

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Hassiba Benbouali de Chlef  
Faculté de Génie Civil et d'Architecture  
Département de Génie Civil



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de  
**DOCTORAT EN SCIENCES**

Spécialité : **Génie Civil**

Par  
**Fatima SETTI**

Thème :

---

## **CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EFFET D'ECHELLE SUR LES PROPRIETES D'UN BETON FIBRÉ**

---

Soutenue le 08 /03/2021

Devant le jury composé de :

Abdelkader KADRI	Professeur	UHB Chlef	Président
Said KENAI	Professeur	USD Blida	Examineur
Belkacem MENADI	Professeur	USD Blida	Examineur
Bensaid BOULEKBACHE	Professeur	UHB Chlef	Examineur
Toufik Boubekeur	MCA	CU Tissemsilt	Examineur
Karim EZZIANE	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur



## *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 Pr. 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 Pr. KADRI Abdelkader Professeur à l'université de Chlef, qui a bien voulu accepter de présider ce Jury, de même messieurs: KENAI Said ; Professeur à l'université de Blida, MENADI Belkacem ; Professeur à l'université de Blida, BOULEKBACHE Bensaid ; Professeur à l'université de Chlef et BOUBEKEUR Toufik ; Maître de Conférence classe A au centre universitaire de Tissemsilt 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 Mr. 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.

Je remercie également tous les enseignants 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 mon frère et 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*



## ملخص

الخرسانة المعززة بالألياف المعدنية هي مادة بناء جديدة تتمتع بقوة شد جيدة، ومتانة للكسر، وليونة. على الرغم من أن العديد من خصائص الخرسانة المسلحة بالألياف المعدنية قد تم دراستها على نطاق واسع، إلا أن تأثير الأبعاد على المقاومة للعينات المصنوعة من هذا النوع من الخرسانة تبقى مصدر قلق. تبحث هذه الدراسة مدى تأثير الحجم على مقاومة الانحناء لمجموعة من الروافد في ظل اختبارات الانحناء ذات ثلاث نقاط لهذا الغرض، تم عمل أربعة مخاليط، خليط لخرسانة بدون ألياف كخرسانة مرجعية، وخليط لخرسانة معززة بـ 0.5، 1 و 1.5% من الألياف المعدنية من إجمالي حجم الخرسانة. تشير نتائج الاختبار التجريبي إلى أن إضافة الألياف، حتى بكميات صغيرة للخرسانة له تأثير سلبي على ريولوجياتها ومنه على سهولة صبها ومنه تحتاج إلى المزيد من كمية الملدنات المضافة. تم تحسين مقاومة الانحناء والضغط وفتح الشقوق مع زيادة محتوى الألياف. تعتبر الألياف المعدنية أكثر كفاءة في مقاومة الانحناء وتجعل الخرسانة أكثر حساسية لتأثير الحجم. تم عرض علاقات جديدة تربط بشكل جيد النتائج التجريبية مع معاملات الارتباط القريبة من الوحدة والتي تأخذ في الاعتبار أبعاد العينات ومحتوياتها من الألياف المعدنية.

*الكلمات الرئيسية: الخرسانة؛ مقاومة الانحناء؛ تأثير الأبعاد؛ الألياف المعدنية؛ الخواص الميكانيكية؛ الانكماش.*

## Résumé

Le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est un nouveau matériau de construction avec une bonne résistance à la traction, une ténacité à la rupture et une ductilité. Bien que de nombreux aspects du BRFM aient été étudiés de manière approfondie, les effets de la taille sur la résistance structurale des membres du BRFM restent largement préoccupants. Cette étude examine l'effet d'échelle sur la résistance à la flexion des poutres en béton fibré soumises à la flexion en trois points. A cet effet, quatre mélanges ont été réalisés ; un béton sans fibres comme béton témoin et des bétons renforcés avec 0.5 ; 1 et 1.5% de fibres FM calculés par rapport au volume total de béton. Les résultats des tests expérimentaux indiquent que l'ajout de fibres, même en petites quantités, réduit l'ouvrabilité du béton qui nécessite plus de superplastifiant à ajouter. Les résistances à la flexion et à la compression sont améliorées et l'ouverture des fissures est limitée à mesure que la teneur en fibres augmente. Les FM sont plus efficaces en résistance à la flexion et rendent le BRFM plus sensible à l'effet d'échelle. De nouvelles relations sont présentées qui corrént bien les résultats expérimentaux avec des coefficients de corrélation proches de l'unité et qui tient compte de l'échelle des éléments et leurs teneurs en fibres métalliques.

