figure 3.20: <i>Exemple d’echantillant resultan.....</i>	73
Figure 3.21: <i>Tronçonneuse utilisée.....</i>	73
Figure 3.22: <i>Appareil utilisé pour l’essai d’abrasion et la disposition des échantillons...</i>	74
Figure 3.23: <i>Disposition des éprouvettes lors de l’essai de retrait.....</i>	75
Figure 4.1: <i>Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps.....</i>	77

Figure 4.2: Amélioration relative de la résistance à la flexion du béton fibré par rapport au béton de référence en fonction du temps.....	78
Figure 4.3 : Présentation des éprouvettes écrasée en flexion	79
Figure 4.4 : Evolution du gain de résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres.....	79
Figure 4.5: Evolution des résistances à la compression du béton renforcé de fibres.....	80
Figure 4.6: Amélioration relative de la résistance à la compression du béton fibré par rapport au béton de référence en fonction du temps.....	81
Figure 4.7 : Evolution du gain de résistance mécanique en fonction de la teneur en fibres.....	82
Figure 4.8 : Présentation des éprouvettes écrasées en compression.....	83
Figure 4.9 : Variation de la résistance à la traction en fonction de celle à la compression pour différents types de bétons.....	84
Figure 4.10 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 4x10x16 cm.....	84
Figure 4.11 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 7x7x28 cm.....	85
Figure 4.12 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 10x10x20 cm.....	85
Figure 4.13 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 7x14x28 cm.....	86
Figure 4.14 : Comparaison de la résistance à la traction entre les deux essais.....	87
Figure 4.15 : Evolution du facteur de ductilité en fonction du dosage en fibres.....	88
Figure 4.16 : Evolution des résistances à la flexion en fonction de la hauteur de l'éprouvette.....	89
Figure 4.17 : Fissuration d'une éprouvette 7x14x28cm.....	89
Figure 4.18: Représentation de la résistance à l'abrasion.....	90
Figure 4.19: Résistance à l'abrasion d'un béton fibré et de référence en fonction du temps.....	91
Figure 4.20: Amélioration relative de la résistance à l'abrasion du béton fibré par rapport au béton de référence.....	92
Figure 4.21: Relation entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression..	93
Figure 4.22: Retrait libre d'un béton renforcé avec des fibres métalliques.....	94
Figure 4.23: Retrait libre en fonction de la teneur en fibres.....	94

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : <i>Différents types de fibres.....</i>	11
Tableau 1.2 : <i>Principales propriétés physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées.....</i>	12
Tableau 1.3 : <i>Propriétés mécaniques des fibres d'amiante.....</i>	14
Tableau 1.4 : <i>Propriétés physiques et mécaniques des fibres de propylène.....</i>	15
Tableau 1.5 : <i>Caractéristiques mécaniques des verres type E et R mesurées sur filament.....</i>	16
Tableau 1.6 : <i>Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier.....</i>	18
Tableau 1.7 : <i>Applications de bétons renforcés de fibres.....</i>	26
Tableau 3.1 : <i>composition du ciment utilisé.....</i>	59
Tableau 3.2 : <i>Caractéristiques du gravier utilisé.....</i>	61
Tableau 3.3 : <i>Caractéristiques de superplastifiant MEDAFLOW 30.....</i>	62
Tableau 3.4 : <i>Caractéristiques des fibres métalliques HE++ 75/50.....</i>	63
Tableau 3.5: <i>Composition du béton.....</i>	64
Tableau 3.6: <i>Composition massique en kg/m³ du mélange béton.....</i>	65
Tableau 4.1 : <i>Résistances à la flexion (MPa) déduites de l'essai de déformabilité.....</i>	86

Table des Matières

Introduction Générale	2
-----------------------------	---

Chapitre 01

Utilisation des fibres dans le béton

1.1. Introduction.....	6
1.2. Béton.....	6
1.3. Fibres	6
1.4. Béton de fibres	7
1.5. Aperçu historique sur le béton de fibres	7
1.6. Exigences d'un béton de fibres	9
1.7. Importance du béton de fibres.....	10
1.8. Principe de renforcement	10
1.9. Fibres utilisées dans le béton	11
1.9.1 Nature des fibres.....	11
1.9.2. Principales fibres utilisées	12
1.9.2.1. Fibres minérales	12
1.9.2.2. Fibres végétales.....	13
1.9.2.3. Fibres synthétiques.....	13
1.9.2.4. Fibres artificielles	13
1.10. Critères de choix des fibres.....	19
1.11. Rôles des fibres dans le béton.....	21
1.12. Avantages et inconvénients du béton fibré	22
1.13. Applications du béton de fibres	23
1.13.1. Béton renforcé de fibres seules.....	24
1.13.2. Béton renforcé avec des armatures traditionnelles	24
1.14. Conclusion	28

Chapitre 02

Comportement du béton de fibres

2.1. Introduction.....	30
2.2. Comportement rhéologique du béton de fibres.....	30
2.2.1. Facteurs influant sur l'ouvrabilité.....	31
2.2.1.1. Taille et rugosité des granulats	31
2.2.1.2. Longueur et le rapport l/d de fibres	33
2.2.1.3. Teneur en fibres.....	34
2.2.2. Optimisation du béton de fibres.....	36
2.2.3. Mise en œuvre du béton de fibres.....	37
2.3. Comportement mécanique du béton de fibres.....	40
2.3.1. Mécanisme des fibres dans la matrice de béton.....	41
2.3.1.1 Fonctionnement de la fibre dans la matrice de béton	41
2.3.1.2 Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques	42
2.3.1.3 Effet de l'orientation sur les caractéristiques mécaniques.....	44
2.3.2. Comportement en compression	45
2.3.3. Comportement en traction	47
2.3.4. Comportement en flexion	48
2.3.5. Résistance au cisaillement	50
2.3.6. Déformabilité (courbe charge-flèche).....	51
2.3.7. Résistance au choc.....	53
2.3.8. Résistance à l'abrasion	53
2.3.9. Retrait	55
2.4. Conclusion	57

Chapitre 03 Présentation des essais

3.1. Introduction.....	59
3.2. Matériaux utilisés.....	59
3.2.1. Ciment.....	59
3.2.2. Sable.....	60
3.2.3. Gravier.....	60
3.2.4. Adjuvant.....	61
3.2.5. Eau de gâchage.....	62
3.2.6. Fibres d'acier.....	62
3.3. Composition du béton.....	63
3.4. Procédure de fabrication des bétons.....	65
3.4.1. Mode opératoire.....	65
3.4.2. Méthode d'évaluation de l'ouvrabilité du béton.....	66
3.4.3. Procédure de fabrication des éprouvettes.....	67
3.4.4. Conservation.....	68
3.5. Essais effectués.....	68
3.5.1. Résistance à la traction par flexion.....	69
3.5.2. Résistance à la compression.....	70
3.5.3. Déformabilité.....	71
3.5.4. Résistance à l'abrasion.....	72
3.5.5. Retrait.....	74
3.6. Conclusion.....	75

Chapitre 04 Résultats et discussions

4.1. Introduction.....	77
4.2. Résistance à la Traction par flexion.....	77
4.3. Résistance à la compression.....	80
4.4. Déformabilité.....	84
4.4.1. Résistance à la flexion.....	86
4.4.2. Evolution des flèches.....	87
4.4.3. Ductilité du béton fibré.....	87
4.4.4. Effet d'échelle.....	88
4.5. Résistance à l'abrasion.....	90
4.5.1. Quantification de l'effet des fibres sur l'abrasion.....	91
4.5.2. Relation entre l'abrasion et la compression.....	92
4.6. Retrait.....	93
4.7 Conclusion.....	95
Conclusion générale.....	97
Références bibliographiques.....	101

Introduction
Générale

Introduction Générale

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction. Ses Performances ne cessent de s'améliorer, en l'occurrence les résistances mécaniques et la durabilité. Grâce au développement technologique et à la recherche scientifique de nouveaux types de béton ont été créés et employés à savoir le béton compacté au rouleau (BCR), les bétons de hautes et de très hautes performances (BHP et BTHP), les bétons de fibres métalliques et synthétiques (BFM et BFS), les bétons autoplaçants (BAP), la liste est encore très longue.

Malgré tous ses avantages, le béton reste un matériau fragile, ayant une faible résistance à la traction ce qui caractérise sa fragilité sous les effets des efforts de traction. Sa rupture se produit prématurément se manifestant par l'apparition de fissures, pour cela, les efforts de traction sont repris en général par des armatures continues. Malgré la disposition des armatures dans le béton pour reprendre les efforts de traction et éviter la fissuration, d'autres types de fissures, apparaissent toujours. Ces dernières sont provoquées par les effets du retrait et de fluage. Pour éviter tout type de fissuration, on a pensé à utiliser un renforcement discontinu réalisé à l'aide de fibres incorporées dans le béton.

Les fibres sont employées depuis des siècles pour renforcer les matrices fragiles, comme la paille et le crin mélangés à l'argile pour former des briques. Ensuite, le concept de fibres dispersées dans les matériaux à base cimentaire s'est considérablement développé et trouve des applications dans le bâtiment et le génie civil. L'ajout de fibres dans un béton peut ainsi modifier de manière importante son comportement rhéologique et mécanique. Les modifications engendrées dépendent notamment de la géométrie et de la nature des fibres introduites (polymères, métalliques, verres, carbone...), de leur fraction volumique et de leur vieillissement dans le béton.

Le renforcement par des fibres a pour objectif majeur d'améliorer le comportement vis à vis à la traction afin de retarder, de limiter ou d'éviter une rupture quasi-fragile. Les fibres sont, en particulier, introduites dans le béton afin de modifier son comportement et d'obtenir des effets bénéfiques suivants :

- Améliorer la résistance à la flexion, à la traction, à la fatigue et aux chocs,
- Retarder la localisation de l'endommagement,
- Augmenter la capacité de déformation du matériau,

- Augmenter le niveau de contrainte au pic,
- Observer une reprise de charge après fissuration,
- Prévenir et contrôler le retrait du béton.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la présence de fibres métalliques dans le béton. A cause des dimensions des fibres fournies qui ne conviennent pas sur des éprouvettes en mortier, on a préféré travaillé sur des éprouvettes en béton. Le projet aborde les aspects allant du comportement des fibres au comportement de ce matériau vis-à-vis des différentes sollicitations, en passant par sa formulation et sa rhéologie à l'état frais. A cet effet, plusieurs essais, sur éprouvettes de différentes dimensions et de différents dosages de fibres métalliques, ont été exécutées.

L'étude est composée de quatre chapitres ; la première partie de ce travail, représentant la partie bibliographique ; contient le chapitre un et deux.

Pour le premier chapitre, on présentera le maximum de connaissances pour établir un aperçu historique du béton de fibre ainsi que les notions fondamentales de ce matériau, les caractéristiques géométriques et mécaniques des principales fibres susceptibles d'être employées comme matériau de renfort dans des matrices cimentaires, ainsi que leur rôle et les divers domaines d'applications.

Pour le deuxième chapitre, on présente les différentes caractéristiques du béton de fibres et les différents facteurs qui influent sur son comportement rhéologique et mécanique. Ce chapitre présentera d'une façon générale l'intérêt du béton de fibre, plus précisément, l'échelle à laquelle les fibres d'acier usuelles sont susceptibles d'agir sur le matériau ou la structure et les applications potentielles de ce béton.

Le troisième chapitre présente la partie expérimentale entamée dans ce travail. On présente une caractérisation des matériaux locaux (ciment, sable, gravier et l'adjuvant) et les fibres utilisées commercialisées sous le nom ArcelorMittal (Bissen) ainsi qu'une étude d'optimisation basée sur le principe de la maniabilité. Ensuite, les différents essais utilisés pour évaluer les performances des bétons testés sont présentés avec leurs principes et leurs modes opératoires. Ces essais portent sur la résistance à la flexion, à la compression, la déformabilité, l'abrasion et le retrait.

Dans le quatrième chapitre, on s'intéresse à présenter et à interpréter les différents résultats trouvés. Les résultats du béton fibré sont comparés à ceux d'un béton de référence sans fibres et parfois avec ceux de la littérature afin de juger les performances apportées par l'incorporation des fibres. Certaines propriétés sont corrélées avec la résistance à la compression afin de rendre nos résultats plus pratiques.

Enfin, une conclusion rappelant les principaux résultats obtenus et les perspectives à développer pour l'ensemble de ce travail, achèvera cette recherche.

CHAPITRE: 1

Utilisations des Fibres dans le Béton

1.1. Introduction

L'homme a toujours essayé de rendre les matériaux de construction plus résistants et plus durables pour faire face aux conditions difficiles de la nature. Depuis sa création, le béton n'a pas cessé de recevoir divers matériaux pour corriger ces déficits ou lui attribuer de nouvelles performances. L'incorporation de fibres métalliques dans le béton est devenue une solution efficace pour limiter sa fissuration et remplacer partiellement les armatures transversales dans les structures. Différentes formes et origines de fibres sont actuellement employées dans le béton et qui constituent la base de la recherche scientifique dans le domaine du comportement du béton.

1.2. Béton

Le béton est fondamentalement un mélange de deux constituants ; Les granulats et la pâte composée de ciment portland et de l'eau. La pâte lie les granulats (sable et gravier ou pierre concassée) en une masse qui, du fait de la réaction chimique du ciment et de l'eau, prend la consistance de la roche à mesure qu'elle durcit. Des ajouts cimentaires peuvent aussi être inclus dans la pâte.

1.3. Fibres

Le terme *fibre* se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. On distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm de la fibre de grande longueur ou filament continu. En 1982, American Concrete Institute [1] publie que les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions. Chacune de ces catégories de fibres procure au béton des propriétés spécifiques mais, en général, il serait suffisant de vouloir parler de béton renforcé de fibres.

Le paramètre numérique le plus fondamental décrivant la fibre est son élancement qui est défini comme le rapport entre la longueur et le diamètre équivalent à la fibre. Il est considéré comme l'un des paramètres les plus importants dans la technologie des bétons renforcés de fibres. Dès 1974, des études [2, 3] mettaient en évidence le rôle prépondérant de l'élancement sur la maniabilité du béton. On peut ajouter ici, d'après ces études, qu'il existe un grand nombre de fibres qui se

différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur, leur forme et leur état de surface.

1.4. Béton de fibres

On appelle béton de fibres, le mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinu présenté ici sous forme de fibres. L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibres isolées au moment du gâchage (béton de fibres) ou de la projection (cas de béton de fibres projeté). En 1973, le comité 544 de l'*American Concrete Institute* [4], définit le béton de fibres comme un béton constitué d'un ciment hydraulique et un granulat fin ou gros et des fibres discontinues. Donc le béton de fibres est un béton conventionnel auquel on a ajouté des longueurs discontinues de fibres durant la préparation du mélange.

1.5. Aperçu historique sur le béton de fibres

Historiquement, il n'y a pas une confirmation quand est-ce que le concept du renforcement du béton de fibres a été connu en premier lieu. Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité, et c'est ainsi qu'au cours de l'histoire, la technologie des matériaux a été jalonnée par l'apparition de composite de texture de plus en plus complexe [5].

Le plus vieil écrit probablement, traitant d'un tel matériau composite, se trouve dans le passage du livre de l'Exode chapitre 5: 6 "*Le jour même, Pharaon donna cet ordre aux surveillants du peuple et aux scribes : Ne continuez plus à donner de la paille hachée au peuple pour mouler les briques comme hier et avant-hier; qu'ils aillent eux-mêmes ramasser la paille qu'il leur faut*". Il y a aussi une certitude que les fibres d'amiante ont été utilisées dans le renforcement des poteries en argile en Finlande, il y a de cela 5000 ans [5]. D'autres parts, il a été indiqué que les pailles ont été utilisées pour renforcer les briques chez les anciens ; tandis que les poils des animaux et les fibres d'amiante ont été introduites pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment Portland [6]. On peut noter aussi la réalisation au milieu du XV^{ième} siècle d'alliages métalliques avec fibres de carbone. Braun et al [7] rapportèrent que la première matière renforcée par des fibres a été fabriquée par l'homme en introduisant les pailles et d'autres produits semblables dans des matériaux de construction telle que le mortier, le plâtre ... etc.

En 1847 une étude a proposé l'ajout de fils continus ou de treillis métalliques, pour créer un nouveau matériau qui fait face aux problèmes de fissuration des bétons. [8], vingt-sept ans après, c'est la création d'une pierre artificielle par l'ajout de granulats en fer recuit dans un mélange de béton. Pour améliorer la résistance du béton, une série d'essais a été faite par Porter en 1910 [9] ; qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Par la suite une série de brevets a été établie par Graham [10], Weakly [11], Fickley [12], et W. Smith [13]. En 1938, un autre brevet a été établi par Zitkevic [14] en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer avec approximativement 100mm de longueur et 1.0 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très similaires aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

Au début des années soixante, Battelle Development Corporation [15], brevetait un béton renforcé avec des morceaux d'acier courts. En 1963, Romualdi et Batson [16, 17] ont présenté une analyse théorique des résultats expérimentaux donnés par les brevets de Battelle Development Corporation. Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de Romualdi et Batson où les chercheurs sont arrivés à mettre en évidence les propriétés nouvelles de ce composite. Ils ont décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile.

La fin des années soixante a connu la participation d'un grand nombre de chercheurs afin d'orienter les axes de recherches vers l'application, avec toute la fiabilité, du béton de fibres dans les domaines de construction. Les travaux se multiplient et une multitude de types de fibres a été introduite dans le commerce comme étant de nouvelles applications. Le plus grand progrès dans ce domaine a commencé dans les années soixante-dix avec l'incorporation des fibres d'acier dans l'industrie réfractaire.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Mais, aujourd'hui, avec le développement des moyens expérimentaux, l'utilisation de ce type de

matériaux s'est orientée vers les structures présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons traditionnels.

De nombreux travaux et applications ont eu lieu sur le béton de fibres depuis son développement. Cependant, l'objectif principal de ces dernières décennies a été de concevoir un matériau renforcé de façon homogène et ayant un comportement isotrope. C'est ainsi que l'insertion de fibres discontinues dans la matrice cimentaire a très vite été la voie à de nombreuses recherches [18]. Avec la disponibilité progressive de fibres de diverses natures, le rêve qui a commencé il y a plus d'un siècle, pour mélanger des fibres dans le béton au même titre que le sable et le gravier, est réalisable et aboutit à un béton structural [19]. Enfin, à chaque fois que l'utilisation d'un béton de haute résistance est d'actualité, il faudra analyser de manière très approfondie, la solution fibres métalliques. En effet, les fibres métalliques et le béton de haute résistance constituent un couple idéal, dans lequel il existe une très forte synergie. De même, Lankard et Sheets [20] confirmèrent que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité.

Il faut souligner qu'un renforcement sous forme de fibres distinctes ne peut pas être utilisé en remplacement direct d'une armature d'acier conventionnelle dans les pièces en béton armé et précontraint. Les fibres, en effet, sont moins efficaces que les armatures conventionnelles à taux d'acier équivalant face à des contraintes structurelles bien définies pour lesquelles les approches de conception des structures permettent de concentrer la section d'acier aux endroits critiques.

1.6. Exigences d'un béton de fibres

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.

1.7. Importance du béton de fibres

Le comportement particulier du béton de fibres permet de :

- ❖ 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.
- ❖ Mobiliser une résistance au cisaillement importante.
- ❖ Améliorer le comportement au jeune âge.
- ❖ Avoir une résistance à la flexion identique sous l'application d'efforts égaux, mais de sens opposés (symétrie de comportement).
- ❖ Réduire considérablement les effets du retrait ou des chocs thermiques.
- ❖ 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 œuvre : coulage, pompage, moulage, projection.

1.8. Principe de renforcement

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).

Le mécanisme de renforcement du béton par des fibres consiste à répartir régulièrement des fibres assez courtes dans le béton. Ce réseau de fibres va s'opposer, et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure ; là où les premières fibres rencontrées effectuent une couture de la fissure jusqu'à bloquer l'évolution ; si les efforts excessifs persistent, d'autres fissures vont se former, qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres.

Le renforcement par les fibres du béton permet donc de freiner la propagation incontrôlée des fissures, ce qui permet à celui-ci d'acquérir des qualités (ténacité, résilience) ou d'améliorer certaines caractéristiques.

1.9. Fibres utilisées dans le béton

1.9.1 Nature des fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur, leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques (différentes les unes des autres (Fig. 1.1), les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles ou artificielles. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix. Le tableau 1.1 représente les différents types de fibres et le tableau 1.2 donne leurs principales caractéristiques.

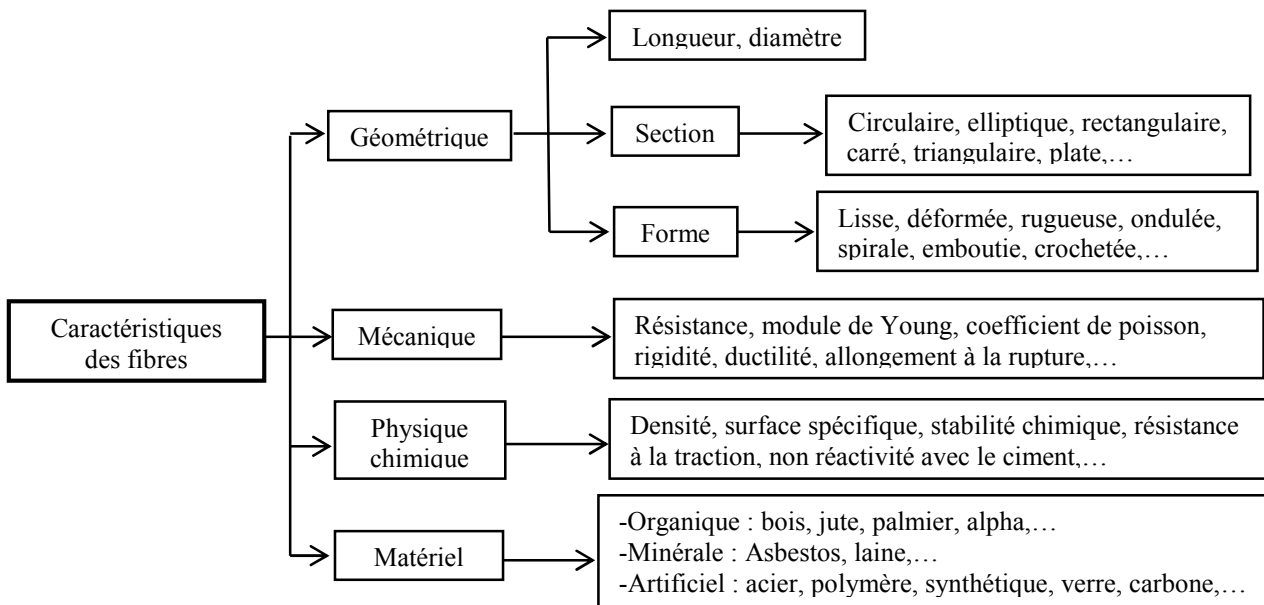


Figure 1.1 : Caractéristiques des fibres. [21]

Tableau 1.1 : Différents types de fibres. [22]

Fibres naturelles		Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Organiques
Lin Chanvre Celluloses Sisal Coir	Poil Laine Soie	Laitiers Carbone Métaux (acier, fonte) Verres spéciaux amiante	Polypropylène Polyamides Polyesters

Tableau 1.2 : Principales propriétés physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées. [23]

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	Densité	Rt (Mpa)	E (10 ³ Mpa)	Allongement A La rupture	Coeff. De Dilatation (µ/m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5-500	20-80	7.5	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36x2600 de section	50-60	7.8	2500	140	1		1500
Verre	5-20	40-70	2.6	1500-3000	80	2-3.5	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0.9	400-750	5-10	15-25	90	150
Polyester			1.4	700-850	8	11-13		
Amiante	0.02-20	5	2.5-3.4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5-9	Variable	1.7-2	2000-3000	250-400	0.5-1.5		400-1500
Sisal	10-50	1.50	1.5		130	3		

1.9.2. Principales fibres utilisées

Dans cette partie nous allons passer en revue les principales fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites en général et le béton de fibres en particulier. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées peuvent être classées par famille.

1.9.2.1. Fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine,...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiantes autrefois utilisées pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes. La fibre de verre obtenue par étirage ou soufflage de verre fondu en filaments.

1.9.2.2. Fibres végétales

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales ; les fibres provenant des poils, les fibres du liber, les fibres vasculaires et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

1.9.2.3. Fibres synthétiques

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, acryle, polyster ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acryliques, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balles, les fuselages et ailes d'avion, l'exploration spatiale, et des équipements sportifs de toutes sortes. Afin d'obtenir une grande solidité et une haute résistance à la chaleur, il est possible d'allier des fibres de carbone, de silicium ou d'autres substances.

1.9.2.4. Fibres artificielles

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Après nous allons présenter les principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons.

a) Fibres d'amiante :

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bûchettes de microfibrilles extrêmement fines, difficilement fusibles (vers



1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé [24]. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. (Tableau 1.3). Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur.

Tableau 1.3 : Propriétés mécaniques des fibres d'amiante. [24]

Fibre	Diamètre, d [μm]	Masse Volumique, Kg/ m ³	Résistance en traction, σ ; [GPa]	Module de YOUNG, E [GPa]	Résistance au feu, [°C]	Allongement à la rupture Δ (%)
Amiante	0.02÷20	2400÷2600	3.1	60÷80	1500	2÷3

b) Fibres de cellulose :

Les fibres de celluloses sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme un additif au ciment d'amiante et non pas comme un renfort. Aujourd'hui elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments. Leurs propriétés physiques sont changeables selon les modes de fabrication de ce type de fibres. Les diamètres de ces fibres varient de 1 à 4 mm, tandis que leurs longueurs comprises entre 10 à 50 mm, alors que l'élanement peut-être dans les environs de 100. Leurs résistances en traction varient entre 10 et 30 Mpa. Elles sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance mécanique d'une composite. Cette amélioration est réalisée essentiellement par le freinage des fissures. Une étude statistique d'évaluation des propriétés physiques et mécaniques pour un composite de ciment renforcé par des fibres cellulosiques [25,26] a montré que ce type de fibres est sensible aux effets d'humidité.



c) Fibres de polypropylènes :

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants :



Une bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa, et une déformabilité élevée [27].

Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Elles sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel) et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élançement est plus faible que la pâte durcie. Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit aux chocs mécaniques, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement. Les caractéristiques principales de ces fibres sont illustrées dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres de propylène. [27]

Fibre	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique Kg/dm ³	Résistance en traction MPa	Module d'élasticité MPa	Elongation à la rupture (%)	Volume typique à la composite (%)
Polypropylène (Fibrillated)	0.5 à 4	5 à 75	0.9	4000 à 8000	4000 à 8000	8	0.2 à 1.2

d) Fibres de verre :

Le verre est un matériau solide qui s'est formé par refroidissement d'un liquide visqueux. Il est caractérisé par une très grande fragilité, attribué à une sensibilité élevée à la fissuration, par contre élaboré sous forme de fibre de faible diamètre, le verre perd cette fragilité. Ces fibres sont alors fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm .



Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types ; la fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et les fibres de verre au borosilicate. Plusieurs types de compositions verrières sont utilisés comme matières premières, en fonction de l'usage spécifique qu'il sera fait de la fibre [28].

Tableau 1.5 : *Caractéristiques mécaniques des verres type E et R mesurées sur filament.* [29]

Caractéristique		Verre type E	Verre type R
Masse volumique ρ	(kg/m^3)	2600	2550
Module d'Young E_f	(N/mm^2)	73000	86000
Contrainte à la rupture σ_{fu}	(N/mm^2)	3400	4400
Allongement à la rupture ε_{fu}	(‰)	44	52

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice,
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...),
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion,
- Conductivité thermique relativement faible.

e) Fibres métalliques:

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.



Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opérations. La figure 1.2 représente les différentes formes géométriques des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton. [30, 31]

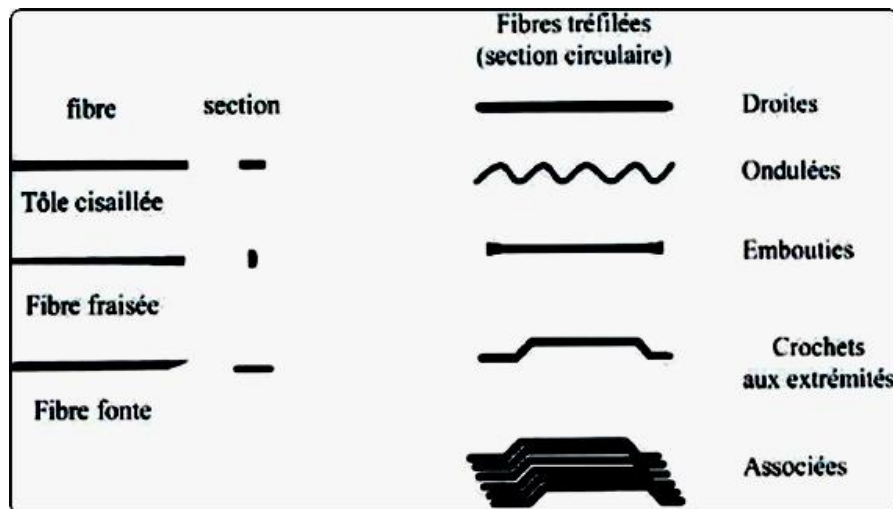


Figure 1.2 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm, et La résistance de ces fibres varie généralement entre 700 et 2000 MPa. Les principales propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier sont regroupées dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier.

Fibre	Diamètre, (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique, (Kg/ dm ³)	Résistance en traction, [MPa]	Module d'élasticité [MPa]	Coeff. de Dilatation Micro/m	Résistance au feu, (°)
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.8	1000 à 3000	200000	11	1500

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples.

D'après Québec [32], la norme ASTM A 820 identifie cinq types de fibres métalliques :

- Type I : fil étiré à froid;
- Type II : tôle découpée;
- Type III : extrusion de matière fondue;
- Type IV : autres fibres;
- Type V : fabriqués par rasage de fil tréfilé.

La plupart des fibres disponibles sur le marché sont de type I, (Fig. 1.3). [32]

**Figure 1.3** : Fibres métalliques.

1.10. Critères de choix des fibres

Le choix d'une fibre doit être basé sur le fait que la fibre utilisée doit être, avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice, et en particulier avec le ciment. Elle doit conserver ses propriétés dans le temps et être d'un coût bien acceptable, compte tenu des performances qu'elle confère à la matrice. Le choix dépend aussi de l'usage recherché (pièces minces, pièces massives, réparation de structure, projection, renforcement d'une pâte pure...etc.) et des propriétés mécaniques de la fibre (résistance, module d'élasticité, adhérence avec la matrice... etc.).

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).

La géométrie des fibres utilisées est très variable (Fig. 1.2). Les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par l'amélioration du comportement post fissuration. Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [33] et par frottement à l'interface avec la matrice. On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment. L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [34]. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue. Rossi [19] explique ceci par deux constatations empiriques :

a) pour une longueur de fibre et un volume donnés, plus le diamètre de la fibre sera faible, plus la surface spécifique sera grande. Ceci conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, mais aussi à un nombre de fibres élevé qui augmente la probabilité de contact entre celles-ci. Ceci conduit à une diminution de la maniabilité quand le rapport longueur/diamètre augmente ;

b) pour un rapport longueur/diamètre fixe et un dosage en fibres donné, si le diamètre diminue, la longueur va elle aussi diminuer. Selon le raisonnement précédent, ceci conduit à une diminution de la maniabilité ce qui est en décalage avec la réalité car dans ce cas, le poids unitaire de la fibre intervient. Plus elles seront grandes, plus elles auront tendance à passer à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment pour entrer en contact avec les granulats c'est-à-dire à des frottements solides et donc à une diminution de maniabilité.

En résumé, pour une maniabilité donnée, on peut utiliser un dosage important de fibres courtes ou un dosage faible de fibres longues.

De même, le rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat est aussi un paramètre prépondérant concernant l'efficacité des fibres dans le béton. Rossi [19] explique que dans le cas où la résistance de l'interface entre la matrice cimentaire et le granulat est inférieure à la résistance du granulat et de la matrice, les fissures se développent à cette interface avant de pénétrer dans la matrice. Si la longueur des fibres est proche du diamètre des plus gros granulats, une majorité d'entre elles ne pourront intercepter efficacement les fissures intergranulaires. Pour que les fibres interviennent au niveau de la structure, il est préconisé un rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat de deux à trois [19].

Dans le cas où la résistance à l'interface entre la matrice cimentaire et les granulats n'est pas la plus faible, les fissures traversent à la fois la pâte et les granulats. Les fibres peuvent alors être pleinement sollicitées, et l'utilisation de fibres de longueur inférieure à trois fois le diamètre du plus gros granulat peut être envisagée.

1.11. Rôles des fibres dans le béton

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité [35]. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure 1.4.a.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes. (Figure 1.4.b).

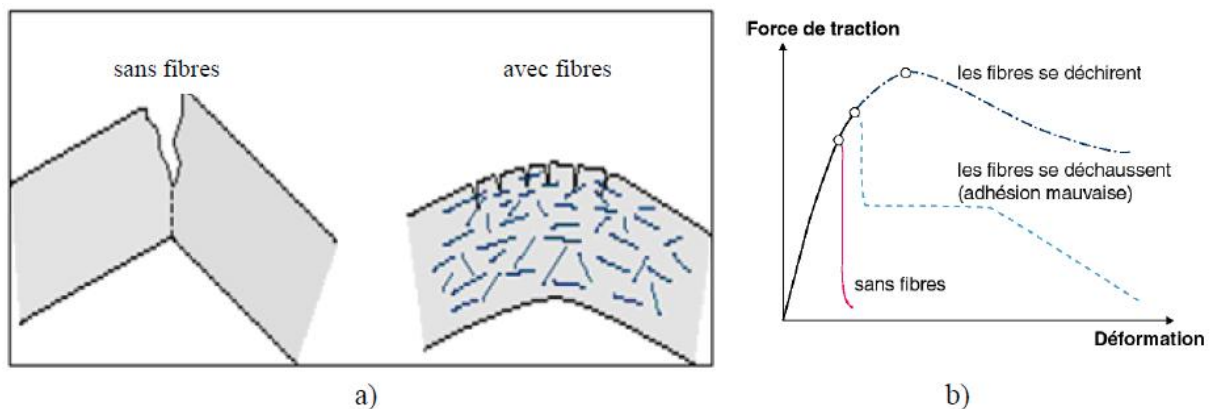


Figure 1.4 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres. [36]

a) fissuration b) Comportement de Charge-déformation.

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire,
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration,
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge,
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur),
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion,
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture [37]. On peut donc aisément comprendre qu'il est extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable.

1.12. Avantages et inconvénients du béton fibré

Les principaux avantages obtenus sont une amélioration des résistances à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure. De ces avantages découlent les principaux domaines d'utilisation : en particulier les dallages industriels, les dallages de parking, les pistes, les pieux, les déversoirs de barrage, les silos. En préfabrication, les poutrelles, les voussoirs, les canalisations et tuyaux soumis notamment à une forte abrasion. En béton projeté, où l'on utilise généralement des fibres courtes, pour la réfection des tunnels, galeries et talus de protection des berges. [38]

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique. [32]

a) Aspect technique : L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé. Les principaux avantages techniques sont :

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en postfissuration (résistance résiduelle);
- Une énergie d'absorption élevée;
- Une résistance aux impacts élevée;
- Une résistance à la fatigue élevée;
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.

b) Aspect économique : Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction;
- une optimisation du dimensionnement.

Mais il a été remarqué certains inconvénients dus à l'utilisation de fibres:

- Réduction de la maniabilité du fait de la présence des fibres quand le pourcentage de celles-ci est élevé.
- Introduction d'un certain type de fibres dans le béton avec les moyens traditionnels se révèle très difficile.
- Pendant la livraison, les fibres sont enchevêtrées, d'où la formation d'oursins lors du malaxage implique la difficulté de mise en place.
- Actuellement le prix des fibres est relativement très élevé et de ce fait le prix de revient du m³ de béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.

1.13. Applications du béton de fibres

Depuis que le concept du béton de fibres a été conçu, de nombreux travaux de recherche ont montré que l'ajout de fibres d'acier dans une matrice de béton permet au composite (béton-fibres) d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion. Mais ce type de béton n'est pas considéré comme un substituant aux bétons traditionnels, mais comme un matériau nouveau, qui devient intéressant dans l'optique de la conception d'une structure performante.

L'utilisation de béton de fibres est naturellement orientée vers les éléments structuraux présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons conventionnels. Ceci ne veut pas dire que d'autres domaines stratégiques comme (fonderies, centrales nucléaires ...etc.) n'ont pas bénéficié de ce type de matériau. Le béton armé de fibres d'acier inoxydable a été expérimenté avec succès pour les parties exposées aux fortes variations de températures et même aux très hautes températures, en remplacement de revêtements réfractaires. L'utilisation de ce type de matériau est facile car le matériel

de chantier nécessaire est le même qui est utilisé pour la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton ordinaire. Donc, on peut distinguer deux modes d'utilisation des fibres (Fig.1.5) [21, 39].

1.13.1. Béton renforcé de fibres seules

Dans ce cas, on utilise les propriétés des bétons de fibres qui seront liées à plusieurs paramètres. Ces paramètres sont généralement le type et les propriétés de la matrice utilisée, type et propriétés des fibres utilisées, ainsi que la méthode de mise en œuvre retenue. L'application du béton de fibre sans armatures traditionnelles est utilisée généralement dans des pièces minces telles que le revêtement, les panneaux, les canalisations, les tunnels, les dallages industriels et les talus.

1.13.2. Béton renforcé avec des armatures traditionnelles

Dans ce cas on introduit les fibres dans les éléments structuraux en béton armé soumis à des sollicitations combinées afin de majorer la résistance et la rigidité des éléments concernés. Les fibres sont donc employées pour supporter d'autres éléments structuraux tels que le béton armé et précontraint. Des exemples incluent les structures parasismiques, couvercle pour réparation et réhabilitation des poutres et poteaux. Dans les structures en charpente métalliques, les poutres sont enrobées pour améliorer leur ductilité et la résistance au feu.

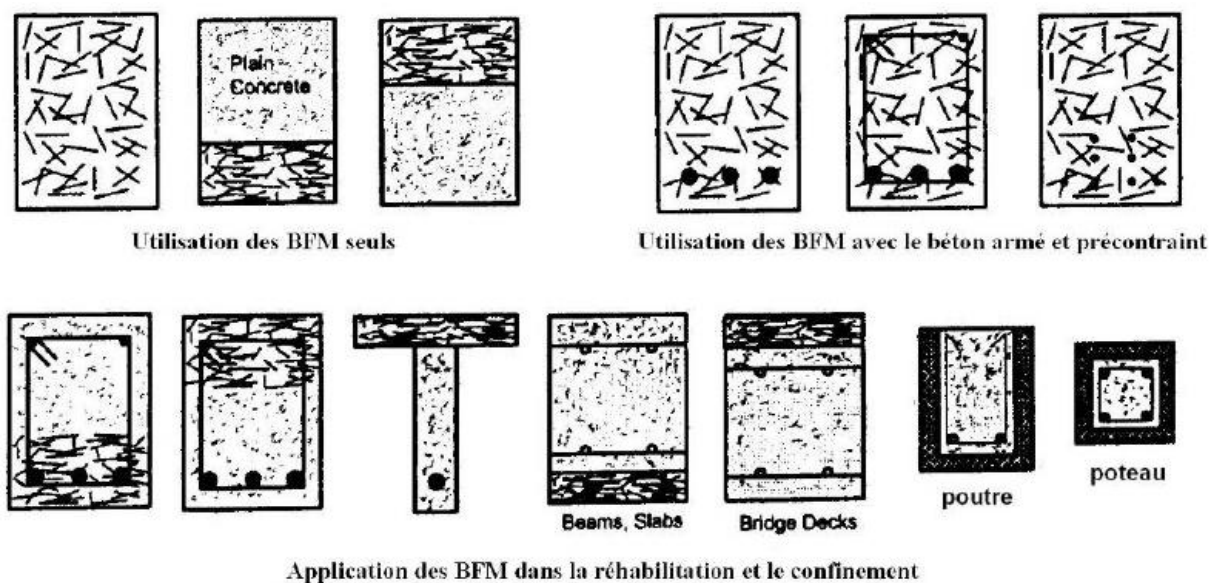


Figure 1.5: Exemples d'applications du béton de fibres. [39]

La réparation des chaussées est un des exemples où le béton de fibres peut être utilisé pour assurer la durabilité de la structure. La technique consiste à couvrir les chaussées par une couche en béton de fibres. Une expérience effectuée sur une autoroute au Canada montre que la couche de réparation en béton de fibres est restée en bon état de service 8 ans après réparation, tandis qu'il a fallu refaire la réparation sur les couches en béton non fibré 8 mois après. La présence de fibres dans les couches de surfacage permet de lutter contre les forces de traction et les contraintes de cisaillement dans les zones fissurées qui causent le décollement des couches du support [21].

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles. Le tableau 1.7 illustre quelques applications de bétons renforcés de fibres et leurs intérêts. Les figures ci-dessous illustrent quelques cas pratiques de l'utilisation du béton de fibres dans la construction.

Tableau 1.7 : Applications des bétons renforcés de fibres. [40]

APPLICATIONS	INTERETS APPORTES PAR L'AJOUT DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et éléments structuraux soumis à la flexion	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - Augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations ...)	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	<ul style="list-style-type: none"> - Energie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements Routiers, tabliers de ponts	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
- Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains	<ul style="list-style-type: none"> - Suppressions du travail de fixation du grillage ordinairement employé - Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus
Fabrication de pieux, revêtements ignifuges isolants, panneaux de revêtement de façade	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement



Réparation et réhabilitation



Stabilisation de talus



Galerie à eau



Constructions



Tunnels routiers



Applications spéciales

Figure 1.6: *Autres utilisations du béton de fibres.* [41]

1.14. Conclusion

En plus des préoccupations des chercheurs pour palier le problème de la fissuration et la résistance à la traction du béton, d'autres recherches se sont basés sur la contribution de la présence des fibres sur certaines propriétés du béton. Le chapitre suivant sera consacré spécialement à la présentation des principaux résultats trouvés par différents chercheurs sur l'apport des fibres au béton.

CHAPITRE: 2

Comportement Du Béton de Fibres

2.1. Introduction

Le béton aux fibres métalliques est devenu un des bétons spéciaux les plus utilisés, attirant ainsi la réflexion des chercheurs. Son comportement rhéologique au jeune âge et mécanique à long terme, sont parmi les domaines les plus investis et demeurent à nos jours encore à conquérir. La dernière décennie a connu d'énormes travaux qui ont visé à mieux comprendre le rôle joué par la présence des fibres et de pouvoir l'améliorer davantage.

2.2. Comportement rhéologique du béton de fibres

La rhéologie est la science de la physique qui étudie l'écoulement de la matière condensée, en fonction des sollicitations qu'elle subit et du temps. Prise dans son acception la plus large, cette science n'impose aucune restriction particulière quant à l'ampleur des mouvements relatifs des particules constituant les corps étudiés, ou quant aux sollicitations agissantes. Elle se trouve au carrefour des diverses branches de la mécanique, de la physique et de la chimie, en étudiant finement les relations entre contraintes et déformations au sein des matériaux.

Pourtant depuis que le béton existe, soit avec ou sans fibres, les chercheurs ont senti la nécessité de maîtriser les lois de son écoulement à l'état frais, pour qu'il remplisse au mieux les coffrages, dans un souci de compacité maximum. Par des voies détournées et des concepts souvent subjectifs, ils ont abouti à des règles pratiques leur permettant d'atteindre plus au moins parfaitement cet objectif.

Il est maintenant bien confirmé que l'addition de fibres à un béton ordinaire pose très vite des problèmes d'élaboration, dus à la réduction de la maniabilité. Les essais effectués par certains chercheurs [42, 43] montrent que ce n'est pas uniquement la géométrie des fibres et le volume incorporé qui influencent les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé de fibres, mais aussi la taille et la fraction volumique des gros granulats. En général l'ajout d'une certaine quantité de fibres à la matrice de béton n'introduit pas de nouvelles conditions sur la nature des composants de celui-ci. Toutefois, la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenue qu'après une optimisation de la composition, en ayant toujours à l'esprit les deux principaux problèmes :

- Possibilité de formation de pelotes de fibres « oursins », due à une mauvaise distribution des fibres. Cette mauvaise distribution peut résulter soit de la nature et du volume de fibres utilisées, soit de l'enchevêtrement des fibres lors de leurs déversements dans le malaxeur.
- Une diminution de la maniabilité du matériau avec l'ajout des fibres. Si l'on ne veut pas compenser cette baisse par une augmentation de la quantité d'eau et perdre les bénéfices du fibrage, il faut agir soit en ajoutant des fluidifiants, soit en recourant à une vibration efficace.

Les facteurs qui influencent la maîtrise de ces deux problèmes sont nombreux dont les plus importants sont : la longueur et le dosage en fibres, la taille et la rugosité des granulats et la formulation granulométrique.

2.2.1. Facteurs influant sur l'ouvrabilité

2.2.1.1. Taille et rugosité des granulats

Le problème est plus compliqué quand les fibres sont introduites dans un béton au lieu d'un mortier. Dans un mortier, les fibres sont séparées par un matériau granuleux fin qui peut se déplacer facilement entre elles, mais dans le cas d'un béton, elles sont séparées par des particules qui seront d'une plus grande taille que l'espacement moyen de fibre si les fibres sont uniformément distribuées. Cela conduit à un regroupement des fibres avec une grande interaction entre les fibres et les agrégats grossiers et l'effet devient plus prononcé lorsque le volume et la taille maximale des particules augmentent.

La maniabilité des bétons est affectée de manière significative par l'addition de fibres, la porosité du squelette granulaire est d'autant plus grande que le volume de fibres est important [42]. Pour que les fibres soient efficaces à l'état durci, il est recommandé de choisir des fibres plus longues que la taille du plus gros granulat [44] (voir figure 2.1), avec des proportions supérieures de 2 à 4 fois.

Ce principe est démontré dans la figure 2.1, qui montre nettement qu'il est difficile de réaliser une dispersion uniforme de fibres, une fois que la dimension d'agrégat augmente de 5 mm à 10 mm à 20 mm. Cependant, ceci est une image simplifiée parce que, en réalité, la dispersion des fibres et des agrégats est tridimensionnelle. Il peut y avoir jusqu'à 200 fibres en n'importe quel cube donné de

mortier, de longueur latérale égal à la fibre avant que l'interaction devienne excessive. Néanmoins, il est clair (Fig. 2.1) que plus le volume et la taille d'agrégat grossier sont grands plus l'interaction des fibres se produira.

Si le béton est destiné à être pompé, il est préconisé de réduire le volume de granulats bruts de 10% par rapport au béton ordinaire pour faciliter l'opération. Quand l'introduction de fibres entraîne une diminution de l'affaissement estimé entre 50 et 75 mm, l'ajout d'un superplastifiant est donc fortement conseillé afin de remédier à cette perte d'ouvrabilité [45].

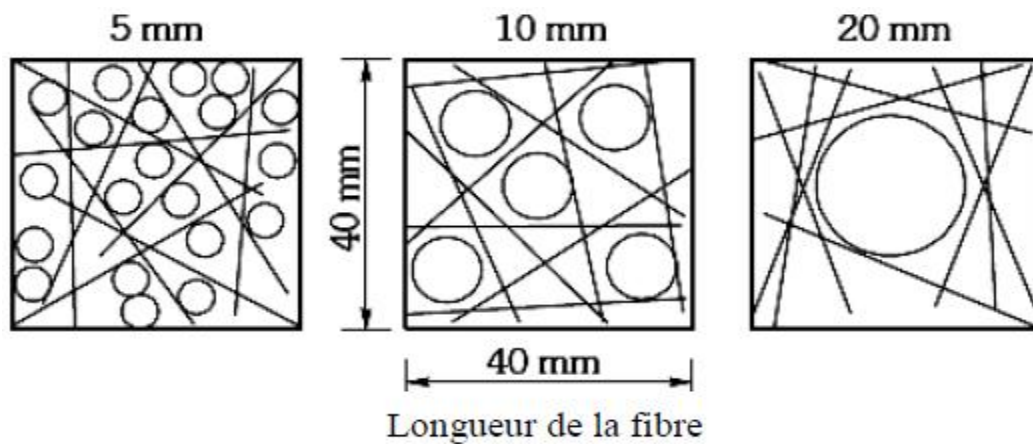


Figure 2.1: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre = 40mm. [44]

D'après Swamy et Mangat [34], le temps de vibration (Ve-Be) en fonction de la teneur en fibres dans la matrice sable-ciment pour deux proportions du gros granulat ($D_{\max}=10\text{mm}$) augmente avec l'incorporation de fibres. Les résultats présentés sur la figure 2.2, montrent que pour une proportion de gros granulats ($D_{\max}=10\text{mm}$) supérieure à 20%, la raideur de mélange interdit l'incorporation de quantités de fibres de quelques importance.

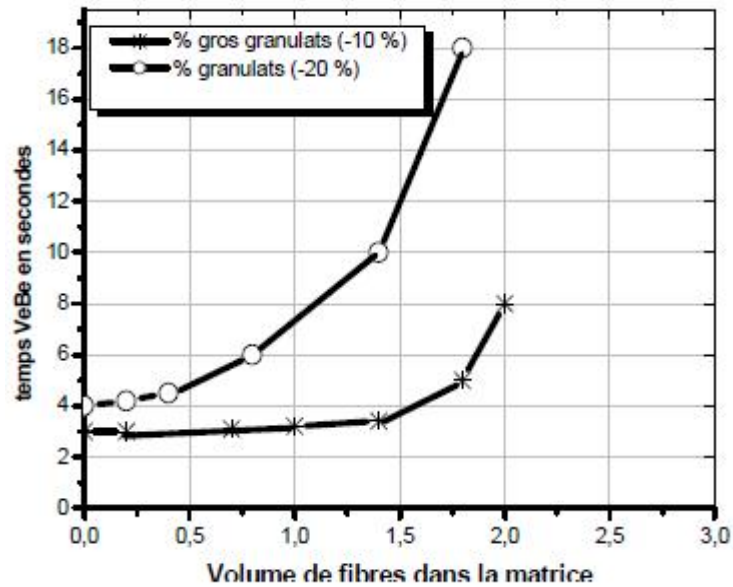


Figure 2.2: Temps de vibration Vé-Bé en fonction de la teneur volumique (V_f) en fibres d'acier. [34]

2.2.1.2. Longueur et le rapport l/d de fibres

Pour que les fibres puissent être considérées comme armature de renfort homogène, il faut qu'au sein du matériau et à l'échelle de ses composants, elles bloquent le développement prématuré de fissures intra granulaires. Il faut donc que la longueur de la fibre soit supérieure à la dimension du gros granulat (trois fois D_{\max}). Les fibres courtes seraient contournées, voire elles-mêmes source de rupture si la liaison fibre était de mauvaise qualité. Sur la figure 2.3, il est illustré l'effet bénéfique des fibres longues sur le blocage de développement des fissures.

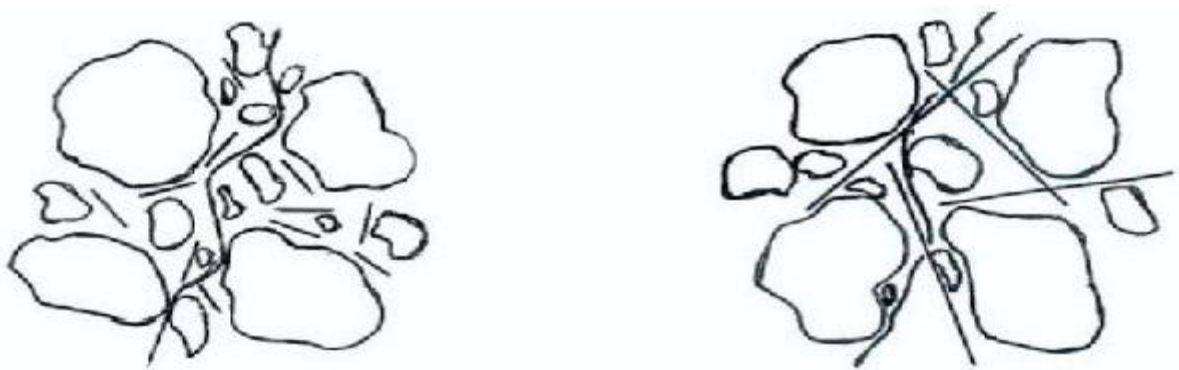


Figure 2.3: Schéma de disposition des fibres. [46]

En général, Pour la majeure partie des applications industrielles actuelles, la maniabilité de béton de fibres est un paramètre primordial. Des études expérimentales réalisées par plusieurs chercheurs [47], représentée sur la figure 2.4, ont montré que le rapport l/d de fibres cylindriques joue un rôle principal dans la maniabilité.

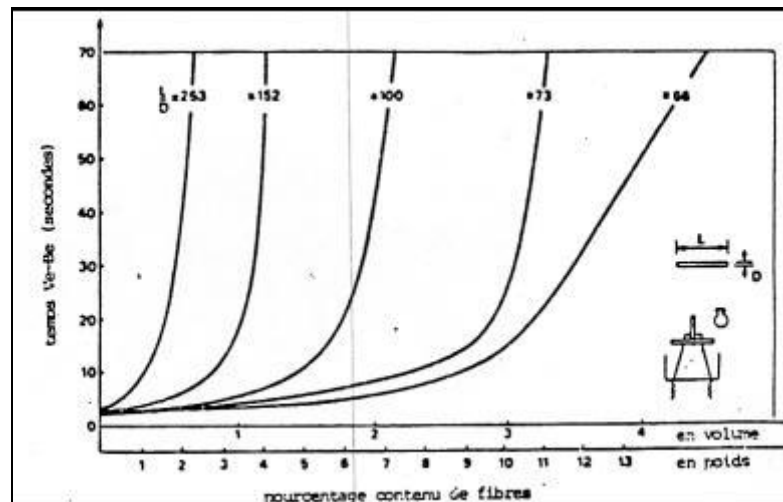


Figure 2.4 : Effet du rapport de l'aspect l/d sur l'ouvrabilité d'un mortier renforcé de fibres. [47]

En conclusion, pour une longueur donnée de fibre, la maniabilité d'un béton renforcé de fibres diminue avec la diminution du diamètre de cette fibre, et que pour un rapport longueur /diamètre donné, la maniabilité diminue lorsque la longueur de la fibre augmente [19]. Cette constatation est valable pour d'autres types de fibres (fibres de verre, fibres de carbone).