**Mots-clés :** *béton ; résistance à la flexion ; effet d'échelle ; fibre métallique ; propriétés mécaniques ; retrait.*

## Abstract

Steel fiber reinforced concrete (SFRC) is a new construction material with good tensile strength, fracture toughness, and ductility. Although many aspects of SFRC have been investigated extensively, the size effects on structural strength of SFRC members remain largely preoccupant. This study investigates the size effect on flexural strength of SFRC beams under three-point bending tests. For this purpose, four mixtures were made, a concrete without fibers as control concrete, and concretes reinforced with 0.5, 1, and 1.5% of steel fibers (SF) of total concrete volume. The experimental test results indicate that the addition of fibers, even small amounts reduces concrete workability that needs more superplasticizer added. Flexural and compressive strength are improved and crack opening is limited as the fiber content increases. SF is more efficient in flexural strength and makes SFRC more sensitive to the size effect. New relationships are presented which correlate well the experimental results with correlation coefficients close to unity and which take into account elements size and their Steel fiber contents.

**Keywords:** *Concrete; flexural strength; size effect; steel fiber; mechanical properties, shrinkage.*



## Liste des Figures

Titre	page
Figure 1.1 : <i>Composition générale d'un matériau composite</i> [3].	7
Figure 1.2 : <i>Caractéristiques des fibres</i> [8].	9
Figure 1.3 : <i>Différentes formes géométriques de fibres métalliques.</i>	11
Figure 1.4 : <i>Effet de L/Dg sur la structure interne d'une matrice</i> [27].	14
Figure 1.5: <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].	17
Figure 1.6 : <i>Temps de vibration Vé-Bé en fonction de la teneur volumique (Vf) en fibres d'acier</i> [34].	18
Figure 1.7: <i>Effet de la teneur en fibres de verre sur l'ouvrabilité</i> [40].	19
Figure 1.8 : <i>Rôle des fibres dans la matrice de béton</i> [43].	20
Figure 1.9 : <i>Illustration de l'apport du renfort par des fibres</i> [43].	20
Figure 1.10: <i>Autres utilisations du béton de fibres</i> [46].	24
Figure 2.1 : <i>Déformation du crochet et glissement de la fibre</i> [43].	29
Figure 2.2 : <i>Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un BFM en fonction du pourcentage de fibre.</i> [37]	30
Figure 2.3 : <i>Rôle des fibres dans le processus de fissuration du béton</i> [43].	31
Figure 2.4 : <i>Influence du dosage en fibres lors d'un essai de compression</i> [55].	33
Figure 2.5 : <i>Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres</i> [59].	33
Figure 2.6 : <i>Influence de la teneur et la longueur de fibres métalliques sur le comportement en compression d'un béton fibré</i> [8].	34
Figure 2.7 : <i>Augmentation de la résistance de traction d'un mortier fibré en fonction de l'élançement des fibres</i> [61].	35
Figure 2.8: <i>Résistance à la flexion du ciment avec fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres</i> [39].	36
Figure 2.9: <i>Effet de l'orientation des fibres sur le comportement du béton de fibres en Flexion.</i> [65]	37
Figure 2.10 : <i>Courbe effort- déformation en compression.</i>	38
Figure 2.11: <i>Courbes effort- déformation en traction.</i>	38
Figure 2.12: <i>Courbe charge –flèche en flexion.</i>	38
Figure 2.13: <i>Relation entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression</i> [71].	39
Figure 2.14 : <i>Effet d'échelle de volume</i> [82].	42
Figure 2.15 : <i>L'effet d'échelle de structure d'après L'Hermite</i> [83].	43
Figure 2.16 : <i>La rupture d'une chaîne constituée de « n » maillons</i> [79].	44
Figure 2.17 : <i>Zone de relâchement des contraintes dans une éprouvette entaillée.</i>	46
Figure 2.18 : <i>Zone de relâchement dans les poutres de grandes et de petites tailles.</i>	47
Figure 2.19 : <i>Loi d'effet d'échelle proposée par Basant pour des structures entaillées</i> [85]	48
Figure 2.20 : <i>Fissure fractale et sa zone d'élaboration d'après Carpinterie</i> [88].	49
Figure 3.1: <i>Analyse granulométrique du sable et du gravier.</i>	53
Figure 3.2 : <i>Carrière d'Oued Fodda (Chlef)</i>	53
Figure 3.3 : <i>Fibres métalliques de type DRAMIX utilisées.</i>	55
Figure 3.4 : <i>Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.</i>	56
Figure 3.5 : <i>Remplissage du moule avec le béton frais</i> [90].	58
Figure 3.6 : <i>Différents moules utilisés.</i>	58
Figure 3.7 : <i>Mini-poutres testées en déflexion sur l'effet de la hauteur.</i>	59
Figure 3.8 : <i>Mini-poutres testées en déflexion sur l'effet de la longueur.</i>	59
Figure 3.9 : <i>Table vibrante utilisé pour le compactage des bétons de fibrés.</i>	60
Figure 3.10 : <i>Bac de Conservation des éprouvettes.</i>	60
Figure 3.11 : <i>Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.</i>	62