2.2.1.3. Teneur en fibres

Toutes les études ont mis en valeur une diminution très nette de la maniabilité, lorsque la quantité de fibres dans un mélange augmente et la composition de la matrice est conservée. La figure 2.5 [48] donne la variation de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction de la teneur en fibres de polypropylène et d'acier.

- W_p : pourcentage en poids de fibre de polypropylène par rapport au poids sec des constituants ;
- V_f pourcentage en volume des fibres (acier et polypropylène) dans le béton, $V_f = 2.0 W_p / 0.95$

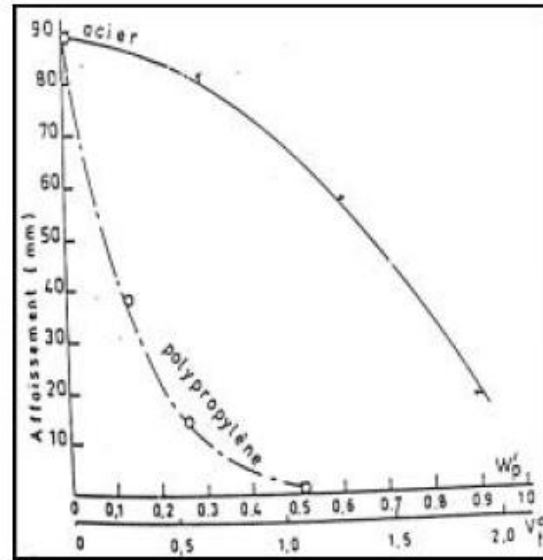


Figure 2.5: Effet de fibres incorporées dans un béton sur son affaissement. [48]

Autres résultats obtenus par Majumdar et al. [49], en utilisant un béton renforcé de fibres de verre, confirment cette réalité. Ils ont constaté, après une série d'essais, une diminution rapide de l'ouvrabilité avec l'augmentation de l'élançement de la fibre, ainsi qu'avec l'augmentation de la proportion volumique des fibres incorporées.

D'autre part, Marsh et al. [50], ont opéré avec de petits faisceaux de deux cent quatre fibres de verre de diamètre 0.013 mm, liées entre elles par un liant organique immédiatement après leur sortie des filières ayant une longueur entre 12.5 et 51mm. Ces fibres avaient une influence remarquable sur l'affaissement, comme le montre le diagramme de la figure 2.6.

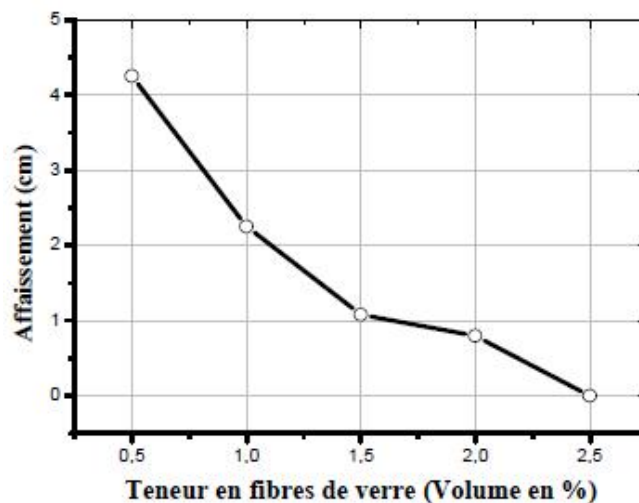


Figure 2.6: Effet de la teneur en fibres de verre sur l'ouvrabilité. [50]

2.2.2. Optimisation du béton de fibres

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 sa mise en place, donc assurer un moulage et un serrage correct du matériau avant prise de liant. La fabrication d'un béton de fibres ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant. Comme pour tous les bétons modernes, il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance. Il n'existe pas encore, comme pour les autres bétons, d'outil informatique d'aide à la formulation. La formulation d'un béton de fibres reste donc une démarche essentiellement expérimentale.

Pour une matrice donnée (pâte et granulat), la maniabilité décroît lorsque la quantité de fibres ajoutée augmente. Pour améliorer l'ouvrabilité, il convient d'utiliser une quantité de fines (sable et ciment) plus importante que pour un béton ordinaire [34]. Par exemple, l'ACI [1] propose d'utiliser un rapport sable sur gravillon égal à 1. En ce qui concerne les fibres, plus le rapport longueur sur diamètre (l/d) est élevé, plus grand est le risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en œuvre et nuisent au comportement mécanique. De plus, la longueur des fibres doit rester supérieure à deux fois la taille du plus gros granulat ($l > 2D_{\max}$) [34] pour rendre possible leur action mécanique au niveau des microfissures.

Récemment, Rossi et al. [51] ont mis au point une méthode d'optimisation de la composition des bétons de fibres métalliques devant être utilisés dans des structures en béton armé. Cette méthode est basée aussi sur la méthode de Baron-lesage [52], contrairement à Serna Ros [53] qui utilise le cône d'Abrams, cette étude a été réalisée avec le maniabilimètre L.C.L.

Le principe de cette formulation consiste à :

- ✓ Fixer au départ le rapport eau/ciment ainsi que le pourcentage des fibres à introduire dans le mélange,
- ✓ Déterminer le rapport optimum sable / gravier pour lequel la maniabilité est plus grande.
- ✓ Fait varier la quantité d'eau et de ciment ainsi que la quantité de superplastifiant afin d'obtenir la maniabilité souhaitée tout en respectant les recommandations de l'utilisation du superplastifiant.

2.2.3. Mise en œuvre du béton de fibres

Une fois le béton formulé et fabriqué, il reste à le mettre en œuvre. Cette opération est fondamentale car elle conditionne les caractéristiques mécaniques du matériau [51, 54]. En effet, si on peut considérer qu'un malaxage suffisant permet une répartition homogène des fibres dans le béton frais, les parois et, surtout, l'écoulement du béton orientent les fibres suivant des directions préférentielles ce qui engendre une forte anisotropie. De plus, pour certaines pièces, une grande hauteur de déversement du béton ou une forte vibration peuvent entraîner une ségrégation des fibres. Les propriétés des composants sont fonctions des propriétés élémentaires de chaque composant et des méthodes de mise en œuvre (Fig. 2.7) lors du coulage, de la projection ou de la vibration. Une orientation préférentielle des fibres induit une anisotropie souvent bénéfique, renforcée pour des ouvrages minces par les effets de paroi.

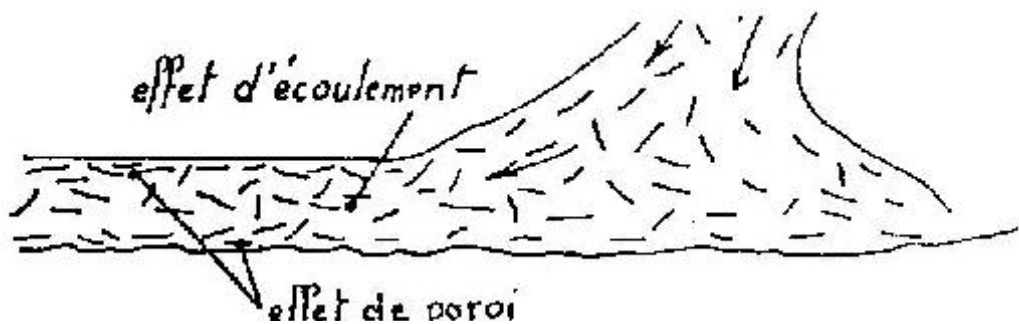


Figure 2.7: Effet d'écoulement. [46]

D'après les recherches effectuées, la mise en œuvre peut être limitée en deux facteurs majeurs: La nature et la forme des fibres. Odelberg [55], après une étude extensive, a montré que la longueur de fibre doit être adaptée dans chaque cas en fonction des techniques de mise en œuvre retenues. La figure 2.8 donne une relation entre la longueur des fibres en mm et le pourcentage de fibres en volume.

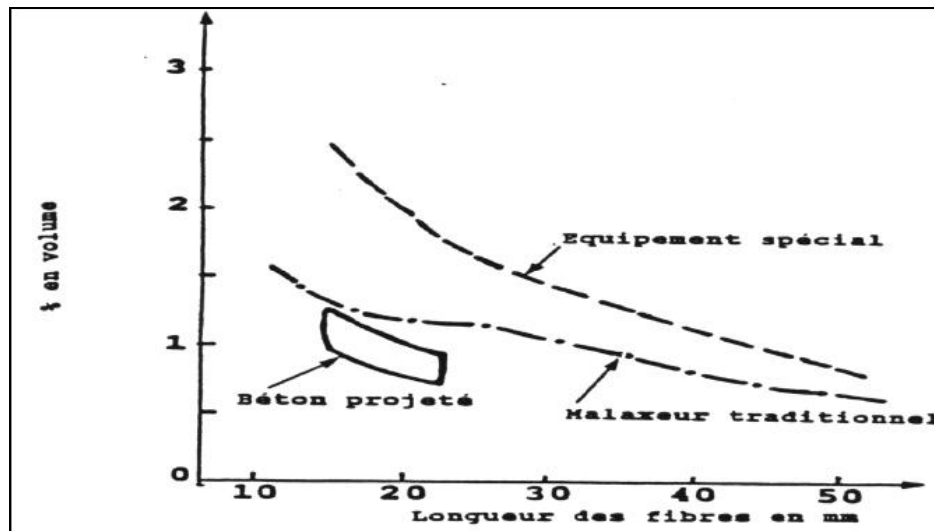


Figure 2.8: Limites technologiques pour la mise en œuvre du béton de fibres d'acier. [55]

Pour le malaxage, il est recommandé que les fibres doivent être distribuées de façon homogène dans le mélange du béton. Il faut éviter la formation de pelotes de fibres. Pour cela il faut introduire les fibres dans le béton avec précaution particulière au cas où la quantité de fibres est voisine du maximum calculé, et aussi en cas d'un élanement élevé. L'ACI [1] recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées, et les matériaux recherchés :

- 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.
- 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.
- 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. Les superplastifiants ajoutés 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.

Le compactage à l'aiguille vibrante n'est généralement pas souhaitable lors de la mise en œuvre de béton renforcé de fibres afin d'éviter toute ségrégation et le cheminement. Ce compactage peut pourtant être requis le long des arrêts de coulage pour des applications spécifiques, comme par exemple pour garantir une liaison fiable entre le béton et un profilé métallique en construction mixte. Le type de compactage par table vibrante, compactage manuel et vibration interne est considéré comme ayant une influence considérable sur la distribution des fibres. Une attention particulière doit être apportée à la vibration, de façon à éviter une déhomogénéisation et une ségrégation du mélange. Cela concerne à la fois la fréquence de vibration, la durée de la vibration et la manière de vibrer (distance entre les points de vibration, épaisseur des couches de béton à vibrer, etc.).

Les bétons de fibres métalliques préparés doivent avoir la facilité de remplir les moules et les coffrages aisément. Des moyens de vibrations s'avèrent nécessaires pour accomplir cette mission. La conception d'un BFM vise toujours l'obtention d'une répartition et d'une orientation des fibres parfaitement isotropes. Or, dans la réalité cette isotropie est difficile à obtenir, parce que lors du coulage, les parois longitudinales du coffrage orientent les fibres suivant des directions préférentielles, où les fibres sont parallèles aux contraintes potentielles de traction. Il en ressort donc, qu'il est nécessaire d'optimiser la formulation et de parfaire la rhéologie de BFM afin de faciliter leur mise en œuvre.

L'orientation préférentielle des fibres est généralement liée à :

- Techniques de mise en œuvre adoptées.
- Les effets d'écoulement du BFM.
- Les techniques de mise en œuvre sont :
- Béton coulé « en pompe, une benne ou, godet à manchon »
- Béton projeté.
- Béton placé à l'aide d'une pelle ou d'une fourche.

Si le béton s'écoule facilement dans le coffrage soit par gravité ou, sous l'effet de vibration ; les fibres s'orientent au sens de l'écoulement. 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.

En général les propriétés rhéologiques du béton de fibres dépendent principalement des caractéristiques du béton (matrice), du type de fibres et de façon significative de la méthode de fabrication. L'introduction des fibres courtes distribuées uniformément et orientées de façon aléatoire dans les matériaux à base de ciment, diminue l'ouvrabilité, et augmente le volume des vides dans le composite. Du fait du très grand nombre de paramètres impliqués, la prévision de l'ouvrabilité des composites est difficile.

2.3. Comportement mécanique du béton de fibres

Le principe de renforcement du béton par des fibres métalliques est nettement différent d'un renforcement par des armatures classiques. Dans le béton armé, l'acier travaille fréquemment à sa contrainte maximale admissible; cela est possible lorsque les armatures sont suffisamment ancrées. Mais dans le béton armé de fibres lisses et droites (dans la plupart des cas); seul une petite longueur d'ancrage est souvent disponible. Cela veut dire que les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres dépendent de façon générale de la qualité des fibres, de celle de la matrice et de l'adhésion entre elles. La résistance des bétons faits de matrices contenant des fibres courtes discontinues est contrôlée essentiellement par la liaison inter-faciale et par la qualité de la fibre et d'autres paramètres schématisés sur la figure 2.9. [36]

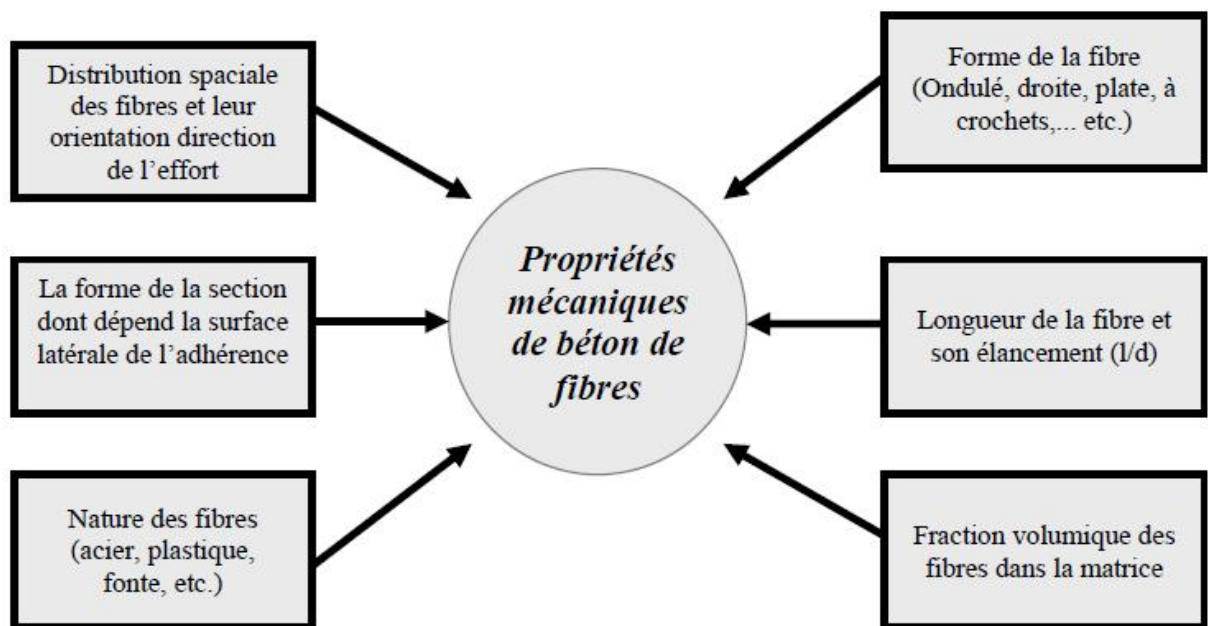


Figure 2.9 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres. [36]

2.3.1. Mécanisme des fibres dans la matrice de béton

2.3.1.1 Fonctionnement de la fibre dans la matrice de béton

Le béton est un matériau composite à matrice fragile. L'introduction de fibres a pour objectif le contrôle de la fissuration. Il est donc important de raisonner en termes de couple fibre-matrice. Toutefois, les éléments qui interviennent dans le fonctionnement d'une fibre sont principalement liés aux caractéristiques d'adhérence entre la fibre et le béton. L'adhérence fibres-matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice, cette adhérence est assurée par trois liaisons :

- Une liaison élastique,
- Une liaison de frottement,
- Une liaison créée par un ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets, ondulation, dentelles).

Le fonctionnement d'une fibre dans une matrice cimentaire peut être étudié expérimentalement par l'essai d'arrachement "pull-out test". Si on considère une fibre droite, son comportement dépend essentiellement de l'interface fibre matrice et de son inclinaison par rapport à la sollicitation. En effet, la longueur d'ancrage de la fibre dépend de l'adhérence acier-béton, de l'énergie dissipée par son arrachement et de la loi de glissement à l'interface (longueur critique de la fibre). Afin d'améliorer les capacités d'ancrage et d'augmenter ainsi l'énergie dissipée lors de l'arrachement, des fibres aux géométries et ancrages plus complexes sont commercialisées [54].

D'après Rossi et al. [56], le principe d'action des fibres se manifeste à deux échelles : le matériau et la structure. Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction. On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (Fig.2.10). Une première phase où l'on observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice (auréoles de transition). La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron. Durant cette phase, les fibres sont inactives.

La deuxième phase correspond au développement des macrofissures qui résultent de la coalescence des microfissures. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Cette étape est suivie par la propagation d'une macrofissure (phase 3) séparant l'éprouvette en deux blocs, et provoquant ainsi la ruine de l'éprouvette [36, 57, 58].

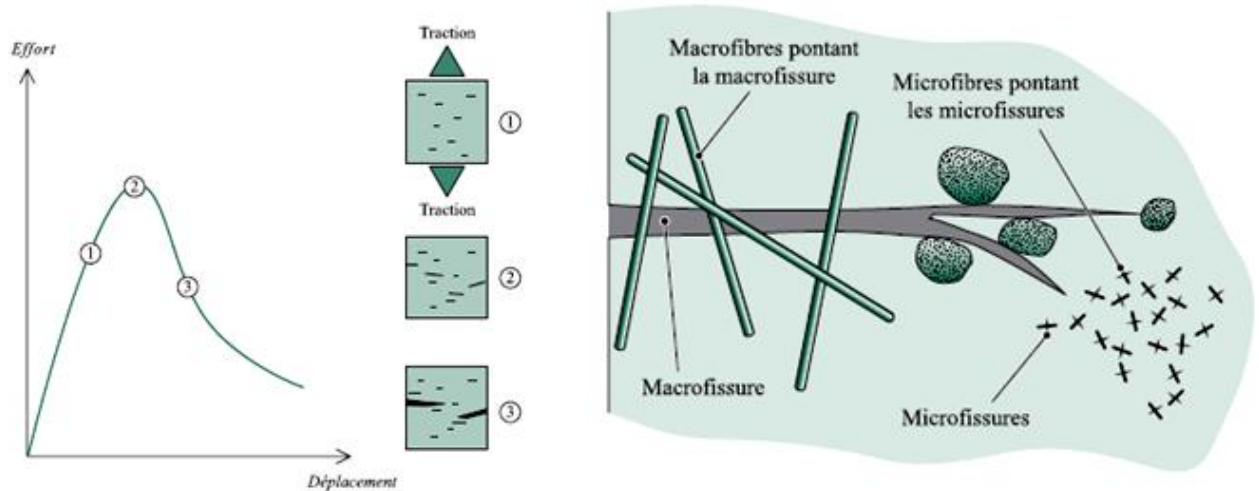


Figure 2.10 : Rôle des fibres dans le processus de fissuration du béton. [36]

2.3.1.2 Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques différentes selon leur nature. Chaque type de fibre peut présenter une influence particulière sur le comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications spécifiques. Le choix du type de fibres utilisées est donc fonction du domaine d'utilisation et des performances souhaitées [54].

La ductilité dépend essentiellement du volume, de l'orientation et du type des fibres. Il a été montré par plusieurs chercheurs que les fibres déformées à leurs extrémités sont plus efficaces par rapport à celles déformées sur leur longueur entière [53, 55]. Cependant les fibres munies de crochets sont celles qui présentent le plus d'avantages à cause de leur bonne adhérence mécanique [21]. L'utilisation de deux grandes familles de fibres métalliques a permis de distinguer un fonctionnement mécanique différent :

- **Les fibres qui fonctionnent par adhérence** : Elles sont généralement droites et ont une surface spécifique très importante. Leur intérêt est de limiter fortement les ouvertures des fissures.
- **Les fibres qui fonctionnent par ancrage** : Elles ont une surface spécifique peu importante. Leur ancrage est réalisé soit par des crochets ou des têtes placées aux extrémités de la fibre, soit par des ondulations disposées tout au long de la fibre.

Les courbes charge-flèche de la figure 2.11 avec différents types de fibres montrent que :

- Pour un élanement de 60 ou 75 et pour un dosage 2 %, les fibres à crochets produisent des résistances à la flexion et des énergies d'absorption plus grandes que celles des fibres droites ou ondulées.
- Les fibres à crochets sont plus efficaces que les fibres droites et ondulées, en augmentant l'énergie de post-pic des BFM sous les contraintes de compression. En général, l'effet des fibres sur la résistance à la compression est relativement faible et les différents types de fibre semblent agir similairement à cet égard.[59]

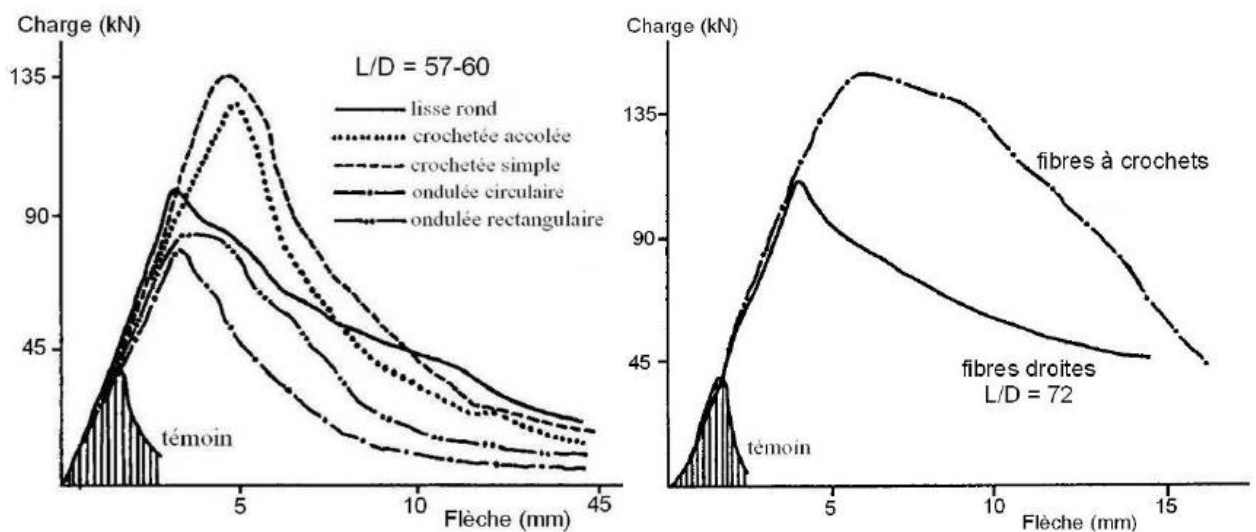


Figure 2.11: Courbe charge –flèche des BFM avec fibres à crochets et droites. [59]

2.3.1.3 Effet de l'orientation sur les caractéristiques mécaniques

L'orientation et la dispersion des fibres sont grandement influencées par les dimensions de la pièce, la direction du coulage, les propriétés rhéologiques du béton frais, etc. Il existe une orientation préférentielle des fibres qui a un effet sur le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres métalliques. Ainsi, dans une structure et un chargement mécanique donné, les fissures apparaissent, généralement perpendiculairement aux contraintes maximales de traction. En suivant l'orientation préférentielle des fibres vis-à-vis des fissures créées, on pourra aller du très efficace (fibres perpendiculaires aux fissures) à la pire situation (fibres parallèles aux fissures).

L'effet de l'orientation sur le comportement post-fissuration des éprouvettes a été étudié par plusieurs chercheurs. Casanova [54] a réalisé une étude de l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique en traction des éprouvettes en béton renforcé de fibres métalliques. Il a effectué des carottages suivant trois directions sur un bloc de béton (le coulage étant effectué suivant un axe vertical). La figure 2.12 résume les résultats des essais de traction directe effectués sur ces carottes relatives aux trois directions.

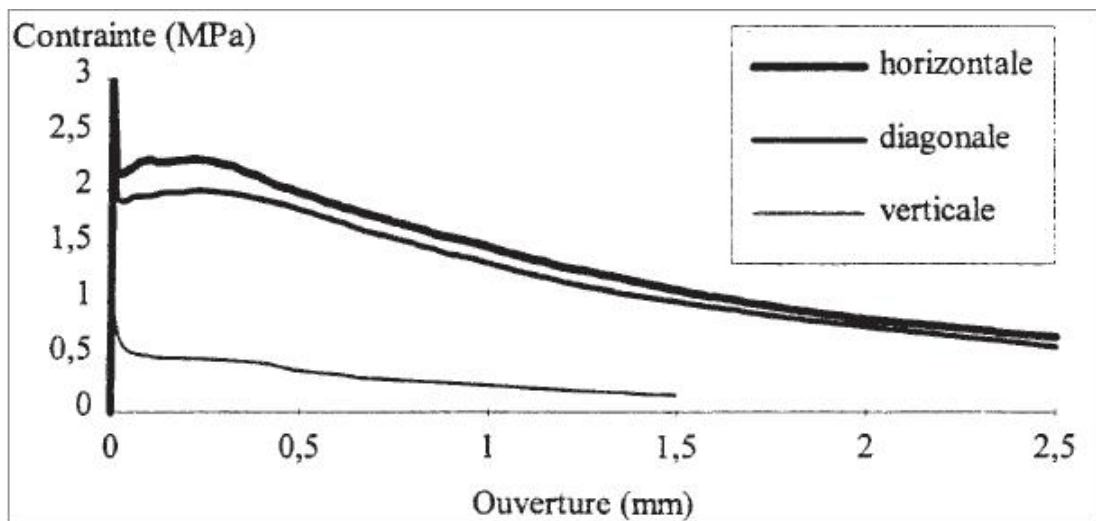


Figure 2.12 : Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré. [54]

D'après les résultats de cette figure, on remarque une parfaite corrélation entre l'orientation préférentielle des fibres et le comportement mécanique en traction suivant les trois directions. D'autre part, l'étude faite par Debicki [60] sur l'effet de l'orientation des fibres sur la relation contrainte-déformations en compression des

BFM permet de déduire :

- Il existe une position favorable des fibres pour des valeurs θ comprises entre 0 et 90° .
- La phase élastique n'est pas modifiée par l'angle d'orientation des fibres.
- L'initiation d'une microfissuration est plus intense pour $\theta = 0^\circ$ et donne une grande souplesse à l'éprouvette.
- $\theta = 90^\circ$ facilite la création des microfissures.
- $\theta = 0^\circ$ les fibres par effet de couture retardent la formation des fissures.
- Le phénomène d'instabilité au pic est nettement amélioré pour $\theta = 0^\circ$.

Donc l'orientation des fibres au cœur du béton joue un rôle important dans la résistance à la traction. En effet, le gain de résistance apporté par les fibres au travers d'une fissure varie en fonction de l'angle d'incidence. Une fibre perpendiculaire au plan de la fissure aura une efficacité maximale. Il est alors intéressant de faire en sorte que les fibres soient orientées perpendiculairement aux plans de fissuration anticipés. Pour une poutre sollicitée en flexion, l'orientation des fibres à favoriser, est parallèle à l'axe de la poutre.

2.3.2. Comportement en compression

Les différents chercheurs sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certain cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : le premier est de maintenir les fissures ce qui est favorable pour la phase post pic, le second est de créer des défauts supplémentaires à l'interface fibres-béton ce qui peut contribuer à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

Les résultats des travaux de Dardar [61] présentés sur la figure 2.13 montrent que la résistance peut être diminuée par l'addition de fibres dans le béton. A partir d'un volume de fibre de 0.5 %, pour les fibres de polypropylène, la résistance à la compression diminue et les fibres les plus longues présentent la plus faible efficacité.

Selon l'auteur cette diminution peut s'expliquer par une mauvaise homogénéité du béton et par une valeur E/C élevée, ou une mauvaise compacité due à un excès de fibres.

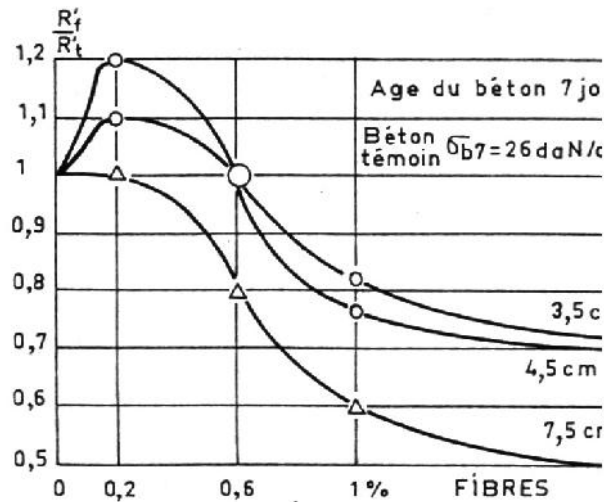


Figure 2.13 : Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres. [61]

Ces résultats sont confirmés par Houari [62] où les résistances à la compression de béton de fibres métalliques sont inférieures à celles de bétons sans fibres. Et que la présence des fibres dans la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes ainsi, la rupture fragile caractéristique du béton traditionnel n'est plus observée en présence des fibres.

Rossi [19] a conclu que les bétons de fibres métalliques, constitués de fibres longues, ont toujours des résistances en compression inférieure à celles du béton non fibré fabriqué avec les mêmes constituants et à maniabilité équivalente. Tandis que, pour les fibres courtes l'augmentation des résistances en traction et en compression est le résultat le plus fréquemment attendu, et obtenu. Cette chute de résistance et du module de Yong des BFM s'explique par la quantité considérable de sable et de pate de ciment présente dans le béton de fibre par rapport au béton ordinaire.

En revanche, Gopalaratnam et al. [63] ont montré dans leurs résultats statistiques faits sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 76 mm et de hauteur 152 mm sollicitées en compression, que la présence des fibres d'acier dans la matrice cimentaire augmente la résistance à la rupture de 35 % pour 1.5 % de fibres en volume, et la déformation correspondante à la résistance maximale augmente de 38 %. Dans

cette optique, Damgir et al. [64] ont trouvé dans leurs résultats que la résistance à la compression augmente lorsque le volume de fibres augmente, cette amélioration atteint 21.20 % à 28 jours pour un dosage de 2% de fibres. De même Johnson et al. [65] concluent que la présence de fibres d'acier apporte un gain maximal de 15 % de la résistance en compression, et plus le dosage en fibres est considérable, plus la dispersion de la partie descendante de la courbe effort-déformation est significative. Le renforcement du béton par des fibres se retrouve sensiblement plus résistant, et nettement plus ductile.

2.3.3. Comportement en traction

D'après la bibliographie, les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. Elles sont plus faibles ou nulles lorsque les fibres ont une résistance inférieure, comme c'est le cas des fibres de polypropylènes [61]. Balaguru et al. [66] suggèrent, après une série des travaux, que l'effet des fibres en traction peut être négligé si la teneur en fibres est inférieure à 2 % du volume. Alors que les résultats fournis par Johnston et Coleman [67], montrent que la résistance de béton de fibres augmente de 5 à 30 % de la résistance en traction direct d'un béton non fibré. Cette augmentation est fonction de la teneur en fibres et de leur élancement comme il est illustré sur la figure 2.14.

En travaillant sur diverses compositions Serna Ros [53] obtient des augmentations de 3 à 9 % de la résistance ultime du béton. Il a constaté que la présence de gros granulats diminue la résistance à la traction par rapport à un béton fin. Cette remarque s'applique aussi aux déformations.

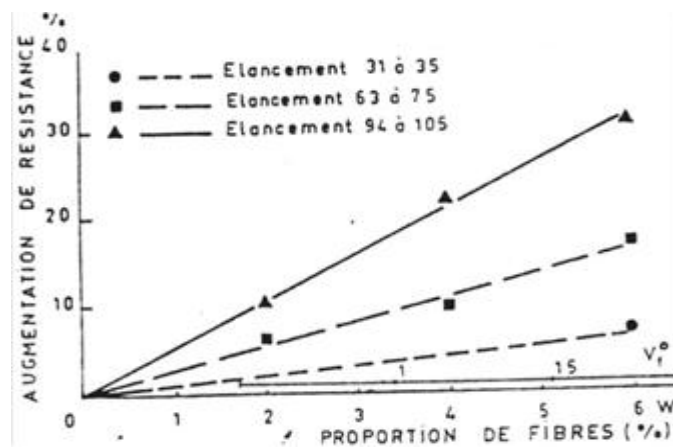


Figure 2.14 : Augmentation de la résistance de Traction d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction de l'élancement des fibres. [67]

En règle générale, la résistance à la traction de béton de fibres augmente avec la longueur et le volume des fibres mises en place, elle dépend de l'orientation des fibres par rapport au sens des efforts et elle est influencée par la granulométrie de la matrice. Aussi, il est remarqué que le module d'élasticité reste pratiquement inchangé et la courbe contrainte - déformations montre une certaine ductilité du matériau au-delà de la contrainte ultime. Cette loi de comportement est une loi locale applicable dans la zone fissurée d'une éprouvette en traction.

2.3.4. Comportement en flexion

Lors d'un essai de flexion, une transformation très significative de la courbe effort-déformation, est généralement constatée et qui fait apparaître un accroissement faible ou nul de la résistance à la première fissuration et une résistance parfois supérieure ; après la première fissuration qui s'étend sur une forte déformation. 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 et au déplacement de l'axe neutre durant la flexion.

Une étude étendue de la majorité de données disponibles a été faite par Johnston [45] où il a trouvé une relation fondamentalement linéaire entre la résistance à la flexion et $V.1/d$ avec V le dosage en fibre et $1/d$ l'élanement des fibres. Cette relation est confirmée par les résultats de Dehousse [68] et avec des fibres à crochets, il a fournit des résultats encore plus encourageants. De même avec des fibres de verre, Majumdar et al. [49] ont trouvé des résultats intéressants comme indiqué sur la figure 2.15.

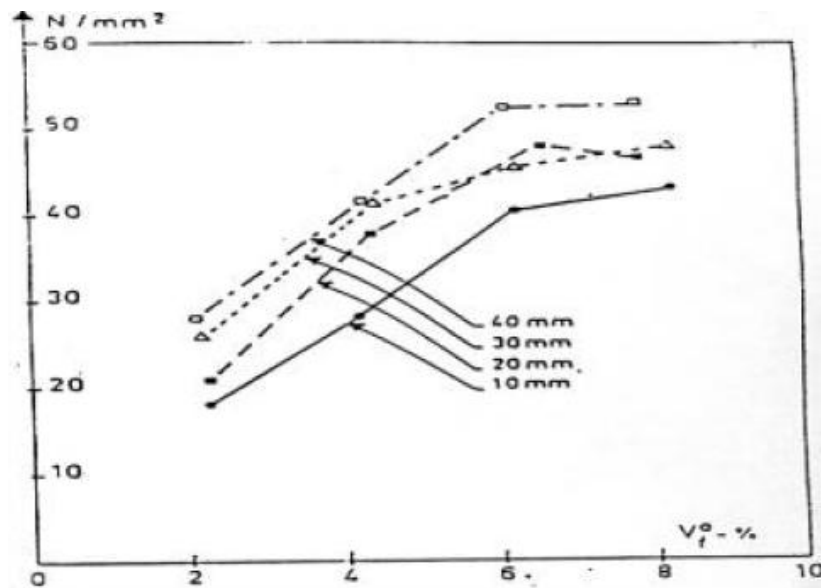


Figure 2.15: Résistance à la flexion du ciment armé de fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres. [49]

Les travaux réalisés par Serna Ros [53] montra que la charge de rupture en flexion peut être améliorée jusqu'à 150 %, et la flèche multipliée par 8. Avec des fibres métalliques 1% en volume, Houari [62] trouva 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 et de fibres testé. Il conclut dans ces travaux, que les fibres modifient le mécanisme d'endommagement sous sollicitation statique. La première fissure 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 et la forme des fibres (ancrage améliorés), mais aussi aux orientations plus favorables des fibres longues. La figure 2.16 récapitule les résultats trouvés par Edgington [69], où l'effet de l'orientation des fibres est considérable sur la résistance à la flexion de béton de fibres.

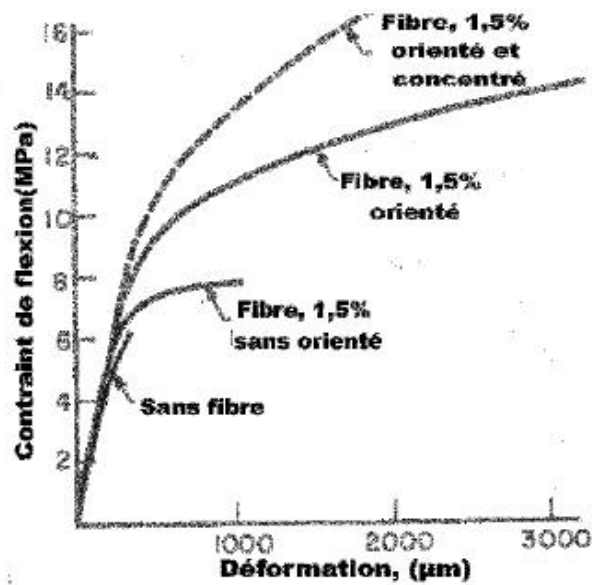


Figure 2.16: Effet de l'orientation des fibres sur le comportement de béton de fibres en Flexion. [69]

D'après ces divers résultats, on peut conclure que la teneur en fibres joue un rôle important dans le comportement de béton de fibres en flexion et modifie d'une façon remarquable la microfissuration ainsi que la macro-fissuration de ce matériau.

2.3.5. Résistance au cisaillement

Le comportement au cisaillement des bétons renforcés de fibres a été étudié à travers des essais de cisaillement direct par plusieurs auteurs. Fariboz et al. [70] ont utilisé deux types de fibres (métallique et synthétique), à différents dosages. Ils ont montré que les fibres améliorent le comportement au cisaillement du béton, tandis que le béton sans fibres a révélé une rupture fragile. Ils ont aussi constaté que les fibres métalliques ont un meilleur comportement au cisaillement que les fibres synthétiques, lié sans doute à la rigidité des fibres synthétiques généralement plus faible que celle des fibres métalliques. D'autre part, Tan et al. [71] et Mirsayah et al. [72] sont arrivés aux mêmes conclusions concernant la rupture fragile des compositions sans renfort de fibres. Les résultats de la figure 2.17 montrent que dans un essai de cisaillement direct sur béton renforcé de fibres on constate une augmentation quasi linéaire de la résistance au cisaillement du béton avec l'augmentation du dosage en fibres [70].

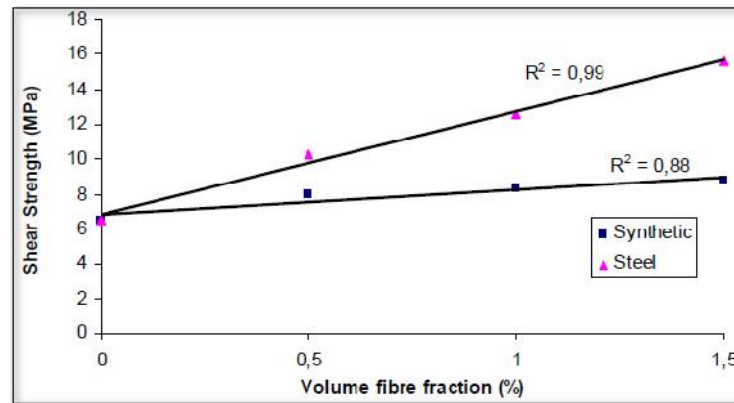


Figure 2.17 : Résistance au cisaillement en fonction du dosage en fibres. [70]

Plusieurs études sur le béton de fibres métalliques [53, 54, 73] ont mis en évidence la possibilité d'utiliser des fibres comme remplacement partiel ou total des armatures transversales. En effet, la mise en place des cadres prend du temps et peut conduire à un ferrailage si dense qu'il rend difficile la mise en œuvre du béton surtout dans les nœuds. Couchiara et al [73], ont trouvé que pour les poutres testées en flexion, les cadres ont un apport de 47 % par rapport aux poutres sans armatures transversales, alors qu'en présence de fibres avec un dosage optimal de 1 % en fibres, la résistance à l'effort tranchant a augmenté de 64 %. Une combinaison des cadres avec 0.5 % de fibres donnait un apport de 96 %. Sur des poutres sans armatures transversales au voisinage des appuis Serna Ros [53] trouve que la présence des fibres permet d'améliorer la résistance à l'effort tranchant de 54.5 % par rapport à une poutre en béton traditionnel.

2.3.6. Déformabilité (courbe charge-flèche)

Sur un essai de flexion en trois points mené jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette, on obtient la courbe charge-flèche d'où on peut déduire la charge élastique, la charge de rupture et d'énergie de rupture. Le béton de fibres est plus ductile et plus résistant.

Les figures 2.18, 2.19 et 2.20 illustrent trois exemples de courbes effort-déformation en compression, traction et flexion [47]. On constate que le début des courbes est peu influencé par les fibres (zone élastique). Ensuite, 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.

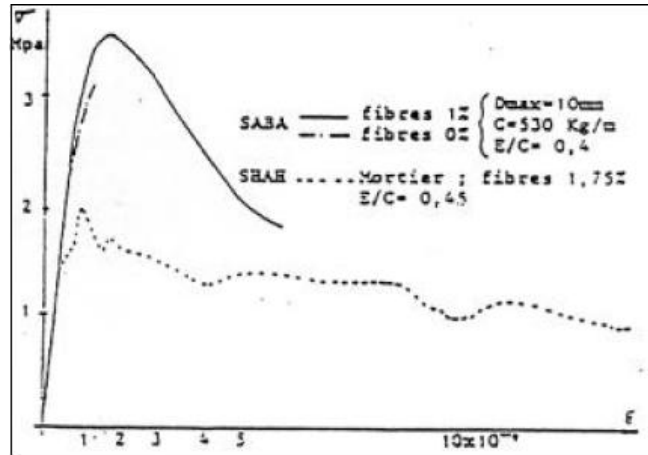


Figure 2.18: Courbe effort- déformation en compression.

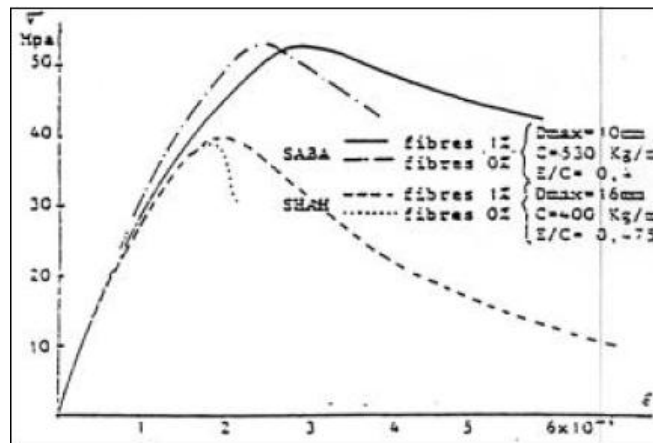


Figure 2.19: Courbes effort- déformation en traction.

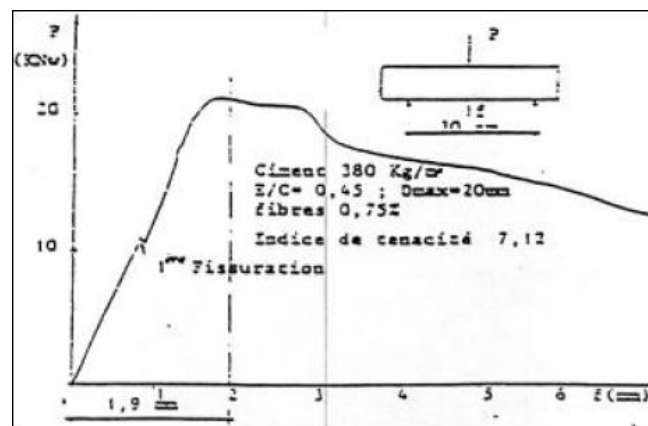


Figure 2.20: Courbe charge -flèche en flexion.

2.3.7. Résistance au choc

Le comportement au choc des bétons de fibres est un thème récurrent dans la caractérisation de composites cimentaires fibrés. La résistance aux chocs, qui est l'énergie de rupture sous charge impulsive, fournit une indication sur la fragilité d'une pièce de forme donnée, ou sur éprouvette et dispositif normalisés d'un matériau donné.

Les essais réalisés avec le pendule de Charpy modifié sur des éprouvettes (22×22×100 mm³), ont bien montré la tendance à l'augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres. Cette augmentation peut atteindre 100% [60]. En général, La présence des fibres dans la matrice cimentaire modifie ses propriétés mécaniques et ses lois de comportement aussi bien sous les sollicitations quasi-statique que dynamique. Elles confèrent une non linéarité de comportement et une apparente ductilité. Cette dernière est essentiellement due aux phénomènes de couture introduite par les fibres.

2.3.8. Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion; c'est la détermination de la capacité de la zone de surface du béton de résister aux charges normales et tangentielles abrasifs. L'introduction des fibres est un moyen d'améliorer certaines propriétés du béton y compris la résistance à l'abrasion. Les fibres métalliques ont pour rôles d'absorber et dissiper l'énergie, réduire l'initiation et la propagation des fissures, augmenter la durabilité du béton soumis à l'abrasion et ralentir la dégradation.

La résistance à l'abrasion est liée à la résistance à la compression comme indiquée sur la figure 2.21.

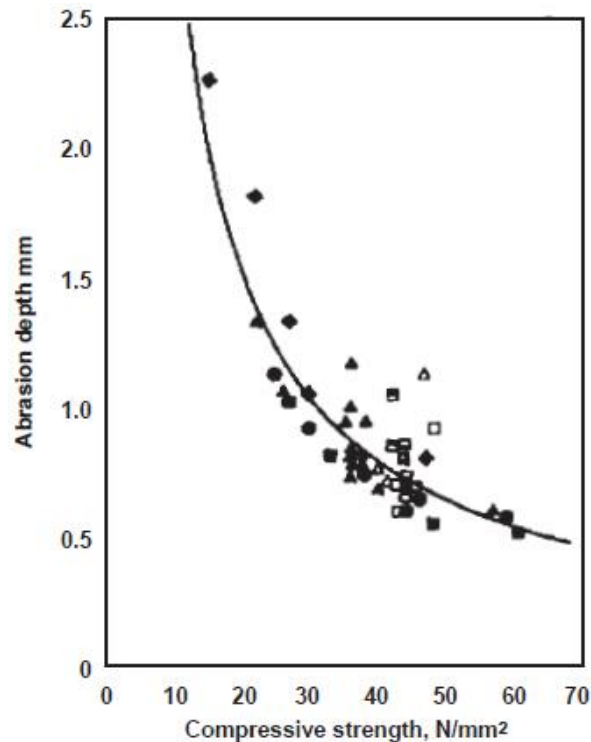


Figure 2.21: Relation entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression. [74]

Sur des tests d'abrasion par le chargement des cubes 100mm dans une machine d'abrasion Los Angeles et en gardant E/C constant, il a été constaté, qu'après 2000 tours, que les cubes contenant 0.5 et 1% de fibres d'acier avait une usure moins respectivement de 2 et 9% de moins [75]. L'essai d'abrasion confère un haut degré de choc sur les cubes entraînant une fissuration importante et une perte du poids. La présence des fibres d'acier sert à limiter la croissance de ces fissures, et aussi à garder le matériau non fissuré pour un certain temps. Les conclusions de Nanni [76] sur les chaussées compactées au rouleau, exposées au trafic routier sont moins dégradables par l'abrasion lors de la présence des fibres.

En générale l'inclusion de fibres dans le béton sera bénéfique relativement au phénomène d'abrasion en empêchant l'initiation et la propagation des fissures, et en améliorant ainsi les caractéristiques post-ruptures du matériau. D'autre part, si elles ont tendance à se glisser ou à se retirer ce qui peut accélérer le développement des fissures et les rendre préjudiciables. Dans le cas de l'abrasion légère où le béton ne se fissure pas, l'ajout des fibres n'apportera aucune amélioration. Toutefois, leur inclusion peut augmenter la dureté moyenne du béton, et dans certains cas (par exemple, où les effets de

l'abrasion correspond à une légère rectification) améliorer la résistance à l'abrasion. Tous simplement, la contribution des fibres dans toute application particulière dépend des dimensions physiques de la fibre, le type de matériau (acier ou carbone, etc.), et le type de chargement à l'abrasion (impact ou de broyage etc.).

2.3.9. Retrait

Le retrait est un des phénomènes physico-chimiques les plus importants dans le mortier et implicitement dans le béton. Ce phénomène qui se résume à une déformation macroscopique différée se produisant en absence de charge, apparaît dès les premiers instants de la vie du matériau et se poursuit durant toutes les étapes de sa maturation. Il est caractérisé par une diminution de volume consécutive à l'évacuation d'humidité. Il croît avec le temps pour tendre après quelques années, vers une limite qui dépend de plusieurs facteurs, notamment les facteurs intrinsèquement liés aux composants de béton (rapport E/C, agrégats/ciment, fibres et la quantité de ciment), et aux facteurs extérieurs au matériau telle que les conditions ambiantes (température et humidité relative), le degré de maturation et les dimensions de la structure.

D'après Mangat et al. [77], les fibres sont utilisées pour réduire l'effet néfaste de la fissuration due au retrait. Les fibres agissent de trois manières suivantes :

- Elles permettent à plusieurs fissures de se fermer par blocage des macrofissures,
- Elles permettent à des efforts de traction d'être redistribués à travers des fissures,
- Le transfert d'effort se produit pour un temps plus long par le retardement et la couture des fissures.

Abdou et Houari [78] dans leurs travaux sur deux natures des fibres illustrent que les fibres diminuent le retrait, cette diminution est de l'ordre de 16 % pour les fibres industrielles, et de 20% pour les copeaux par rapport au témoin et qu'après une longue durée, l'action des fibres est plus précise et les mortiers de fibres se stabilisent plus rapidement que les mortiers témoins. Dans le même sens, Beddar [79] constate, d'après ses études, que les fibres métalliques diminuent le retrait. Cette diminution est de l'ordre de 16 % par rapport à un mortier sans fibres à 28 jours, pour une proportion de 0.5 % de volume de fibres. Mais, avec 1 % de volume de fibres, cette diminution varie entre 11 à 13 % comme la montre la figure 2.22.

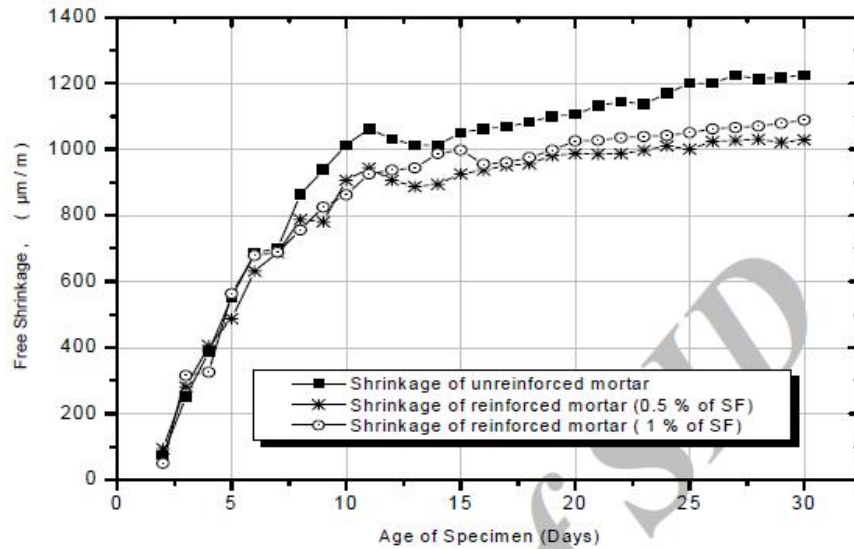


Figure 2.22: Retrait libre d'un mortier sans et avec fibres métalliques.

D'autre part, le même auteur [79] constate, en utilisant des fibres de polypropylène, qu'il y a une augmentation du retrait d'environ 20 % pour un dosage de 1 % en volume de fibres alors qu'elle atteint 30% pour un dosage de 1.5 %. Cette augmentation du retrait de mortier renforcé avec des fibres polypropylène peut-être expliqué par le fait que ces fibres sont minces, très souples et généralement enrobées par des couches de fines ce qui provoque l'augmentation de retrait en augmentant le pourcentage des fibres (Fig.2. 23).

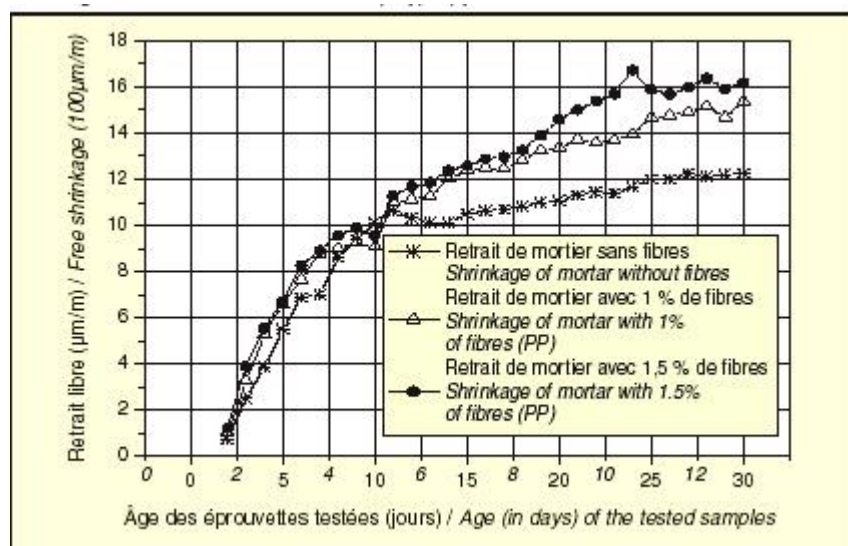


Figure 2.23: Retrait libre d'un mortier sans et avec des fibres de polypropylène.