Figure 3.12 : <i>Essai de compression.</i>	63
Figure 3.13 : <i>Essai de flexion.</i>	64
Figure 3.14 : <i>Mode de rupture.</i>	65
Figure 3.15 : <i>Instrumentation des mini-poutres pour suivre l'évolution des flèches.</i>	65
Figure 3.16 : <i>Essai de déformabilité (Effet de H).</i>	66
Figure 3.17 : <i>Les éprouvettes de déformabilité (Effet de L).</i>	67
Figure 3.18 : <i>Essai de déformabilité des mini-poutres pour un élanement des fibres de <math>l/d=80</math>.</i>	68
Figure 3.19 : <i>Eprouvettes pour mesure du retrait.</i>	68
Figure 3.20 : <i>Micro-Duval utilisé pour l'essai d'abrasion.</i>	69
Figure 3.21 : <i>Eprouvettes après l'essai d'abrasion.</i>	70
Figure 4.1 : <i>Variation de l'ouvrabilité du béton en fonction du dosage de fibre.</i>	73
Figure 4.2: <i>Evolution de la résistance à la compression des bétons fibrés en fonction de l'âge du béton.</i>	73
Figure 4.3: <i>Présentation des éprouvettes écrasées en compression.</i>	74
Figure 4.4: <i>Evolution de la résistance à la compression des bétons fibrés en fonction du dosage en fibres.</i>	75
Figure 4.5: <i>Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge et du dosage en fibre.</i>	76
Figure 4.6: <i>Présentation des éprouvettes écrasées en flexion.</i>	76
Figure 4.7: <i>Evolution de la résistance à la flexion en fonction du dosage en fibre.</i>	77
Figure 4.8 : <i>Spécimens après l'essai avec de multiples fissures.</i>	78
Figure 4.9 : <i>Courbe charge-flèche des poutres en béton renforcé de fibres métalliques.</i>	79
Figure 4.10 : <i>Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 0%.</i>	80
Figure 4.11 : <i>Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 0.5%.</i>	81
Figure 4.12 : <i>Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 1%.</i>	81
Figure 4.13 : <i>Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 1.5%.</i>	82
Figure 4.14 : <i>Variation du module de déformation du béton fibré.</i>	82
Figure 4.15 : <i>Variation de l'énergie de rupture en fonction de la teneur en fibres.</i>	83
Figure 4.16 : <i>Perte en poids due à l'abrasion des différentes éprouvettes.</i>	84
Figure 4.17 : <i>Résistance à l'abrasion d'un béton fibré en fonction du temps.</i>	84
Figure 4.18 : <i>Eprouvettes ayant subi l'essai d'abrasion pendant différentes durées.</i>	85
Figure 4.19 : <i>Retrait libre d'un béton renforcé avec des fibres métalliques</i>	86
Figure 4.20 : <i>Evolution du retrait en fonction de la teneur en fibre à différents âges.</i>	87
Figure 4.21 : <i>Variation des résistances ultimes <math>F_{cu}</math> et des demi-âges T50 en fonction du dosage en fibres métalliques</i>	89
Figure 4.22 : <i>Variation des résistances mesurées et calculées par l'équation 4.3 pour un béton contenant 1% de fibres métalliques.</i>	89
Figure 4.23 : <i>Relation entre les valeurs de la résistance à la compression calculée et la résistance à la compression mesurée pour un béton fibré.</i>	90
Figure 4.24 : <i>Comparaison entre les valeurs de la résistance à la flexion mesurées et estimées à l'aide de l'Equation (4.7).</i>	91
Figure 4.25 : <i>Comparaison de la variation du module d'élasticité prédit par l'Eurocode 2 et l'Equation proposée avec les résultats expérimentaux obtenus.</i>	92
Figure 4.26 : <i>Variation de la perte en poids par l'essai d'abrasion en fonction de la résistance à la compression (<math>t=28</math> jours)</i>	93
Figure 4.27 : <i>Comparaison entre l'abrasion mesurée et estimée à 28 jours.</i>	94
Figure 4.28 : <i>Comparaison entre les retraits mesurés et estimés du béton fibré.</i>	95
Figure 5.1 : <i>Présentation des mini-poutres testées à l'effet d'échelle en flexion.</i>	99
Figure 5.2 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 0% de fibres métalliques.</i>	99
Figure 5.3 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 0.5% de</i>	99

<i>fibres métalliques.</i>	
Figure 5.4 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 1% de fibres métalliques.</i>	100
Figure 5.5 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 1.5% de fibres métalliques.</i>	100
Figure 5.6 : <i>Variation de la résistance à la flexion en fonction de la taille échantillon.</i>	101
Figure 5.7 : <i>Variation de la résistance à la flexion expérimentale et calculée par l'Equation 5.3 selon la taille des éprouvettes.</i>	102
Figure 5.8 : <i>Comparaison entre les valeurs de résistance à la flexion mesurées et estimées à l'aide de L'équation (5.3).</i>	103
Figure 5.9 : <i>Variation de la résistance à la flexion expérimentale et calculée par l'Equation 5.4 selon la taille des éprouvettes.</i>	104
Figure 5.10 : <i>Comparaison entre les valeurs de la résistance à la flexion mesurées et estimées à l'aide de L'équation (5.4).</i>	104
Figure 5.11 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton sans fibres métalliques.</i>	106
Figure 5.12 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton avec 0.5% de fibres métalliques.</i>	106
Figure 5.13 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton avec 1% de fibres métalliques.</i>	107
Figure 5.14 : <i>Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton avec 1.5% de fibres métalliques.</i>	107
Figure 5.15 : <i>Variation de la résistance à la flexion en fonction de la longueur des poutres des bétons fibrés.</i>	108
Figure 5.16 : <i>Comparaison entre les résistances à la flexion mesurées et calculées pour différentes longueur des poutres.</i>	109
Figure 5.17 : <i>courbe force-flèche des mini-poutres en béton fibrées de 0.5% de fibres ayant différents L/D.</i>	110
Figure 5.18 : <i>courbe force-flèche des mini-poutres en béton fibrées de 1% de fibres ayant différents L/D.</i>	111
Figure 5.19 : <i>Courbe force-flèche des mini-poutres en béton fibrées de 1.5% de fibres ayant différents L/D.</i>	111
Figure 5.20 : <i>Variation de la résistance la flexion en fonction de la teneur en fibre pour différents L/D utilisés.</i>	112
Figure 5.21 : <i>Comparaison entre les résistances à la flexion mesurées et calculées par l'équation 5.6 pour différents élancement des fibres.</i>	113
Figure 5.22 : <i>Affaissement des bétons renforcés avec des fibres de différents élancements.</i>	113
Figure 5.23 : <i>Comparaison entre l'affaissement mesuré et calculé par l'équation 5.7 pour différents élancement des fibres.</i>	114

## *Liste des Tableaux*

<b>Titre</b>	<b>page</b>
Tableau 1.1 : <i>Différents types de fibres [9].</i>	9
Tableau 1.2 : <i>Principales propriétés physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées [10].</i>	9
Tableau 1.3 : <i>Applications des bétons renforcés de fibres [45]</i>	23
Tableau 3.1 : <i>composition du ciment utilisé.</i>	52
Tableau 3.2 : <i>Caractéristiques du gravier utilisé.</i>	53
Tableau 3.3 : <i>Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW 30.</i>	54
Tableau 3.4 : <i>Données techniques de la fumée de silice « S 95 DS ».</i>	54
Tableau 3.5 : <i>Caractéristiques des fibres utilisées</i>	55
Tableau 3.6 : <i>Composition massique en kg/m<sup>3</sup> du mélange béton.</i>	56
Tableau 4.1 : <i>Valeurs des paramètres d'ajustement de l'équation 4.11</i>	95