Chern et al. [80], observent que le retrait de dessiccation est légèrement inférieur pour les bétons fibrés par rapport au béton sans fibre. De même d'autre résultat [81], a montré que l'ajout de 2% en volume de fibres d'acier réduit le retrait libre d'environ 20% pour le béton avec des résistances à la compression des 45 et 65 MPa alors que le retrait du béton avec une résistance de 30 MPa n'a pas été affecté.

Comme conclusion ; on peut dire que les fibres d'acier n'éliminent pas le retrait mais aident à le contrôler. Le retrait du béton est aussi fonction de la nature, de la forme et de la dimension de ses constituants, de leurs proportions dans le mélange, de la quantité d'eau, de l'évaporation à cause du milieu ambiant, sans oublier de la chaleur d'hydratation du ciment pendant les 12 et 24 premières heures.

2.4. Conclusion

La présence des fibres affecte plusieurs propriétés du béton. Leur incorporation dans la matrice cimentaire ne peut pas être tolérée sans des études préliminaires œuvrant à différencier ces propriétés par rapport au béton ordinaire sans fibres. La suite de ce travail, sera orientée vers la quantification de l'apport de fibres métalliques sur certaines propriétés du béton.

CHAPITRE 3

Présentation Des Essais

3.1. Introduction

Les propriétés mécaniques et rhéologiques de bétons renforcés par les fibres métalliques dépendent principalement des propriétés et du volume de fibres, de la matrice ainsi que de la liaison interfaciale fibre–matrice. Dans cette partie de ce travail, on présente les différents essais effectués avec l'introduction des fibres métalliques. On présente en premier lieu les matériaux de base employés, la composition du béton ainsi que les dimensions des éprouvettes utilisées. Ensuite, une description détaillée a été décrite des procédures expérimentales pour l'exécution des différents essais. Bien que le plan de travail initial vise l'étude des effets des fibres sur le mortier, il a été préférable de travailler sur béton à cause des dimensions des fibres que ne convenaient pas.

3.2. Matériaux utilisés

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment portland. Autres composants peuvent être ajoutés afin de conférer au béton certaines caractéristiques comme les ajouts minéraux, les ajouts organiques et les fibres.

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est de type CPJ- CEM II/A 42.5 fabriqué à l'usine de Chlef. C'est un ciment Portland composé, obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Sa densité est de 3.1 alors que sa surface spécifique est de 3700 cm²/g. Les caractéristiques chimiques, minéralogiques ainsi que sa composition sont présentées dans le tableau 3.1

Tableau 3.1 : composition du ciment utilisé.

Composition chimique %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MgO	K ₂ O	PAF
	20.58	4.90	4.70	62.8	0.53	2.28	0.63	0.42	1.00
Composition minéralogique %	C ₃ S		C ₃ S		C ₃ A		C ₄ AF		
	41.8		33.3		5.1		10.7		
Composition du ciment %	clinker			Calcaire			Gypse		
	86.5			10			3.5		

3.2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable roulé provenant de Oued Chlef, qui a pour module de finesse $M_f = 2.42$, une densité apparente de 1.63 et un équivalent de sable $E_s = 89.74\%$. Ceci permet de dire que le sable est propre et que les propriétés d'adhérence et la plasticité de l'argile ne sont pas à craindre. Une analyse granulométrique a été effectuée sur ce sable et la courbe granulométrique est représentée dans la figure 3.1.

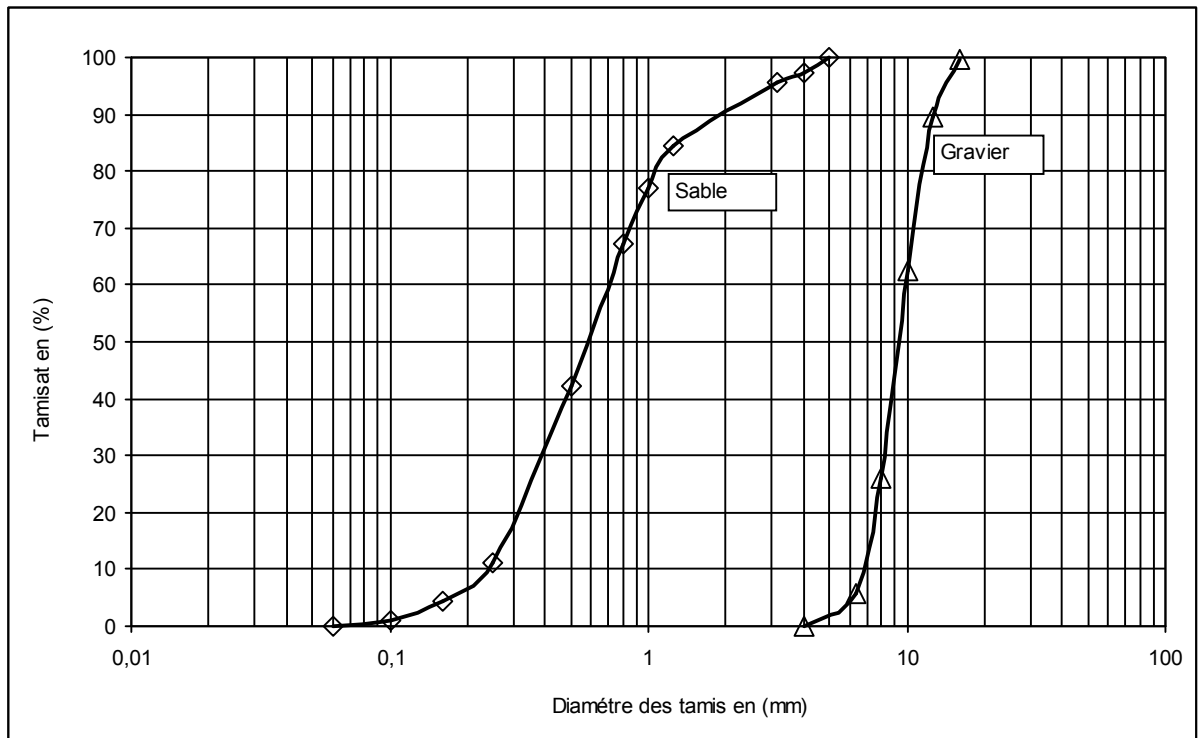


Figure 3.1: Analyse granulométrique du sable et gravier.

3.2.3. Gravier

Le gravier utilisé est un gravier concassé de la carrière d'Oued Fodda de la région de Chlef (Algérie), illustré sur la figure 3.2, et qu'on utilise habituellement dans le béton courant. Le tableau 3.2 présente les caractéristiques du gravier utilisé. Les courbes granulométriques des deux constituants (sable, gravier) sont représentées sur la figure 3.1.



Figure 3.2 : Carrière d'OUED FODDA.

Tableau 3.2 : Caractéristiques du gravier utilisé.

les impuretés	1.2 %
coefficient Los Angeles	24
coefficient volumique	0.27
Densité absolue	2.61
Densité apparente	1.3

3.2.4. Adjuvant

Afin de contrôler la maniabilité du béton et de garder une même consistance tout en introduisant les fibres d'acier, on a utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé par Granitex (Algérie) sous le nom de MEDAFLOW 30. Le produit est conditionné dans des bidons de 10 litres comme la montre la figure 3.3. Il est conçu à base de poly carboxylates qui améliorent considérablement les propriétés du béton. Ce superplastifiant ne présente pas d'effet retardataire, les caractéristiques de ce dernier sont représentées dans le tableau 3.3.



Figure 3.3: Adjuvant utilisé MEDAFLOW 30.

Tableau 3.3 : Caractéristiques de superplastifiant MEDAFLOW 30.

Forme	liquide
Couleur	jaunâtre
PH	6-6,5
Densité	1,07 ± 0,01
Teneur en chlore	<1g/l
Extrait sec	30

3.2.5. Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton qui intervient à toutes les étapes de la vie du matériau pour ses propriétés physico-chimiques. Dans cette étude, l'eau utilisée pour les différentes gâchées de béton est issue directement du robinet. La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est la valeur conventionnelle de 1000 kg/m³. Les propriétés chimiques de cette eau n'ont pas fait l'objet de la présente étude ; elle est supposée potable et ne contient aucune impureté nuisible (matières organiques, alcalis...) conformément à la norme NF P 18-303. [82]

3.2.6. Fibres d'acier

Les fibres d'acier **HE** (*Arcelor Mittal*) peuvent être utilisées théoriquement avec n'importe quel mélange de béton. Elles sont disponibles en longueur allant de 35 à 60 mm, en diamètre de 0.55 à 1 mm et en résistance sur fil de 1100 à 1900 MPa. Dans cette étude, les fibres utilisées sont des fibres **HE++ 75/50** à haute teneur en carbone. Elles sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé à froid et comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux deux extrémités. La figure 3.4 illustre le type de fibre utilisée et le tableau 3.4 récapitule leurs caractéristiques.

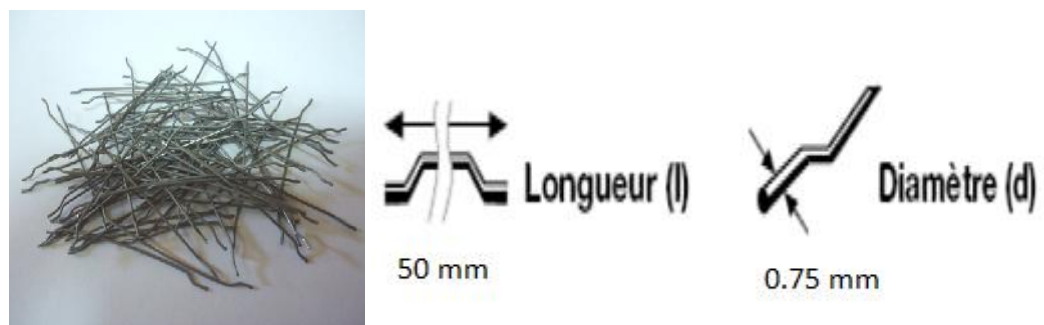

**Figure 3.4:** Fibres Arcelor Mittal de type **HE++ 75/50**.

Tableau 3.4 : Caractéristiques des fibres métalliques HE++ 75/50

Forme	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Elancement (l/d)	Résistance à la traction (MPa)	Longueur des fibres par 10 kg (m)	Nombre de fibres par kg
	50	0.75	67	1900	2885	5700

3.3. Composition du béton

La composition du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable et graviers) conduisant à un béton dont l’ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possèdera, après durcissement, les meilleurs caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistances mécaniques, faible retrait, bonne durabilité etc.).

Les méthodes proposées sont nombreuses. Dans le présent travail la formulation de béton est réalisée par la méthode de **Dreux-Gorisse** [38]. Cette méthode permet de définir d’une façon simple et rapide, une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais que seuls quelques gâchées d’essai et la confection d’éprouvettes, permettront d’ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisées.

On opte pour une résistance désirée du béton supérieure à 40 MPa et en optimisant la composition granulaire en fonction de la qualité des agrégats illustrée sur la figure 3.5, on trouve la composition citée dans le tableau 3.5.

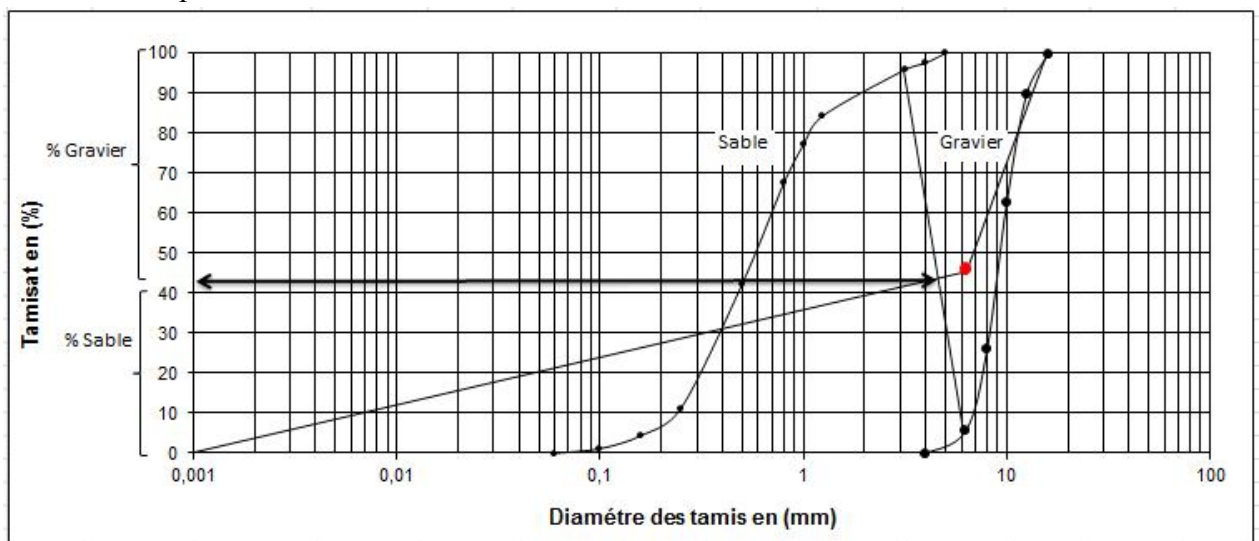
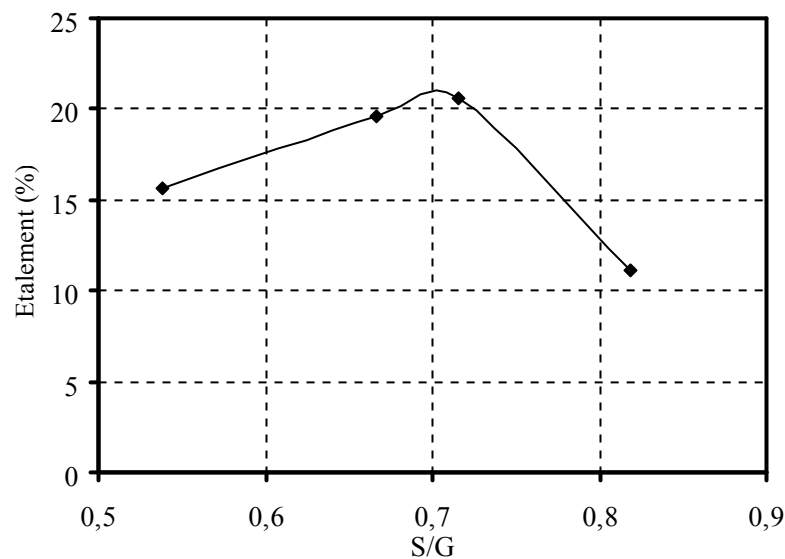


Figure 3.5: Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

Tableau 3.5: Composition du béton.

Constituants	Masse (kg)
Sable	750
Gravier	1058
Ciment	400
Eau	200
E/C	0.5

Afin d'optimiser la composition préliminaire trouvée par la méthode de Dreux-Gorisse, des essais de maniabilité sont effectués au niveau du laboratoire pour optimiser la composition en fixant le rapport E/C et faire varier le rapport S/G. Cette formulation préliminaire doit être optimisée selon la méthode pratique de Baron-Lesage. Avec cette méthode, on a testé quatre mélanges avec S/G différent (0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8) pour chercher la valeur optimale donnant la meilleure ouvrabilité avec la table à secousse [38]. Les résultats sont représentés sur la figure 3.6. La valeur optimale trouvée coïncide avec la valeur obtenue par la méthode Dreux-Gorisse.

**Figure 3.6:** Ouvrabilité du béton en fonction du S/G.

Pour formuler un béton de fibres sans perdre l'ouvrabilité du béton, on a utilisé des adjuvants organiques et on a choisi le plus performant pour donner la meilleure ouvrabilité tout en diminuant le rapport E/C à 0.45. D'après les résultats de la figure 3.7, on constate que le Medaflo c'est le superplastifiant qui donne une meilleure fluidité par rapport aux

autres. Les pourcentages des fibres métalliques à introduire dans le béton sont 0.5%, 1% et 1.5% du volume du béton. Le tableau 3.6 récapitule les différentes compositions utilisées.

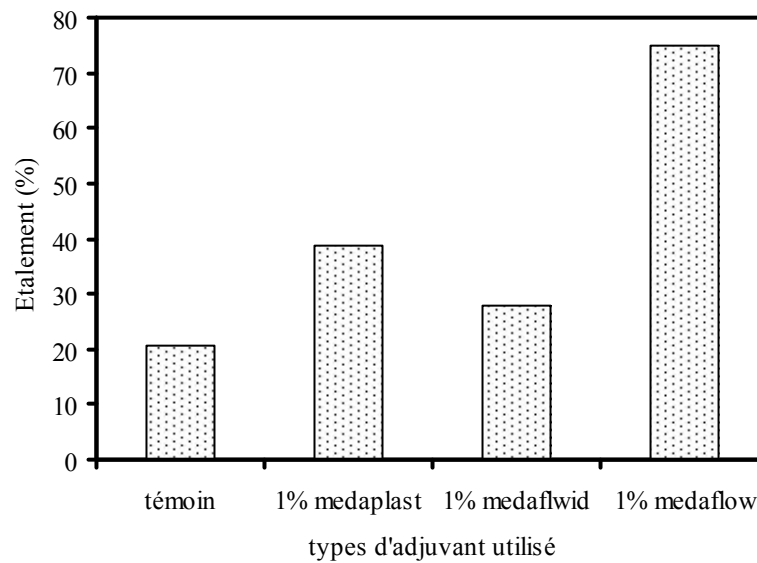


Figure 3.7: Fluidité du béton contenant 0.5% de fibres et 1% de superplastifiant.

Tableau 3.6: Composition massique en kg/m^3 du mélange béton.

Béton	Sable	Gravier	Ciment	Eau	E/C	Adjuvant (%)	Fibres	Affaissement (cm)
BO	750	1058	400	180	0.45	1	0	8
BFM (0.5%)	750	1045	400	180	0.45	1.5	39	6
BFM (1%)	750	1031.7	400	180	0.45	2	78	9
BFM (1.5%)	750	1017.8	400	180	0.45	2.5	117	10

3.4. Procédure de fabrication des bétons

3.4.1. Mode opératoire

Après pesage de tous les constituants de notre béton à l'aide d'une balance électronique d'incertitude 0.1g (Fig.3.8), la fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur (Fig.3.9), à axe vertical de capacité maximale 100 litres. La fabrication des éprouvettes nécessite pour chaque type de béton une seule gâchée.



Figure 3.8 : la balance électronique utilisée.

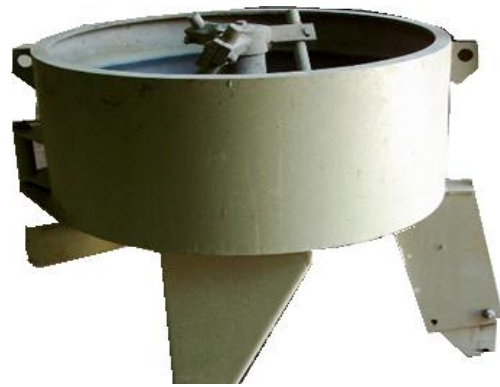


Figure 3.9 : Malaxeur utilisé.

Afin de limiter l'orientation préférentielle des fibres durant le malaxage du mélange, elles ne sont introduites qu'à la fin, après que l'eau et le superplastifiant aient été ajoutés. Les séquences de malaxage sont les suivantes :

Pour les bétons sans renfort de fibres :

- malaxage à sec des granulats en 30 secondes,
- introduction du ciment, et malaxage à sec en 2 minutes,
- Ajout de 2/3 de l'eau de gâchage et brassage en 2 minutes,
- Ajout de 1/3 de l'eau mélangé de superplastifiant et malaxage en 2 minutes,
- vidange du malaxeur en 15 secondes.

Pour les bétons renforcés de fibres :

- malaxage à sec des granulats en 30 secondes,
- introduction du ciment, et malaxage à sec en 1 minute,
- Ajout de 2/3 de l'eau de gâchage et brassage en 1 minute,
- Ajout de 1/3 de l'eau mélangé de superplastifiant et malaxage en 2 minutes,
- Introduction des fibres pendant 15 secondes et malaxage en 2 minutes,
- vidange du malaxeur en 15 secondes.

3.4.2. Méthode d'évaluation de l'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage. L'ouvrabilité du béton conventionné peut être faite soit avec des méthodes à base d'écoulement statique; comme le cône d'Abrams ou par des méthodes à base d'écoulement dynamique; comme la méthode de maniabilité du LCPC, et la table à

secousses. Dans notre étude, et pour définir la caractérisation à l'état frais du béton, nous avons utilisé le cône d'Abrams (Fig.3.10) suivant la norme NF P 18-451 [83]. Cet essai est absolument un des plus simples et des plus fréquemment utilisés.

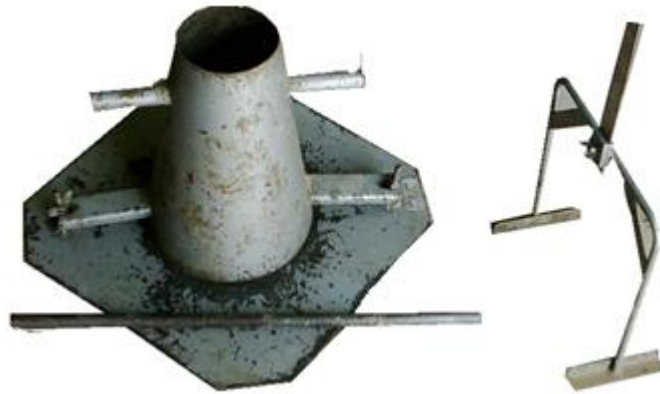


Figure 3.10 : Cône d'abrams.

3.4.3. Procédure de fabrication des éprouvettes

Après avoir effectué la vérification de l'affaissement au Cône d'Abrams, Le moule préalablement enduit d'une légère couche d'huile, non réactive au liant, est fixé vide sur la table vibrante, conformément à la norme NF P18-409 [84]. Le béton avec fibres est introduit en trois tas d'environ un tiers chacun du volume total, dans le moule selon la figure 3.11 à l'aide d'une pelle à coque cylindrique.

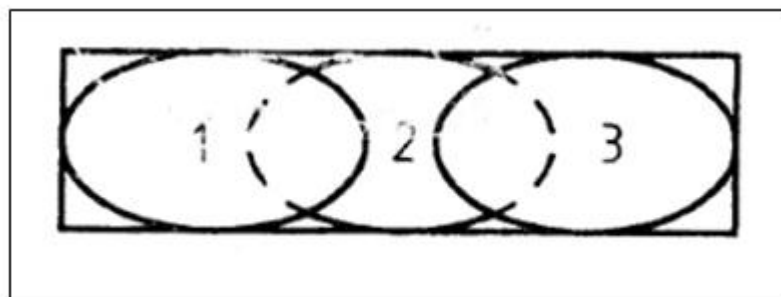


Figure 3.11: Remplissage du moule avec le béton frais [84]

Les moules d'éprouvettes utilisés sont métalliques en acier inoxydable (Fig.3.12) de types :

- Les moules d'éprouvettes pour les essais de compression et de traction par flexion et de retrait sont de forme prismatiques de dimensions 7x7x28 cm,
- Les moules utilisés pour l'essai de déformabilité sont de dimensions suivantes : 7x7x28 cm, 7x14x28 cm, 10x4x16 cm, 10x10x20 cm.

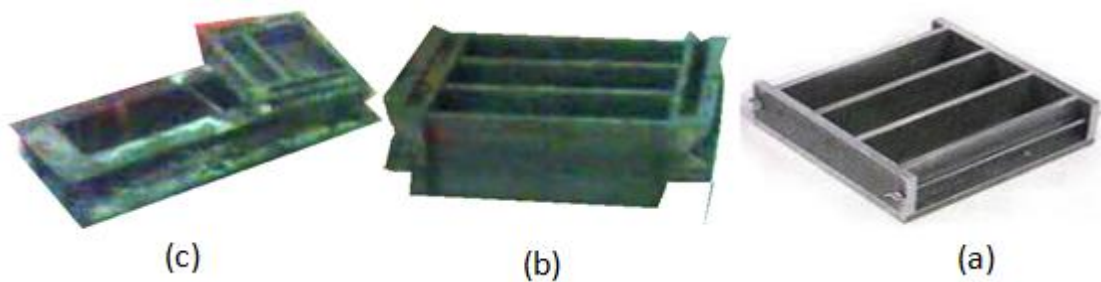


Figure 3.12 : *Différents moules utilisés (a) : moule 7x7x28 cm, (b) : moule 7x14x28 cm, (c) : moule 10x10x20 cm et moule 10x4x16 cm.*

3.4.4. Conservation

Les moules contenant des éprouvettes sont conservés pendant 24 h à une cure sous chiffons maintenus humidifiés (Fig.3.13). Après 24 heures les éprouvettes sont démoulées et immergées dans l'eau saturée de chaux jusqu'au jour de l'essai. La température de l'eau dans le récipient de conservation est maintenue à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ (Fig.3.14). Les éprouvettes sont conservées conformément à la norme NF P 18-404 [85].



Figure 3.13: *Cure sous chiffon avant 24h.* **Figure 3.14:** *Bac de conservation après 24h.*

3.5. Essais effectués

Ce travail vise l'étude du comportement du béton renforcé par des fibres métalliques à l'aide de certains essais disponibles au niveau du laboratoire de béton à l'université de Chlef à savoir :

- Traction (Traction par Flexion simple trois points),
- Compression,

- Déformabilité,
- Abrasion,
- Retrait.

3.5.1. Résistance à la traction par flexion

Les essais sont menés sur des éprouvettes prismatiques de 7x7x28 cm, les mesures ont été effectuées à l'âge de 1, 3, 7, 28, et 90 jours. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de deux plaques comportant des appuis, la plaque inférieure comporte deux appuis distants de l , la plaque supérieure comporte un seul appui qui sera placé au milieu de l'éprouvette comme le montre la figure 3.15.

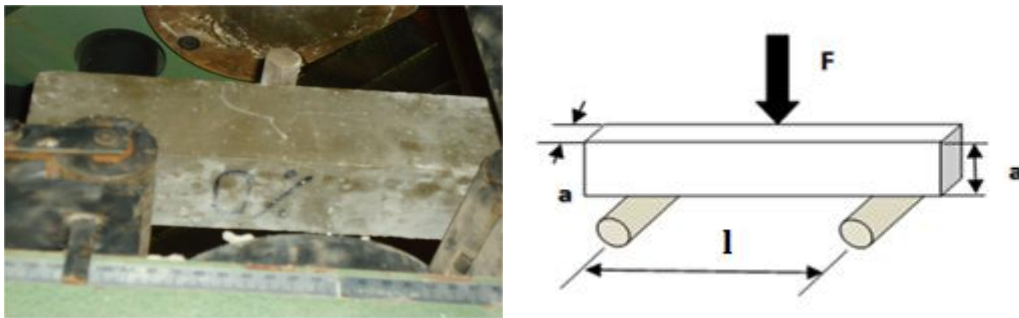


Figure 3.15: Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.

Les essais sont exécutés conformément à la norme NF P 18-433 [86]. Les éprouvettes sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture avec une vitesse constante. La charge maximale est enregistrée au cours de l'essai et la résistance à la traction par flexion est obtenue par la formule suivante :

$$\sigma_{if} = \frac{1.5 F l}{b^3}$$

Avec :

F : désigne la valeur de la charge maximale appliquée à la rupture.

b : l'arrête de l'éprouvette (b=a=7 cm)

l : distance entre les deux appuis (l=21 cm)

3.5.2. Résistance à la compression

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire sur des éprouvettes prismatiques à l'aide d'une presse hydraulique, sa capacité maximale est de 3000 kN (Fig.3.16). Elle est utilisée pour les essais de compression, pour différentes dimensions d'éprouvettes (éprouvettes cylindriques ou prismatiques.).



Figure 3.16: Presse pour l'essai d'écrasement.

Le résultat que l'on cherche à obtenir avec cet essai (comme but principal), est la détermination de la résistance à la compression f_c (rapport entre la force appliquée / la section de l'éprouvette) du béton. Selon la norme NF P 18-455 [87], on peut effectuer l'essai de compression sur des éprouvettes cylindriques, cubiques et des demi-prismes.

Les éprouvettes 7x7x28, issues de l'essai de traction, sont donc coupées en deux moitiés et servies pour l'obtention des résistances à la compression aux différents âges et avec différents dosages de fibres. Les demi-prismes, sont ajustés entre les deux plateaux de la presse. Le plateau supérieur étant fixe, le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette est mobile, en remontant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau supérieur. (Fig.3.17)

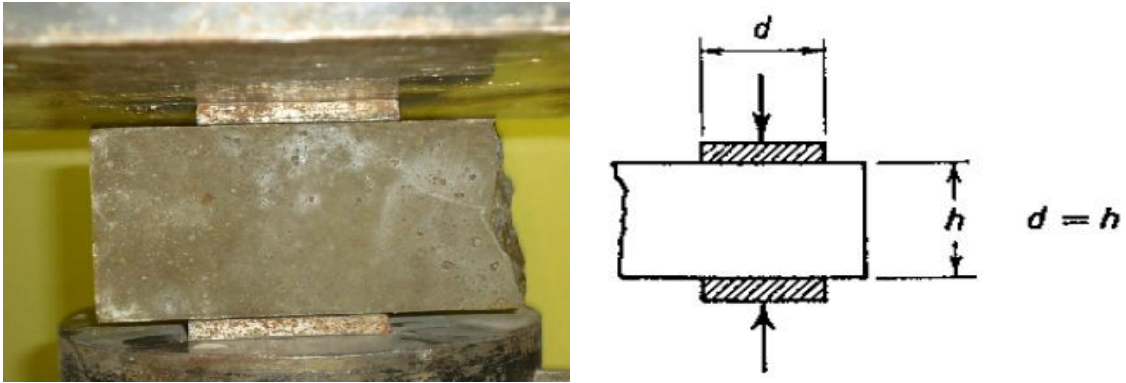


Figure 3.17: Résistance à la compression sur cube d'un demi-prisme.

On assure le contact correct du plateau supérieur de la presse sur la surface supérieure de l'éprouvette, la charge est appliquée progressivement à vitesse de chargement constante. La charge maximale supportée par l'éprouvette est mesurée, ce qui permet de calculer la résistance à la compression qui s'obtient comme étant le rapport de cette charge sur la section S de l'éprouvette, soit le rapport P/S comme indiqué ci-dessous :

$$\sigma_c = \frac{P}{S}$$

3.5.3. Déformabilité

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibres car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ces applications. On ajoute des fibres dans la matrice de béton pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

Une série de trente-deux éprouvettes de bétons renforcés avec différentes pourcentages de fibres et différents dimensions 2 x (7x7x28 cm, 7x14x28 cm, 10x4x16 cm, 10x10x20 cm) (Fig.3.18), ont été soumises à l'essai de flexion trois points sous chargement monotone croissant jusqu'à la rupture. Toutes les éprouvettes sont conservées à l'eau à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ jusqu'à 28 jours où elles seront écrasées.



Figure 3.18: *Différentes échelles utilisées pour un seul type de béton.*

Les éprouvettes reposent sur deux appuis simples distants de L et sont soumises à une sollicitation de flexion au moyen d'une Presse **CBR**. La figure 3.19 décrit ce dispositif d'essai. Cet appareil est composé d'un Bâti à deux colonnes, anneau dynamométrique à une capacité maximale de 50 kN, et un comparateur course de 10x0.001 mm, un piston de pénétration, et un support supérieur réglable avec un espace entre les colonnes de 380 mm.

Durant l'essai, les éprouvettes sont soumises à des efforts progressifs jusqu'à la rupture, ce qui correspond à la résistance maximale à la flexion, On fait croître la contrainte axiale par l'entremise d'un piston de chargement de telle sorte que l'éprouvette se déforme à une vitesse de déformation constante. La mesure du déplacement est effectuée à l'aide d'un comparateur placé au niveau de l'anneau, Pour chaque essai complet, suivant le montage proposé on procède à :

- L'enregistrement du déplacement du plateau par le piston,
- Lecture de la déformation de l'anneau,
- Déduction de la flèche et la force appliquée.

3.5.4. Résistance à l'abrasion

L'essai a pour but de quantifier l'effet de l'incorporation des fibres métalliques dans la matrice cimentaire sur la résistance à l'abrasion du béton. L'essai est effectué sur des échantillons ayant pratiquement le même poids (Fig.3.20). Pour cela on a utilisé une tronçonneuse, présentée sur la figure 3.21, à grande performance pour la coupe et la préparation des éprouvettes.



Figure 3.19: Presse CBR manuelle utilisée pour essai de déformabilité.



Figure 3.20: Exemple d'échantillants resultants. **Figure 3.21:** Tronçonneuse utilisée.

Ensuite on fait passer les échantillants obtenus à l'essai d'abrasion sur l'appareil micro-Duval (Fig.3.22) où dans chaque compartiment, on prépare un échantillonnage d'essai qui est composé de :

- 3 prismes en béton ($P = 1.2 \div 1.5$ kg)
- 3 boulets sphériques en acier inox ($D = 47 \pm 1$ mm, $P = 420 \div 445$ g),
- 1,5 kg de petits boulets sphériques en acier inox ($D = 10 \pm 0.5$ mm)
- 2,5 litre d'eau.

On replace le couvercle et on serre les boulons de fixation, pour assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation, ensuite on commence l'essai ; en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations (pour 2h) à une vitesse régulière de 100 ± 5 trs/min. On élève ensuite l'échantillon après l'essai, le bien laver, puis le sécher totalement à l'étuve, et enfin le peser sec. On obtient ainsi la diminution du poids sous l'effet de l'abrasion de chaque échantillon pour différents pourcentages de fibres en fonction du temps tel que 2, 4, 6, 8 heures.



Figure 3.22: Appareil utilisée pour l'essai d'abrasion et la disposition des échantillons.

3.5.5. Retrait

Le but de cet essai est l'utilisation des fibres métalliques comme un renfort dans la matrice cimentaire, afin de minimiser l'effet du retrait libre qui est l'une des causes principales de la fissuration, que l'on peut observer sur les structures de béton.

L'expérimentation mise en œuvre consiste à mener des essais de mesure du retrait libre sur des éprouvettes prismatiques, menues de tiges fixées aux extrémités (Fig.3.23). Etant donné que le retrait est fortement influencé par les conditions de conservation, les éprouvettes sont séchées à l'air libre après démoulage. Les éprouvettes ont été isolées à leurs deux extrémités pour éviter les effets de bord, et les mesures ont commencé à un jour d'âge à l'aide d'un comparateur de précision de 0.001mm. Deux éprouvettes ont été utilisées pour chaque type de béton; pour mesurer le retrait libre. Donc on compare, à différents temps t , la variation du raccourcissement d'une éprouvette $7 \times 7 \times 28$ cm, par rapport à sa valeur au temps t_0 (1jour).



Figure 3.23: *Disposition des éprouvettes lors de l'essai de retrait.*

3.6. Conclusion

Ce travail a nécessité un temps appréciable et une vérification des résultats par des essais répétitifs. Il serait souhaitable d'approfondir l'étude de ce type de béton qui semble tenir la plus grande importance des promoteurs de la construction.

CHAPITRE: 4

Résultats Et Discussions

4.1. Introduction

Les résultats détaillés des différents essais réalisés sur l'influence de l'incorporation de différentes fractions volumiques de fibres métalliques; pour l'amélioration des propriétés mécaniques du béton, sont présentés dans ce chapitre. Différentes propriétés seront citées telle que la résistance à la compression, la flexion, la déformabilité, le retrait libre du béton et l'effet d'abrasion sont discutés et interprétés dans cette partie.

4.2. Résistance à la traction par flexion

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm avec un béton de différents pourcentages de fibres (0, 0.5, 1 et 1.5%). Les essais sont effectués à l'âge de 1, 3, 7, 28, 90 jours. Les résultats trouvés sont présentés sur la figure 4.1. Ces résultats montrent et confirment que la résistance à la flexion du béton augmente en fonction du temps, et que l'ajout de fibres d'acier engendre une nette augmentation telle qu'on obtient une résistance qui double de valeur en présence de 1.5% de fibres.

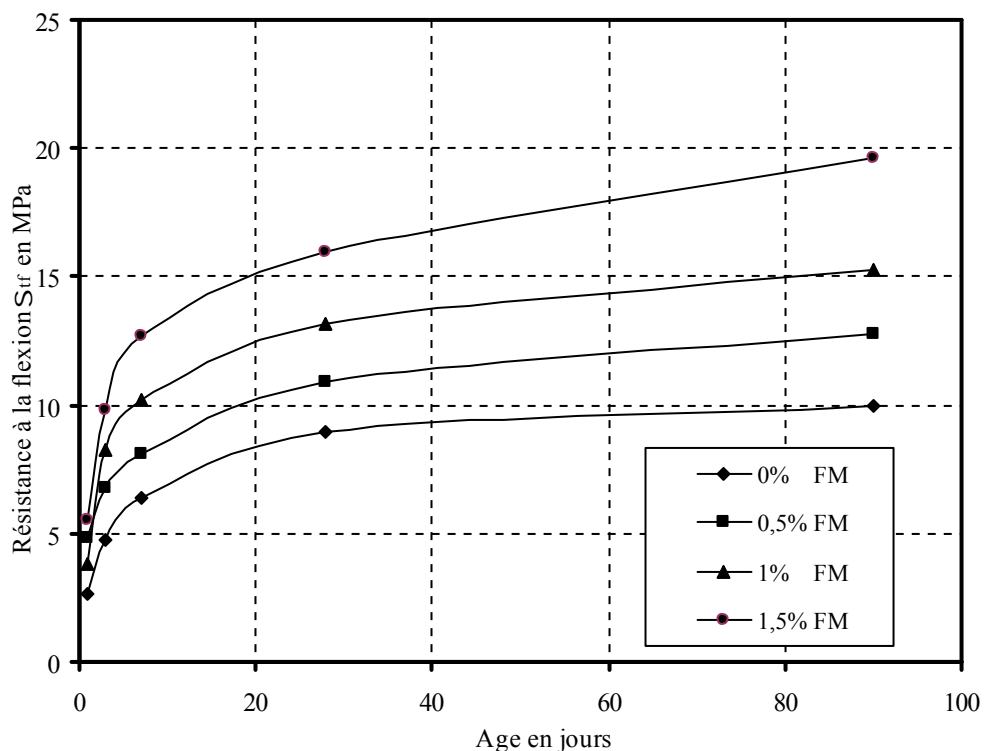


Figure 4.1: Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps.

La figure 4.2, représente la variation relative de la résistance à la flexion par rapport à celle du béton témoin (0% FM) où la présence de 1.5% de fibres d'acier fait augmenter la résistance à la flexion, d'une éprouvette âgée de 1 jour, de l'ordre de 109 %. L'amélioration de cette résistance trouve ses valeurs maximales au jeune âge et qui décroît

progressivement au cours du temps pour se stabiliser autour d'une valeur allant de 30 à 90%. La présence des fibres modifie le mécanisme d'endommagement sous sollicitation statique, la première fissure 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 et à la forme des fibres (ancrage améliorés), mais aussi aux orientations plus favorables des fibres longues. Ceci concorde avec les résultats trouvés par Houari [62], où l'ajout de 1% de fibres métalliques a fait augmenter fortement la résistance à la flexion. Cette augmentation est de l'ordre de 26% à 189% suivant le type de béton de fibres testé.

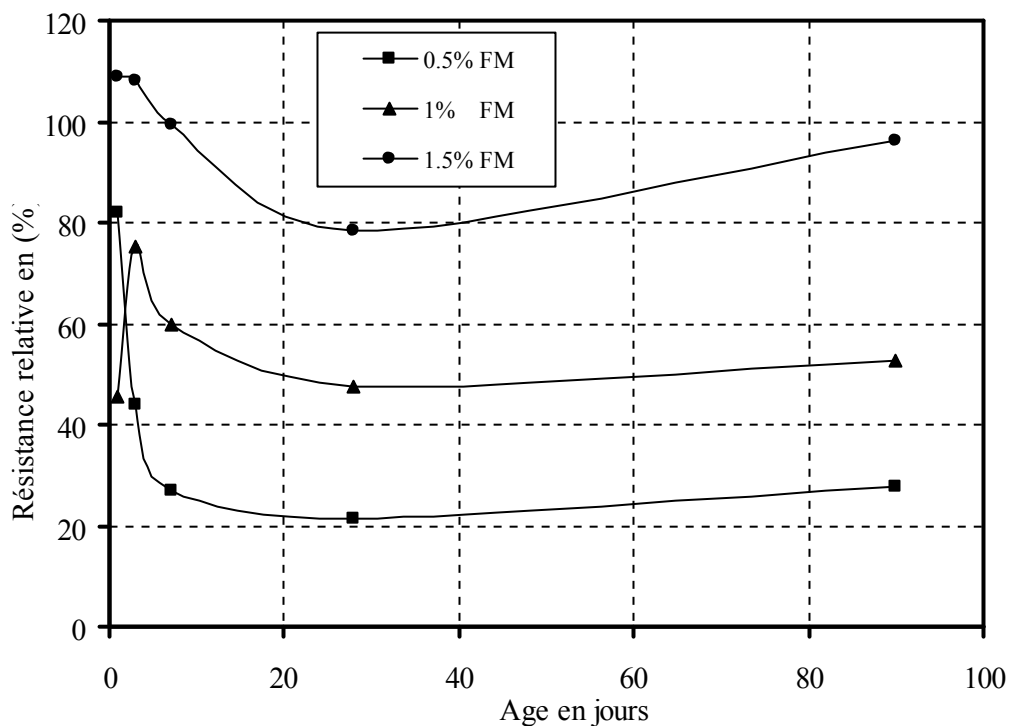


Figure 4.2: Amélioration relative de la résistance à la flexion du béton fibré par rapport au béton de référence en fonction du temps.

Il a été observé dans d'autres travaux [88], que l'utilisation de fibres d'acier de plus de 1% serait à l'origine d'une légère diminution de la résistance à la flexion. La raison pourrait être due aux difficultés physiques dans l'orientation des fibres et de fournir une répartition homogène dans le béton durant nos essais, cette observation n'a pas pu être rencontrée et les résistances trouvées augmentent linéairement avec le dosage en fibres. Les photos prises lors de l'écrasement illustrent la bonne orientation des fibres et leur contribution à résister contre la rupture, comme le montre la figure 4.3. La bonne

orientation des fibres modifie le mode de rupture par flexion; d'un mode brutal à un mode progressif où l'ouverture et la propagation de la fissure pourront être suivies.



a) rupture d'une éprouvette sans fibres

b) rupture d'une éprouvette fibrée

Figure 4.3 : Présentation des éprouvettes écrasées en flexion

La contribution des fibres est très importante dans l'amélioration de la résistance à la flexion du béton. La figure 4.4 présente une relation linéaire du gain de résistance en fonction de la teneur en fibres métalliques. Cette amélioration prend son effet maximal au jeune âge et tend pour tous les âges à une relation unique avec un coefficient de corrélation acceptable. Pour un béton contenant 1 % de fibres métalliques, sa résistance à la flexion est améliorée de 62 % selon la relation ci-dessous :

$$R_{bf} = R_{bo}(1 + 62p)$$

Avec p le pourcentage en fibres métalliques.

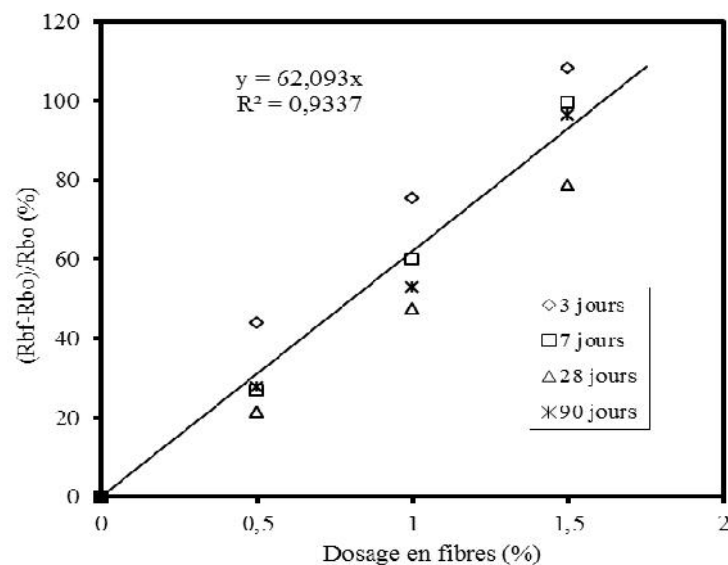


Figure 4.4 : Evolution du gain de résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres.

4.3. Résistance à la compression

L'amélioration de la résistance du béton renforcé par des fibres métalliques permet non seulement d'améliorer le comportement en flexion et en traction, mais également la résistance à la compression du béton. Les résultats de résistance à la compression du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'aciers obtenues à 1, 3, 7, 28 et 90 jours sont représentés dans la figure 4.5.

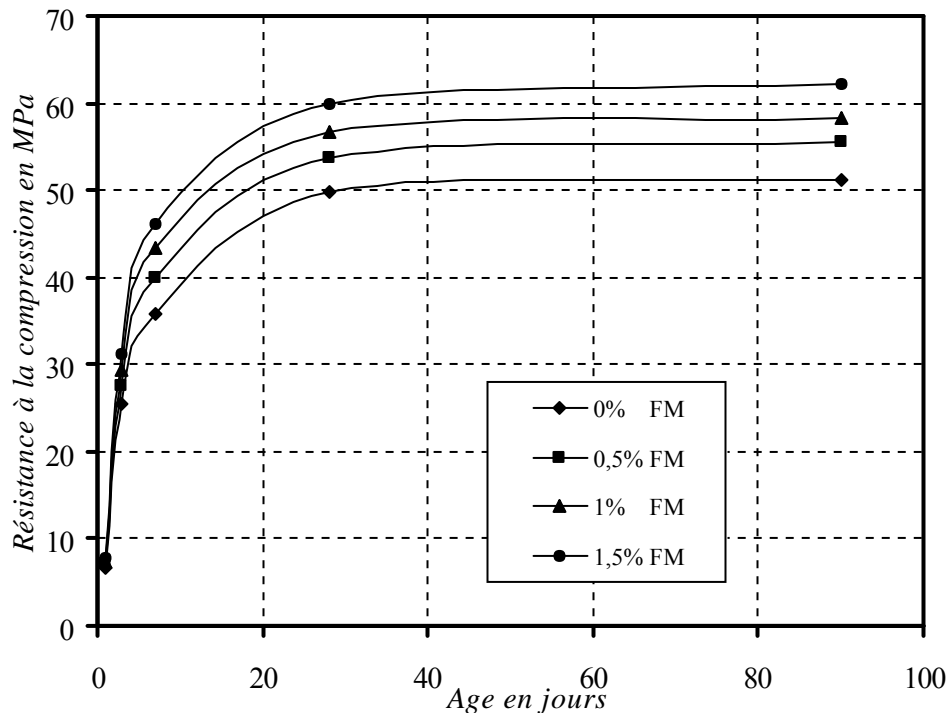


Figure 4.5: Evolution des résistances à la compression du béton renforcé de fibres.

D'après la figure 4.5, on constate que la résistance à la compression sur des éprouvettes prismatiques, évolue en fonction du temps; quel que soit le dosage des fibres utilisées. Ce gain dépend de la concentration et de la géométrie de ces fibres et atteint à 7 jours, une valeur maximale de 11, 21 et 29 % pour un dosage volumique en fibres respectivement de 0.5, 1 et 1.5%. Cette amélioration peut être attribuée à l'adhérence mécanique des fibres qui permet d'augmenter la capacité à retarder la formation des fissures et arrêter leur propagation.

Il a été constaté, dans les différents résultats de recherches la bonne amélioration des caractéristiques mécaniques du béton de fibres. Gopalaratnan et al. [63] observent dans leurs résultats statiques en compression, que la présence de fibres d'acier dans la matrice augmente la résistance à la rupture de 35 % pour 1.5 % de volume de fibres, et la déformation correspondante à la résistance maximale augmente de 38 %. De même

Damgir et al. [64] ont trouvé dans leurs résultats que la résistance à la compression augmente lorsque le volume de fibres augmente, cette amélioration atteint 21.20 % à 28 jours pour un dosage de 2% de fibres.

La comparaison entre le béton avec et sans fibres métalliques indique que l'ajout des fibres dans la plage des pourcentages utilisés apporte une augmentation de la résistance à la compression. La figure 4.6 illustre l'amélioration apportée par les fibres par rapport au béton témoin, et qui montre clairement que la présence des fibres confère au béton, plus de résistance à la compression en tous âges et pour différents dosages. Cette amélioration atteint sa valeur maximale à 7 jours et se stabilise au-delà de 28 jours autour d'une valeur plus faible située entre 10 et 20%.

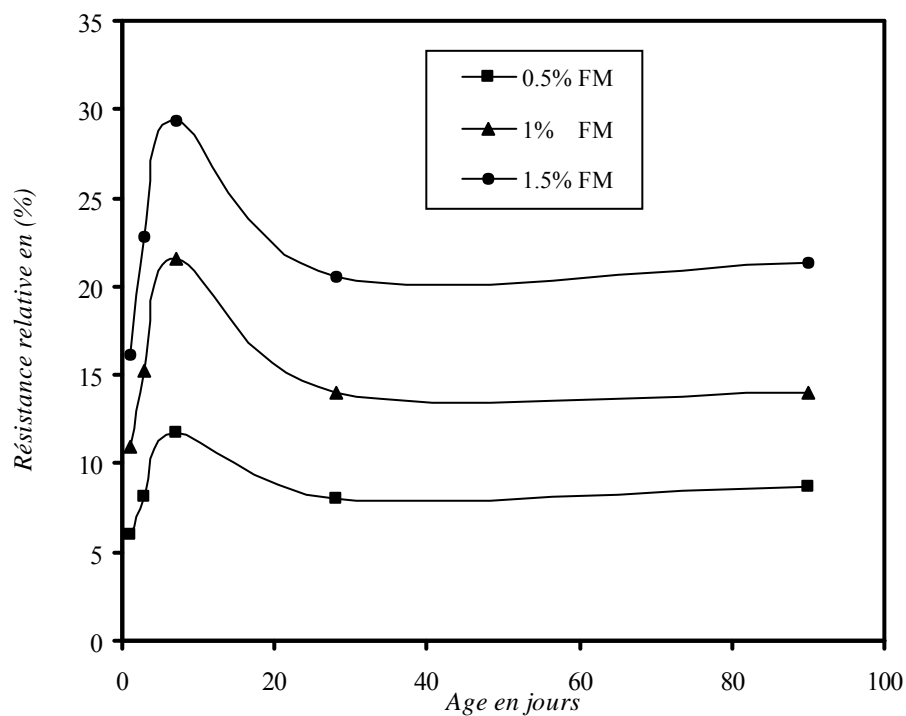


Figure 4.6: Amélioration relative de la résistance à la compression du béton fibré par rapport au béton de référence en fonction du temps.

La résistance à la compression est souvent améliorée par la présence de fibres métalliques, qui contribuent à diminuer l'apparition des fissures et à leurs propagations. Pour les résultats trouvés, il a été constaté que le gain de résistance par rapport au béton témoin non fibré augmente d'une façon linéaire avec le dosage en fibres. La figure 4.7 illustre les résultats trouvés où la corrélation linéaire semble très satisfaisante. A 7 jours

d'âge, le gain de résistance est très impressionnant, où on atteint une augmentation de 12, 21 et 30 % pour des dosages en fibres respectivement de 0.5, 1 et 1.5%. Les bétons fibrés âgés de 3, 28 et 90 jours présentent des gains de résistances semblables vis-à-vis de la présence des fibres. Pour un béton de 1% de fibres métalliques, on voit que la résistance à la compression à 28 jours augmente de 15 % selon la formule ci-dessous :

$$R_{bf} = R_{bo}(1 + 15p)$$

Avec p le pourcentage en fibres métalliques.

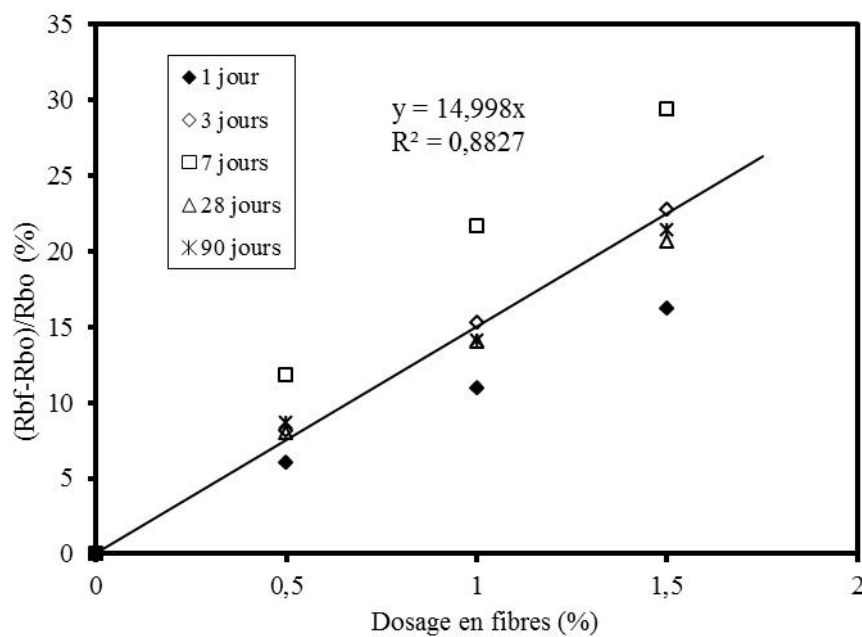


Figure 4.7 : Evolution du gain de résistance mécanique en fonction de la teneur en fibres.

Il a été constaté dans d'autres travaux [64], une diminution de résistance à la compression, lorsqu'on atteint certain dosage en fibres supérieures à 2%. Cela est probablement dû à la création d'une porosité dans la matrice du matériau qui le fragilise. C'est-à-dire que la fibre crée des défauts supplémentaires à l'interface fibre-matrice qui peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc à la charge maximale.

D'après les observations faites lors des essais d'écrasement effectués sur différentes éprouvettes, il a été constaté que les éprouvettes sans fibres s'éclatent et prennent rapidement une forme conique. La présence des fibres fait maintenir les éprouvettes dans leurs formes et les lamelles fissurées résistent à l'éclatement. Les photos présentées sur la

figure 4.8 montrent une différence remarquable de la forme des éprouvettes avec et sans fibres après écrasement.



a) éprouvette sans fibres

b) éprouvette avec fibres

Figure 4.8 : Présentation des éprouvettes écrasées en compression.

Il est judicieux, en étudiant la variation de la résistance à la compression de la relier avec celle de la traction. Pour cela, on converti les résultats trouvés de la résistance à la flexion en traction en les multipliant par un coefficient de 0.6 qui tient compte de la plastification du béton dans la phase de prérupture . Les résultats trouvés sont représentés dans la figure 4.9 où la variation est presque linéaire pour tous les types de béton. Il s'avère que toute les résistances à la traction sont supérieures à celles estimées par le BAEL 2003 [89], et qui continue à augmenter en fonction du temps. A 28 jours d'âge, le béton témoin non fibré possède une résistance à la traction 27 % supérieure à celle estimée par le BAEL, alors que cet écart sera doublé lorsque le béton contient 1% de fibres métalliques. Il est bien visible sur les résultats illustrés sur la figure 4.9, que l'augmentation de la résistance à la traction à long terme est plus significative que celle de la compression caractérisée par des courbes ascendantes.

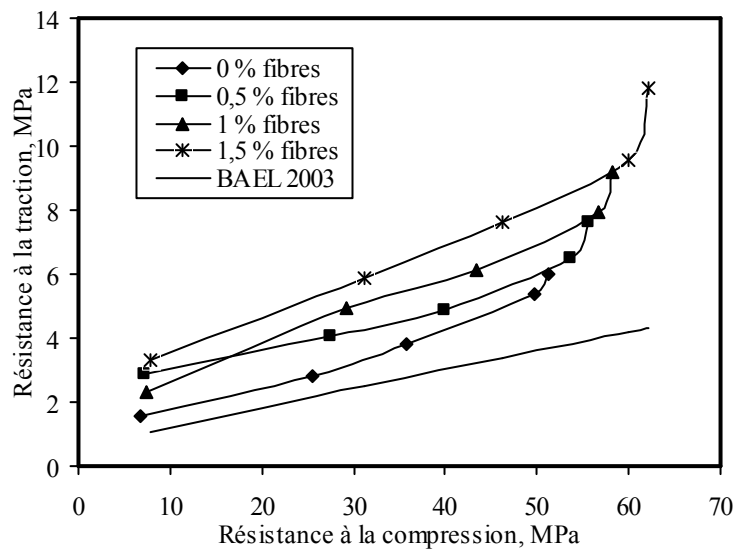


Figure 4.9 : Variation de la résistance à la traction en fonction de celle à la compression pour différents types de bétons.

4.4. Déformabilité

Le suivi des flèches d'éprouvettes de différentes dimensions et comportant différentes proportions de fibres métalliques, a été exécuté par l'appareil CBR. L'évaluation des flèches est mesurée en micron près, en tenant compte de la vitesse de déformation et de la déformabilité de l'anneau de mesure de la force concentrée. L'anneau est équipé de comparateur de déformation (1μ) où on peut lui attribuer la force exercée correspondante. Les figures 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13 illustrent les résultats obtenus pour chaque dimension d'éprouvette.

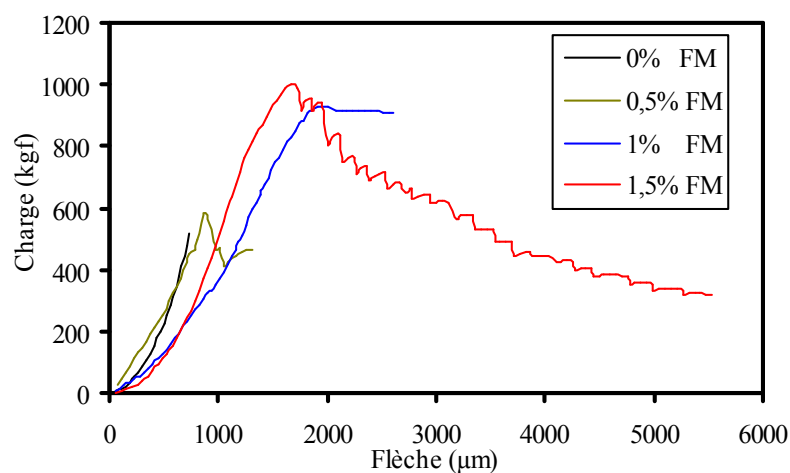


Figure 4.10 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 10x4x16 cm.

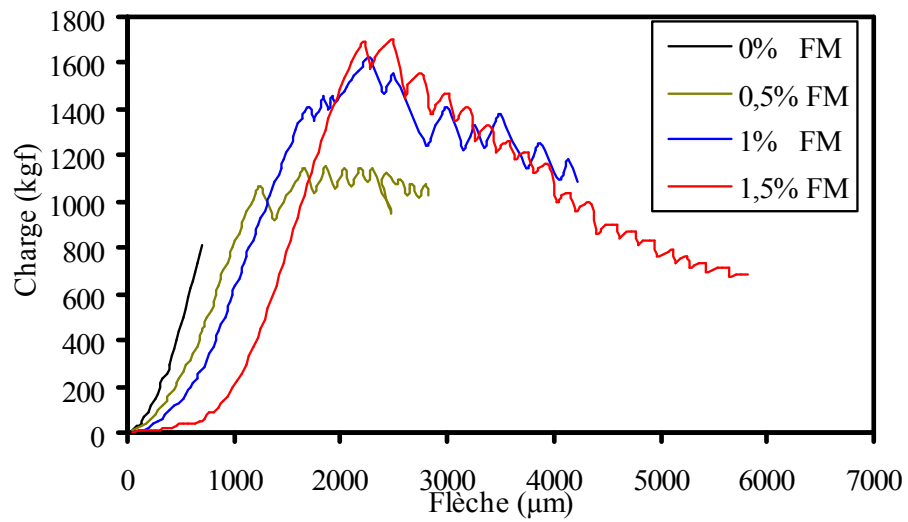


Figure 4.11 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 7x7x28 cm.

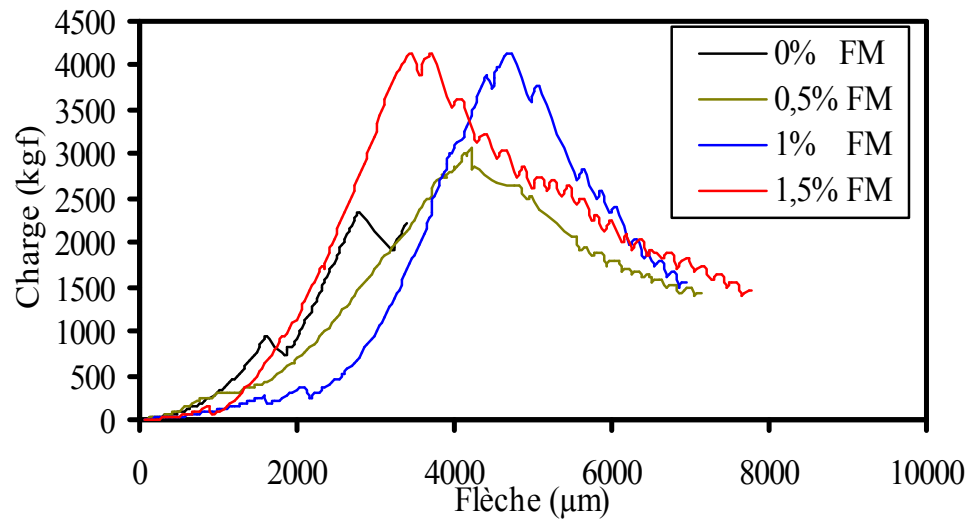


Figure 4.12 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 10x10x20 cm.

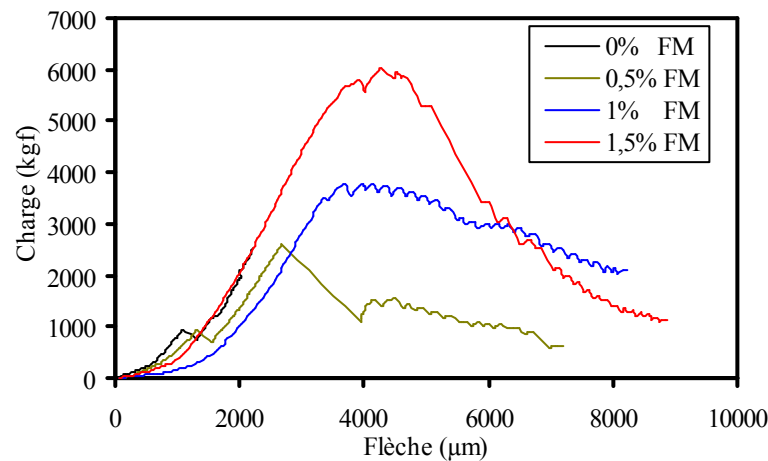


Figure 4.13 : Evolution des flèches en flexion pour une éprouvette de 7x14x28 cm.

4.4.1. Résistance à la flexion

Des courbes de déformation, on déduit la force maximale atteinte lors de la déformation. De ces valeurs on calcule les résistances à la flexion pour les différentes éprouvettes. Le tableau 4.1 récapitule les résultats obtenus où la présence des fibres est très significative avec des résistances qui atteignent trois fois celles du béton témoin.

Tableau 4.1 : Résistances à la flexion (MPa) déduites de l'essai de déformabilité.

Hauteur de l'éprouvette h (cm)	Pourcentage des fibres %			
	0	0,5	1	1,5
4	6,8	7,6	12,2	13,2
7	6,2	8,5	12,1	12,7
10	4,9	7,9	10,6	10,5
14	4,4	7,1	10,3	14,7
Résultats de la flexion	8.94	10.87	13.18	15.97

En comparant les résistances à la flexion de l'essai de déformabilité et celle de la flexion simple on peut déduire les résultats présentés sur la figure 4.14. Il paraît clairement la fiabilité de l'essai de déformabilité adopté.

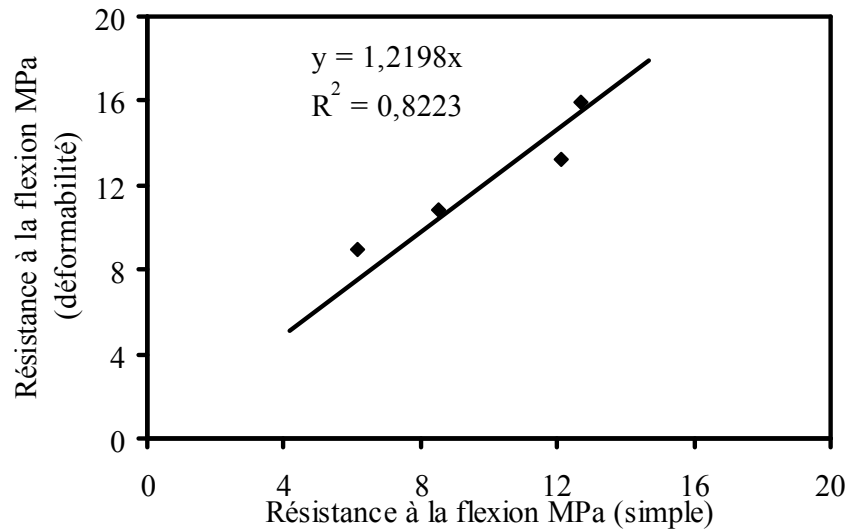


Figure 4.14 : Comparaison de la résistance à la traction entre les deux essais.

4.4.2. Evolution des flèches

Les flèches enregistrées augmentent avec l'accroissement de la charge. Au premiers temps l'évolution des flèches est presque identique et indépendamment du pourcentage des fibres. Les fluctuations enregistrées semblent dues au moyen de mesure utilisées. On remarque une rupture fragile du béton témoin sans aucune déformabilité au-delà de l'apparition de la fissuration. Par contre, pour le béton fibré, une évolution des flèches post fissuration est encore mesurable malgré la diminution de la charge concentrée.

Le béton de fibres a présenté une flèche au pic, proportionnelle à la quantité des fibres qu'il contient. Pour une éprouvette ayant une épaisseur de 7cm, sa flèche correspondante à la charge maximale est de 0.71, 1.86, 2.27 et 2.49 mm respectivement pour une présence de fibres métalliques de 0, 0.5, 1 et 1.5%. Après ce pic la flèche continue d'augmenter tout en gardant une résistance à la flexion acceptable, Ces résultats rejoignent ceux de Bentalha [23].

4.4.3. Ductilité du béton fibré

Les valeurs des flèches finales, qui ont pu être mesurées, caractérisent la ductilité acquise par le béton de fibres. Selon les valeurs mesurées on peut considérer le facteur de ductilité comme le rapport de la flèche finale sur la flèche correspondant au pic. Pour une

éprouvette de 7 cm d'épaisseur le facteur de ductilité évolue de la valeur unitaire d'un béton témoin jusqu'à 1.52, 1.86 et 2.33 respectivement pour un béton comportant 0.5, 1 et 1.5 % de fibres métalliques.

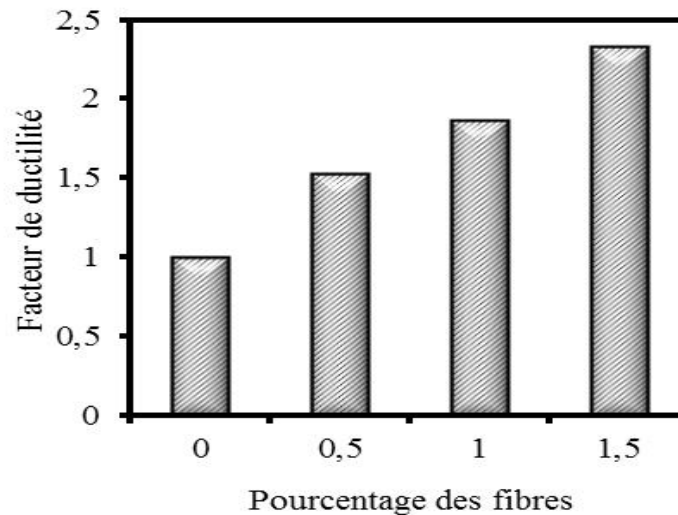


Figure 4.15 : Evolution du facteur de ductilité en fonction du dosage en fibres.

Les déformations à mi-travée de la poutre augmentent aussi d'une façon assez significative. Pour expliquer cette augmentation, il faut revenir au comportement de béton de fibres en flexion. Il est bien connu que le rôle principal des fibres d'acier est de mieux contrôler la fissuration du béton en état de service, en réduisant l'ouverture des fissures et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile. Les fibres donc servent, après la fissuration de la matrice à supporter la charge et la distribuer aux fibres adjacentes. Cela veut dire qu'il faut un surplus d'énergie pour avoir la rupture; ce qui se traduit par l'augmentation de la ductilité et de la charge de rupture.

4.4.4. Effet d'échelle

Les résultats expérimentaux sur des prismes soumis à une flexion 3 points sont effectués sur éprouvettes ayant des différentes dimensions; 10x4x16, 7x7x28, 10x10x20, et 7x14x28 cm. Elles sont nommées selon leurs hauteurs utiles 4, 7, 10 et 14 cm. Les résistances à la traction évaluées au niveau des pics sont représentées sur la figure 4.16, où l'effet d'échelle ne semble pas être influencé par la présence des fibres. On remarque bien une diminution de la résistance à la flexion en augmentant les dimensions de l'éprouvette.

Deux valeurs paraissent échapper à la règle et qui peuvent attribuer à des erreurs systématiques de mesure.

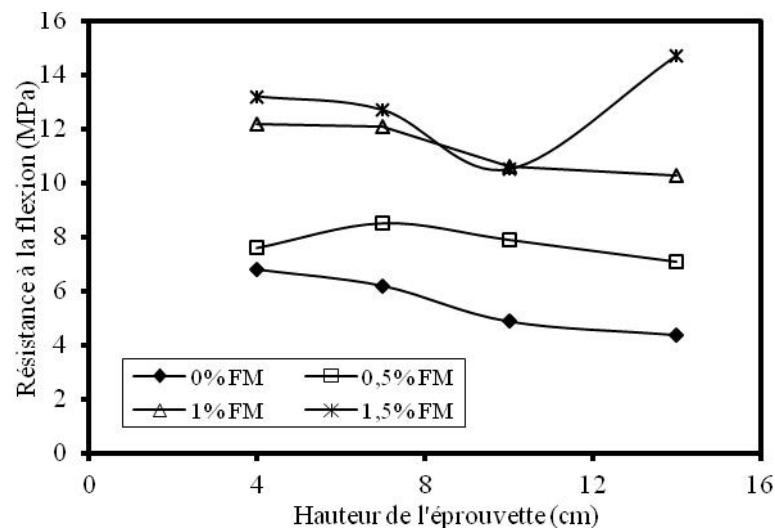


Figure 4.16 : Evolution des résistances à la flexion en fonction de la hauteur de l'éprouvette.



Figure 4.17 : Fissuration d'une éprouvette de 7x14x28cm.

La figure 4.17 montre la propagation des fissures d'une éprouvette 7x14x28 cm soumise à la flexion. L'ouverture limite des fissures est fonction de la hauteur de l'éprouvette, car il existe un effet d'échelle, cette constatation est bien confirmée par Casanova [54], ainsi Larsen et Gustafsson [90], qui ont remarqué un léger effet d'échelle.

4.5. Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion est évaluée par la perte en poids d'un échantillon soumis à une abrasion simulée par l'essai Duval. Les figures 4.18, 4.19 représentent les résultats d'essais des différents échantillons à 28 jours. On constate que la résistance à l'abrasion des bétons contenant des fibres est remarquablement améliorée en fonction du volume de celle ci; par rapport au béton non fibré et en particulier la résistance à l'abrasion du béton contenant 1 à 1,5% de fibres. En fonction du temps d'abrasion, le béton témoin présente une dégradation linéaire; par contre lors de la présence des fibres métalliques, les courbes de perte de poids deviennent asymptotiques présentant une résistance accrues en fonction du dosage en fibres.

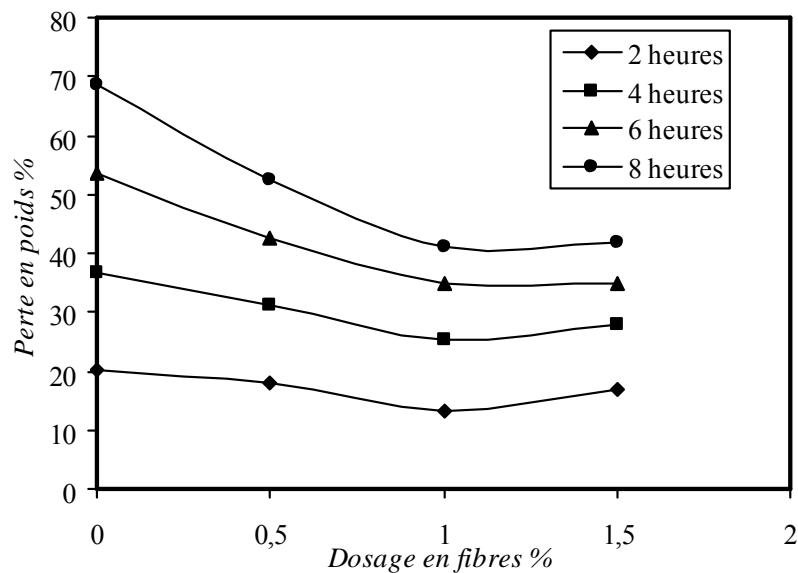


Figure 4.18: Représentation de la résistance à l'abrasion.

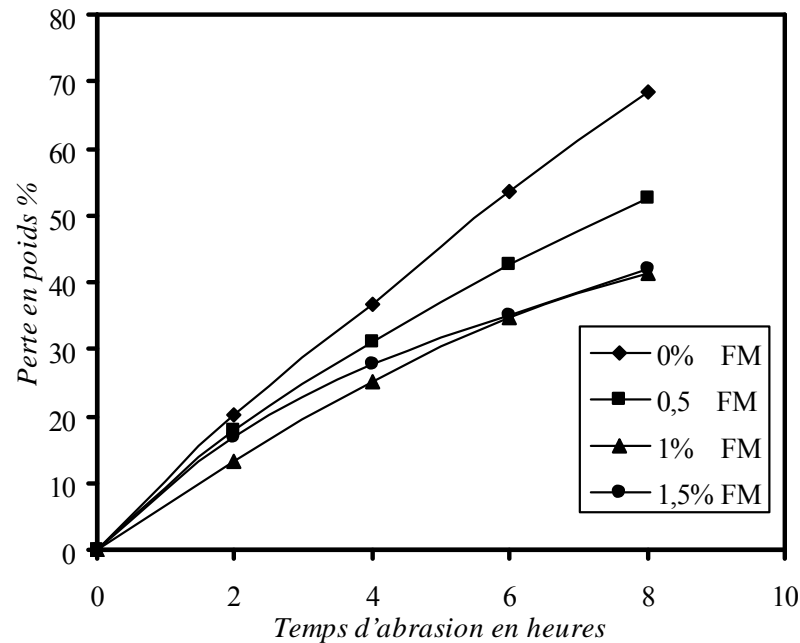


Figure 4.19: Résistance à l'abrasion d'un béton fibré et de référence en fonction du temps.

4.5.1. Quantification de l'effet des fibres sur l'abrasion

Comme le dosage de fibres augmente, la perte de poids due à l'abrasion diminue. L'abrasion par les billes en acier a été très agressive, au début, seul le béton de peau est dégradé, mais aussitôt que l'abrasion atteinte le gros granulat un ralentissement de la perte en poids du béton est ressenti. La différence dans la perte due à l'abrasion peut être visiblement vue par la forme des éprouvettes après l'essai. Il est intéressant de noter que les fibres non seulement réduisent l'abrasion, mais aussi elles améliorent la cohérence de la matrice. Cette amélioration augmente en fonction du temps, tel que pour un dosage de 0.5% de fibres, on obtient une amélioration de 2, 5, 10, 16 % après 2, 4, 6 et 8 heures d'abrasion, comme indiqué sur la figure 4.20. Ce résultat est similaire à celui trouvé par d'autres travaux [75], où l'incorporation de 0.5 et 1% de fibres réduit l'abrasion respectivement de 2 et 9% ; sur des échantillons soumis à une rotation de 2000 tours à l'appareil de Los Angeles. La résistance à l'abrasion est autant améliorée en augmentant le pourcentage de fibres incorporé dans le béton. D'après la figure 4.20, on peut conclure que le pourcentage optimal de fibres pour réduire l'effet d'abrasion est de 1 %. Au-delà de 1 % de volume de fibres, l'effet de la présence des fibres dans un béton réduit les performances du béton comme c'est déjà cité dans la littérature pour la résistance à la compression.

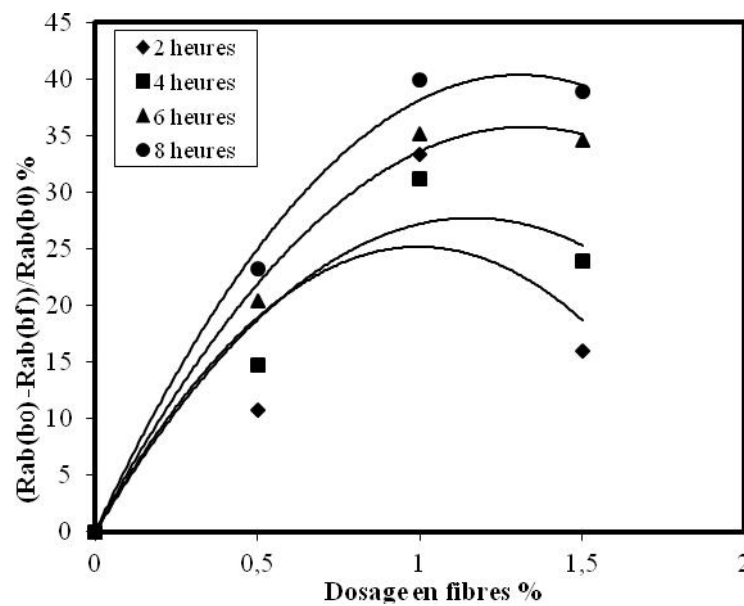


Figure 4.20: Amélioration relative de la résistance à l'abrasion du béton fibré par rapport au béton de référence.

4.5.2. Relation entre l'abrasion et la compression

Les performances d'un béton sont souvent liées à sa résistance à la compression, et pour mieux étudier cette caractéristique, on a représenté sa variation sur la figure 4.21. Il est bien illustré sur cette figure que la résistance à l'abrasion du béton augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression. La résistance à l'abrasion du béton, est fortement dépendante de sa résistance à la compression, et qui peut être exprimée par une simple relation linéaire pour tous les bétons mentionnés dans cette étude. Ceci confirme que la résistance en compression, est un facteur essentiel affectant la résistance à l'abrasion du béton, et autres propriétés du béton. Ces résultats confirment ceux déjà obtenus par Li et al. [91].

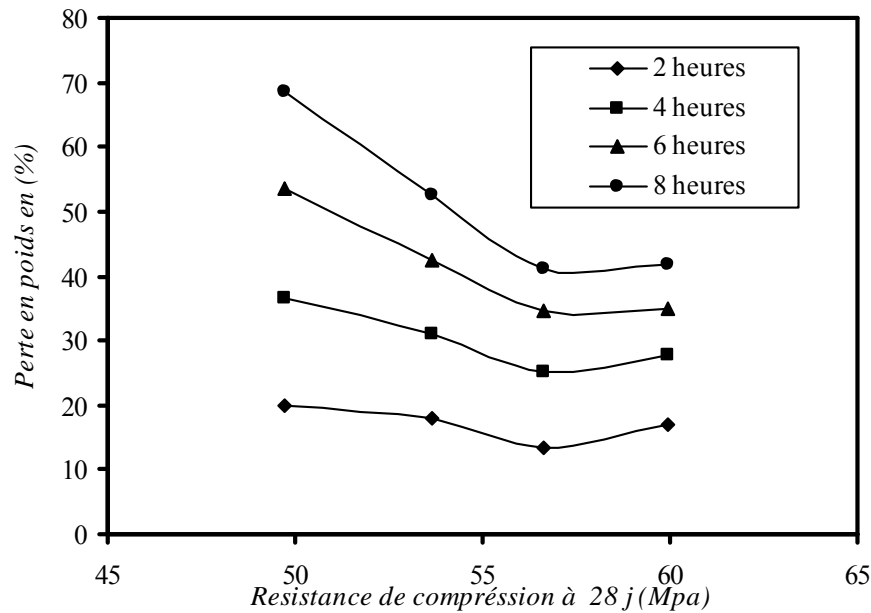


Figure 4.21: Relation entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression.

La présence des fibres a pour effet la réduction de l'initiation des fissures et leur propagation, et l'effet de maintien des morceaux de béton fracturés dans le corps principal ce qui ralentit le processus de détérioration. Les fibres sont bien connues par leur amélioration du comportement post fissuration du béton, et de transformer un matériau fragile à un matériau ayant un certain degré de ductilité. On peut conclure que la résistance à l'abrasion du béton peut être considérablement améliorée avec l'ajout de fibres métalliques.

4.6. Retrait

Les courbes moyennes de deux éprouvettes du retrait libre en fonction du temps sont présentées sur la figure 4.22. On constate, d'après cette figure, que le retrait diminue au fur et à mesure qu'on augmente le dosage en fibres. Cette diminution est de l'ordre de 26, 39, 46 % par rapport à un béton sans fibres à 28 jours, respectivement pour des proportions de 0.5, 1, 1,5 % de volume de fibres.

Le fuseau des valeurs de retrait est étroit au début de séchage jusqu'à 45 jours entre les bétons renforcés de fibres et le béton témoin, et il est étiré après une longue durée.

A long terme l'action des fibres est plus significative où le retrait se trouve empêché grâce à l'accroissement des propriétés mécaniques du béton, qui fait augmenter

l'adhérence des fibres à la matrice. De ceci, le retrait de béton de fibres se stabilise plus rapidement que le béton témoin, comme on le constate sur la figure 4.22.

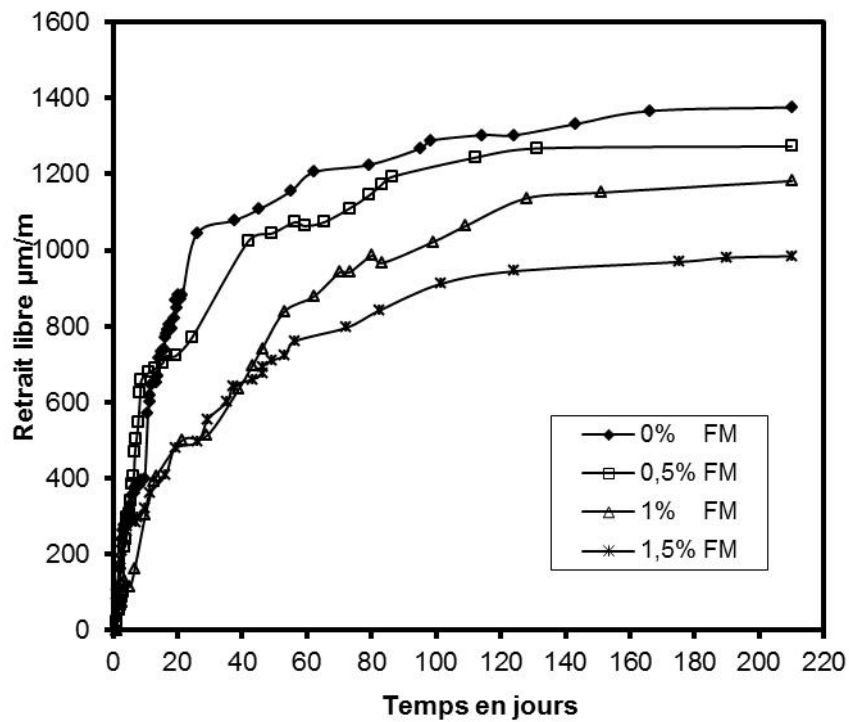


Figure 4.22: Retrait libre d'un béton renforcé avec des fibres métalliques.

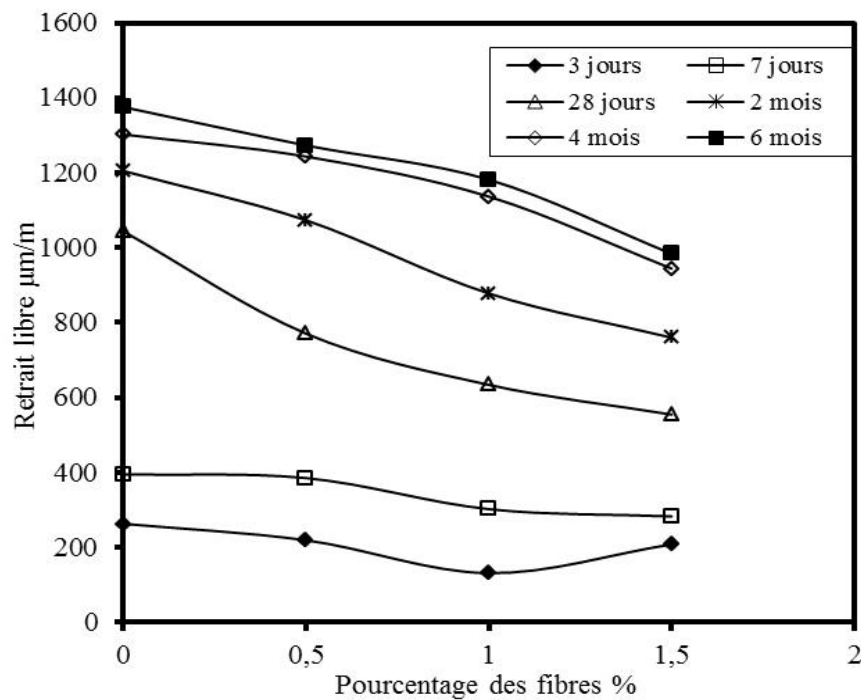


Figure 4.23: Retrait libre en fonction de la teneur en fibres.

On peut clairement observer que plus le taux d'incorporation des fibres est important, plus le retrait est faible par rapport au retrait du béton de référence. Au jeune âge, la variation du retrait est moins sensible à la teneur en fibres, tel que les courbes représentées sur la figure 4.23 sont moins descendantes. A long terme, l'effet des fibres est plus positif et la variation du retrait est représentée par des courbes descendantes montrant une nette diminution par rapport au béton non fibré. Ce phénomène peut être expliqué par le frottement qui existe le long de la frontière de contact entre les fibres et la matrice. La grande teneur en fibres augmente la surface de contact entre les fibres et la matrice ; cette adhérence peut réduire la déformation du retrait. Chern et al. [80] concluent d'après une étude, que les fibres d'acier sont plus efficaces à freiner les déformations dues au retrait à long terme.

Ces résultats confirment ceux déjà obtenus lors des études antérieures de Mangat et al. [77], en utilisant les fibres commercialisées sous différentes appellations à savoir que les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons renforcés de fibres en les comparant à celles des bétons sans fibres. Cette réduction est affectée par plusieurs paramètres comme la durée de séchage, la forme et la quantité de fibres. De même, dans d'autres travaux présentés par Abdou et Houari [78], on constate que les fibres diminuent le retrait de l'ordre de 16 à 20 % par rapport au mortier sans fibres à 90 jours.

4.7 Conclusion

A travers ce travail, le béton renforcé de fibres métalliques offre une meilleure résistance à la flexion, à l'abrasion, à la déformation et au retrait. Ces performances sont très remarquables par rapport au béton non fibré ce qui encourage son utilisation dans les milieux à risque majeur de fissuration. Son comportement post fissuration donne une sécurité supplémentaire aux constructions qui deviennent plus ductiles et aptes à absorber l'énergie d'une action sismique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est le renforcement du béton par les fibres métalliques, et plus particulièrement l'influence de la teneur en fibres sur le comportement rhéologique au jeune âge et mécanique à long terme du béton renforcé par ces fibres. Pour cela, différents corps d'éprouvettes avec plusieurs dosages en fibres ont été réalisés, il faut noter que les fibres utilisées sont des fibres à crochets à l'extrémité de 50 mm de longueur et de 67 d'élanement.

D'après les travaux réalisés durant cette étude, on a pu établir un certain nombre de résultats :

- La maniabilité des bétons est négativement influencée par l'introduction des fibres métalliques de longueur 50 mm, et le dosage de ces fibres joue un rôle plus important sur l'ouvrabilité du béton fibré. Un dosage supplémentaire de superplastifiant est nécessaire pour compenser l'effet négatif des fibres.
- La résistance à la flexion du béton augmente en fonction du temps, et l'ajout de fibres d'acier engendre une nette amélioration de cette résistance qui double de valeur en présence de 1.5% de fibre.
- Il existe une relation linéaire du gain de résistance en fonction de la teneur en fibres métalliques. Cette amélioration prend son effet maximal au jeune âge et tend pour tous les âges vers une relation unique avec un coefficient de corrélation acceptable. Pour un béton contenant 1 % de fibre métallique, sa résistance à la flexion est améliorée de 62 %
- La résistance à la compression sur des éprouvettes prismatiques évolue en fonction du temps quel que soit le dosage des fibres utilisées. Ce gain dépend de la concentration et de la géométrie de ces fibres et atteint sa valeur maximale à 7 jours et se stabilise au-delà de 28 jours autour d'une valeur plus faible située entre 10 et 20%. Les éprouvettes confectionnées avec les bétons renforcés par les fibres métalliques sont restées juste fissurées après écrasement.
- Durant l'essai de déformabilité, on remarque une rupture fragile du béton témoin sans aucune déformabilité au-delà de l'apparition de la fissuration. Par contre, pour le béton de fibres une évolution des flèches post fissuration est encore mesurable malgré la diminution de la charge concentrée. Pour une éprouvette ayant une

épaisseur de 7 cm, sa flèche correspondante à la charge maximale est de 0.71, 1.86, 2.27 et 2.49 mm respectivement pour une présence de fibres métalliques de 0, 0.5, 1 et 1.5%.

- Le béton de fibres métalliques représente une meilleure ductilité par rapport au béton témoin. Pour une éprouvette de 7 cm d'épaisseur le facteur de ductilité évolue de la valeur unitaire d'un béton témoin jusqu'à 1.52, 1.86 et 2.33 respectivement pour un béton comportant 0.5, 1 et 1.5 % de fibres métalliques.
- L'effet d'échelle ne semble pas être influencé par la présence des fibres. On remarque bien une diminution de la résistance à la flexion en augmentant les dimensions de l'éprouvette, car la chute d'effort est directement liée à une forte décroissance de la contrainte postfissuration en traction au-delà d'une certaine ouverture. Cette ouverture limite doit être fonction de la hauteur de la poutre qui relie directement l'effet d'échelle pour tous types de béton.
- Les fibres réduisent l'abrasion et améliorent la cohérence de la matrice. le pourcentage optimal de fibres pour réduire l'effet d'abrasion est de 1 %. Au-delà de 1 % de volume de fibres, l'effet de la présence des fibres dans un béton réduit les performances du béton. La résistance à l'abrasion du béton est fortement dépendante de sa résistance à la compression et qui peut être exprimée par une simple relation linéaire pour tous les bétons mentionnés dans cette étude.
- Le retrait diminue au fur et à mesure qu'on augmente le dosage en fibres. Cette diminution est de l'ordre de 26, 39 et 46 % par rapport à un béton sans fibres à 28 jours, respectivement pour des proportions de 0.5, 1 et 1,5 % de volume de fibres. A long terme, l'effet des fibres est plus positif que celle au jeune âge et le retrait est plus réduit par la présence des fibres.

Après ce modeste travail, on estime que ce domaine de recherche est toujours fertile et attire la curiosité des chercheurs par la combinaison des matériaux locaux avec les différents types de fibres, afin de trouver la formulation adéquate qui favorise son utilisation en Algérie. Certaines perspectives et recommandations peuvent être citées à la fin de travail :

- Favoriser le domaine d'ouvrabilité de ce béton et sa mise en œuvre qui constitue l'handicap majeur qui limite son utilisation. Pour cela, les efforts doivent se concentrer pour donner au béton fibré une ouvrabilité convenable.
- Etudier l'effet combiné des constituants du béton avec le dosage de fibres sur le comportement rhéologique du béton. Cela, consiste à trouver les matériaux les plus adaptés à minimiser l'apparition d'un béton très ferme. On peut citer l'effet du calcaire et laitier ainsi que la forme des agrégats.
- Utilisation des fibres afin de minimiser les fissurations au jeune âge, paraît un domaine intéressant à conquérir, surtout sous des climats sévères comme celui de Chlef en période estivale. Cette solution permet de limiter la fissuration des dalles et des chapes coulées en plein jour en été.
- Etendre l'étude vers le domaine de durabilité de ces bétons, et trouver leurs comportements à long terme sous diverses conditions. Les milieux marins et la corrosion sont des milieux où la présence des fibres doit convaincre et prouver son apport positif au béton.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

- 1 ACI committee 544, "State of the art report on fibre-reinforced concrete", concrete International, Report ACI N° 544.IR.82, American Concrete Institute, Vol. 4, N° .5, May 1982, pp.9-30.
- 2 Fattuhi, N.I., "Properties of steel fibre reinforced cement-based matrices", Thesis of Master of Eng. University of Sheffield, April 1974, 357p.
- 3 Hughes, B.P. & Fattuhi, N.I., "The workability of steel fibre reinforced concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 28, N° .96, September 1976, pp.157-161.
- 4 ACI committee 544, "State of the art report on fibre-reinforced concrete", American Concrete Institute, Vol. 70, N° 11, November 1973, pp.729-744.
- 5 Beddar, M., "Fibre reinforced Concrete: past, Present and Future", Concrete magazine, Vol. 38, N° . 4, April 2004, pp 47-49.
- 6 ACI committee, "State of the art report on fibre reinforced concrete", American Concrete Institute, Journal, March-April 1984, pp.140-146.
- 7 Braun, M. & Majdic, A., "Reinforcing castables with stainless steel fibres", Intercera, Vol. 129, N° .129, 1980, pp.113-118.
- 8 Antoine, E.N., "Fibre reinforced for concrete", Concrete International design and construction, Vol. 7, N° . 3, March 1985, pp.21-25.
- 9 Porter, H.F., "Preparation of concrete from selection of materials to final disposition", Journal American Concrete Institute, Vol. 6, 1910, 296 pages.
- 10 Graham, G.M., "Reinforced concrete ", US. Patent, N° 983, 274, February 7, 1911.
- 11 Weakley, B.D., "Bonding means for reinforced concrete structures", US. Patent, N° .1,046,913, December 10, 1912.
- 12 Fickley, W., "Improvements in reinforcing structures and wearing surfaces of hydraulic, bituminous like cement, concrete, asphalt", British Patent, N° .11754, May 1914.
- 13 Smith, W., "Ferroconcrete construction ", US. Patent, N° . 1,349,901, June 21, 1927.
- 14 Zitkevic, N., "Improvements in reinforced concretes", British Patent, N° .515003, May 1983.
- 15 Battelle development corporation, "Concrete and steel material", British Patent, N° .1068163, December 1963.
- 16 Romualdi, J.P. & Batson, G.B., "Mechanics of crack arrest in concrete", Proceeding of American Society of Civil Engineers, Vol. 89, June 1963, pp. 147-168.
- 17 Romualdi, J.P. & Batson, G.B., "Behaviour of reinforced concrete beams with closely spaced short lengths of wire reinforcement", American Concrete Institute, Journal, Vol.60, N°6, June 1963, pp.775-789.
- 18 Chanvillard, G., "Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire", Rapport d'Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées OA12, 1993, 197 pages.

- 19 Rossi, P., "Les bétons de fibres métalliques", Presse de l'ENPC, Juin 1998, 309 p.
- 20 Lankard, D. R. & Sheets, H. D., "Use of Steel Wire Fibers in Refractory Castables", American Ceramic Society Bulletin, Vol. 50, N°. 5, May 1971, pp. 497-500.
- 21 Boulekbache, B., "Etude des bétons de fibres métalliques avec référence aux propriétés rhéologiques et de ductilité sous sollicitations de : Compression, Fendage, Cisaillement direct et Flexion", thèse doctorat en sciences, Université Houari Boumediene, Alger, 2010, 166 pages.
- 22 Arabi, N., "Contribution à l'étude du comportement mécanique du composite ciment verre et durabilité des fibres de verre", thèse doctorat, Université de Annaba, 2006, 191 pages.
- 23 Bentalha, M., "Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire", thèse doctorat, Université Mentouri-Constantine, 2007, 133 pages.
- 24 Vanuat, M., "Les bétons armés de fibres", Le moniteur, N°.3, Janvier 1976, pp.55-58.
- 25 Soroushiah, P. & Shashidhara, "Statistical Evaluation Of mechanical and Physical properties of Cellulose Fiber reinforced Cement Composites", American Concrete Institute, materials journal, March-April 1985, pp. 172-179
- 26 Vinson, K.D. & David, J.I., "Specialty Cellulose Fibers for cement reinforcement", SP- 124, American Concrete Institute, Detroit, 1990, pp.1-18
- 27 Mimoune, M, " Les renforts fibreux utilises dans les matériaux de construction", Revue Algérie Equipement, N°.15, Sept 1994, pp. 2-7.
- 28 Shah, S.P, & Naaman, A.E., "Mechanical properties of glass and steel fiber reinforced mortar", American Concrete Institute, Journal, U.S.A., Vol. 73, N°.1, Jan 1976, pp. 50-53.
- 29 Belhannachi, H., "Rehabilitation et renforcement des poteaux en béton arme", thèse de magister, Université Mentouri-Constantine, Juillet 2009, 115 pages.
- 30 Andra, "Les matériaux cimentaires", Référentiel matériaux, tome 3, Rapport Andra, 2005.
- 31 Guillaume Camps, "Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton", thèse doctorat, Université paul sabatier toulouse 3, 2008, 286 pages.
- 32 Association béton Québec, "Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton", Bibliothèque nationale du Québec, janvier 2005, 38 pages.
- 33 Atassi, M. F., "Etude du comportement des bétons de fibres métalliques : influence de la géométrie des fibres, du dosage et de l'anisotropie de leur repartition = study of steel reinforced concrete behaviour : influence of the shape, amount and anisotropic distribution", thèse de doctorat, Université Villeurbanne, France, 1997, 222 pages.
- 34 Swamy, R.N., Mangat, P.S., "Influence of fiber geometry on the properties of steel fibereinforced concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 4, N°. 3, 1974, pp. 307-313.

- 35 Sukontasukkul, P., "Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending", *Thammasat international journal of science and technology*, Vol. 9, N° 3, Jul.-Sep. 2004, pp. 35-41.
- 36 Fritih, Y., "Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton Autoplaçant armé", thèse doctorat, Université Toulouse, 2009, 246 pages.
- 37 Gopalaratnam, V.S. & Shah S., "Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete, Fiber Reinforced Concrete – Properties and Applications", SP 105, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987, pp. 1-25.
- 38 Dreux, G. & Festa, J., "Nouveau guide de béton et ses constituants", Edition Eyrolles, 8ème Edition 1998, troisième tirage 2007, 418 pages.
- 39 Naaman, A.E., "Fiber reinforced concrete : State of progress at the Edge of the millennium", 9th International Conference on Concrete Engineering and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, May 8-13 2006, pp. 20-48.
- 40 Makhlof, N., "Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux", mémoire de magister, 2010, 82 pages.
- 41 Fibres d'acier Applications béton projeté, www.arcelormittal.com, 2011.
- 42 Grunewald, S. & Walraven, J.C., "Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, 2001, pp. 1793-1798
- 43 Frahtia, S., " Influence de la concentration des fibres sur l'ouvrabilité du béton de fibres ", Projet de Fin d'Etude, Département de génie civil, Université de M'Sila, 2002, 135 pages.
- 44 Johnston, C.D., "Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete", proceedings of the international Rilem conference, London 1996, pp. 155-179.
- 45 Johnston, C.D., "Fiber-Reinforced Cements and Concretes", Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2001, 368 pages, ISBN: 9056996940.
- 46 Abdou, K., "Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire", thèse doctorat, université Mentouri Constantine, 2007, 151 pages.
- 47 Chafi, N., "matrice cimentaire renforce de fibres Valorisation des sous-produits (Polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois) ", Thèse de magister, Université Mentouri Constantine, 2005, 181 pages.
- 48 Ritchie, A.G.B. & Rahman A.T., "The effect of fiber reinforcement on the rheological properties of concrete mixes", *ACI International Symposium*, SP 44-2, pp.44.
- 49 Majumdar, A.J. & Nurse, R.W., "Glass Fibre Reinforced Cement", *Materials Science and Engineering*, Vol. 15, 1974, pp 107-127.
- 50 Marsh, H. N. & Clarke, L. L., " Glass fiber reinforced cement base materials", *American Concrete Institute, International Symposium*, SP 44-14, pp. 247-264.
- 51 Rossi, P., "Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques", *Annales de l'ITBTP*, N° 492, série béton 279, 1991, pp.90-107.
- 52 Baron, J. & Lesage, R., " Méthode expérimentale de composition des bétons hydrauliques ", *Bulletin de liaison de LPC*, Juillet-out 1976, N° 84, pp 130-140.

- 53 Serna Ros, P., "Etude de Contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement " Thèse Doctorat, Ecole national des Ponts et Chaussées, Paris, 1984, 177 pages.
- 54 Casanova, P., "bétons renforcés de fibres métalliques du matériau a la structure Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant", Thèse Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995, 225 pages.
- 55 Odelberg, G., "Producing and Promoting of Swedish steel fibers to the market", Steel Fiber Concrete Seminar Stockholm, June 1985, pp. 185-197.
- 56 Rossi, P., Acker, P. & Malier, Y., "Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure", *Materials and structures*, Vol.20, 1987, pp. 436-439.
- 57 Banthia, N. & Trottier, J., "Concrete reinforced with deformed steel fibers, part I: bondslip mechanisms", American Concrete Institute, *Materials Journal*, Vol.91, N°5, 1994, pp. 435-444.
- 58 Deng, Z. & Li J., "Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete", *Computers and Concrete*, Vol. 4, No.1, 2007, p 19-31.
- 59 Soroushian, P. & Lee C.-D., "Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete", American Concrete Institute, *Materials Journal*, Vol. 87, N° 5, 1990, pp. 433-439.
- 60 Debicki, G., "Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance et la fissuration du matériau", Thèse de Doctorat d'Etat en sciences, INSA de Lyon, 1988, 374 p.
- 61 Dardare, J., " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène ", In : *fiber reinforced cement and concrete*, RILEM Symposium, 1975, Edited by A. NEVILLE, Lancaster, Construction Press., 1975, pp.227-235.
- 62 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.
- 63 Gopalaratman, V.S. & Shah, S.P., "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension", American Concrete Institute, *Journal*, may 1, 1985, Vol. 82, n° 3, pp. 310-323.
- 64 Damgir, R. M. & Ghugal, Y. M., "prediction of compressive strength by incorporating steel fibers", 35th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, August 2010, pp. 25 - 27.
- 65 Johnston, C.D., "Steel fiber reinforced mortar and Concrete: a review of mechanical properties", International symposium, SP 44-7, pp. 127-142.
- 66 Balaguru, P., & Ramakrishnan, V., "Comparison of Slump Cone and V-B tests as measures of workability for fiber-reinforced and plain concrete", *cement Concrete Aggregate revue* , Vol. 9, N° 1, 1987, pp 3-11.
- 67 Jonhston, C.D. & Coleman, R.N., "Strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension", International Symposium: Fiber reinforced concrete, American Concrete Institute, Publication SP- 44, Detroit, 1974, pp. 177-193.

- 68 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.
- 69 Edington, J., "Steel fiber reinforced concrete", Thesis for the degree of PhD, University of Surrey, England, 1973, 352 p.
- 70 Fariborz, M., Soleimani, S.M. & Banthia, N., "Shear strength of reinforced concrete beams with a fiber concrete matrix" , Canadian journal of civil engineering, Vol. 33, N°6, 2006, pp. 726-734.
- 71 Tan, K. H. & Mansur, M. A., "Shear Transfer in Reinforced Fiber Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 2, N°. 4, 1990, pp. 202-214.
- 72 Mirsayah, A. & Banthia, N., "Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Materials Journal, Vol. 99, N°. 5, 2002, pp. 473-479.
- 73 Cucchiara, C., Mendola, L. & Papia, M., "Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement", Cement and concrete composites, Vol. 26, N° 7, 2004, pp. 777-786.
- 74 Dhir, "Near-surface characteristics of concrete: abrasion resistance", Materials and Structures, Vol. 24, 1991, pp. 122–128.
- 75 Nicholas, J. P., "abrasion wear, abrasion resistance, and related strength characteristics in concrete, with special reference to concrete pavers", Doctor of Philosophy, University of the Witwatersrand, February 2002,300 p.
- 76 Nanni, A., "Abrasion resistance of roller-compacted concrete", American Concrete Institute Mater, Vol. 86, N° 53, 1989, pp. 559-565.
- 77 Mangat, P.S. & Motamedi Azari, M., "A theory for the free shrinkage of steel fibre reinforced cement matrices", journal of materials science, Vol 19, 1984, pp. 2183-2194.
- 78 Abdou, K. & Houari, H., "influence des fibres d'acier sur les variations dimensionnelles et ponderales des matrices cimentaires", Sciences & Technologie B – N°26, décembre 2007, pp. 43-48.
- 79 Beddar, M. & Belagraa, L., "influence of fibrous waste addition on the shrinkage of mortars", Asian journal of civil engineering, Vol. 4, N°. 1, 2003, pp. 65-72.
- 80 Chern, J.C. & Young, C.H., "Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 11, N°. 4, 1989, pp. 205-214.
- 81 Jonas, C., "Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self-compacting concrete overlays Test methods and theoretical modelling", Doctoral thesis, Lulea University of Technology, 2006, 261 pages.
- 82 NF P 18-303, Normes Afnor, (aoû. 1999), Bétons – eau de gâchage, 16 pages.
- 83 NF P 18-451, Normes Afnor, (déc. 1981), Bétons – essai d'affaissement.
- 84 NF P18-409, Normes Afnor, (avr. 1993), Béton avec fibres métalliques, Essai de flexion, 8 pages.
- 85 NF P 18-404, Normes Afnor (déc. 1981) Bétons – Essai d'Etude, de Convenance et de Contrôle – Confection et conservation des éprouvettes.

- 86 NF P 18-433, Normes Afnor, (oct. 2001), Essai pour béton durci – Partie 5 : Résistance à la flexion des éprouvettes.
- 87 NF P 18-455, Normes Afnor, (fèv. 2003), Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance en compression des éprouvettes, 17 pages.
- 88 Behbahani, H P., "flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams", A project report of the degree of Master of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, April, 2010, 69 pages.
- 89 BAEL 2003, "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et construction en béton armé suivant la méthode des états limites", BAEL99 révisé 2003, Paris, 151 pages.
- 90 Larsen, H.J. & Gustafsson, P.J., "The fracture energy of wood in tension perpendicular to the grain", 23th CIB-W18A meeting. Lisbon. 1990.
- 91 Li, H., Zhang, M. & Ou, J., "Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement", *Wear* 260, China 2006, pp.1262–1266.