## Table des matières

REMERCIEMENTS.....	I
ملخص.....	III
Résumé.....	III
Abstract.....	III
Liste des Figures.....	V
Liste des Tableaux.....	VII
Table des matières.....	IX

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

### Chapitre 01 : Utilisation des fibres dans le béton

1.1. Introduction.....	6
1.2. Généralités sur les matériaux composites.....	6
1.3. Composition.....	7
1.3.1. Béton.....	7
1.3.2. Fibres.....	7
1.3.3. Béton de fibres.....	8
1.4. Nature des fibres.....	8
1.5. Principales fibres utilisées.....	10
1.5.1. Fibres de polypropylène.....	10
1.5.2. Fibres de verre.....	10
1.5.3. Fibres métalliques.....	11
1.5.4. Fibres d'amiante.....	12
1.5.5. Fibres de cellulose.....	12
1.5.6. Fibres de carbone.....	13
1.5.7. Fibres d'aramide.....	13
1.6. Technologie de fabrication des bétons de fibres.....	14
1.6.1. Granulométrie.....	14
1.6.2. Malaxage.....	14
1.6.3. Mise en œuvre.....	15
1.6.4. Ouvrabilité.....	16
1.6.4.1. Taille et rugosité des granulats.....	16
1.6.4.2. Longueur et le rapport l/d de fibre.....	18
1.6.4.3. Teneur en fibres.....	18
1.7. Rôles des fibres dans le béton.....	19
1.8. Avantages et inconvénients du béton fibré.....	21
1.9. Applications du béton de fibres.....	22
1.10. Conclusion.....	25

### Chapitre 02 : Propriétés du béton de fibres et Notion générale sur l'effet d'échelle

2.1. Introduction.....	28
2.2. Comportement mécanique du béton de fibres.....	28
2.2.1. Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques.....	28
2.2.2. Influence du pourcentage des fibres.....	29
2.2.3. Influence de la longueur de fibres.....	30
2.2.4. Influence de l'adhérence fibres matrice.....	31
2.2.5. Effet de l'orientation sur les caractéristiques mécaniques.....	31

2.3. Effet sur les caractéristiques mécaniques du béton.....	32
2.3.1. Comportement en compression.....	32
2.3.2. Comportement en traction .....	34
2.3.3. Comportement en flexion .....	35
2.3.4. Déformabilité (courbe charge-flèche).....	37
2.3.5. Résistance à l'abrasion .....	39
2.3.6. Retrait .....	40
2.4. Notion sur l'effet d'échelle .....	41
2.4.1. Effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragile.....	41
2.4.1.1. Effet d'échelle de volume.....	42
2.4.1.2. Effet d'échelle de structure .....	43
2.4.2. Différentes approches décrivant l'effet d'échelle .....	44
2.4.2.1 Théorie statistique de Weibull .....	44
2.4.2.2 La théorie déterministe de Bazant .....	46
2.4.2.3 La théorie fractale des effets d'échelle .....	49
2.5. Conclusion.....	50

### Chapitre 03 : Matériaux et Protocole expérimental

3.1. Introduction .....	52
3.2. Matériaux utilisés.....	52
3.2.1. Ciment .....	52
3.2.2. Sable .....	52
3.2.3. Gravier .....	53
3.2.4. Adjuvant .....	54
3.2.5. Fumée de silice .....	54
3.2.6. Eau de gâchage .....	54
3.2.7. Fibres d'acier .....	55
3.3. Composition du béton .....	55
3.4. Mode de fabrication du béton.....	57
3.4.1. Malaxage du béton.....	57
3.4.2. Confection des éprouvettes .....	57
3.4.3. Conservation des éprouvettes.....	60
3.5. Procédure des essais effectués.....	61
3.5.1. Essai de d'ouvrabilité.....	61
3.5.2. Essai de compression.....	62
3.5.3. Essai de traction par flexion .....	63
3.5.4 Essai de déformabilité .....	64
3.6.5. Retrait libre.....	67
3.6.6 Essai de résistance à l'abrasion .....	68
3.7. Conclusion .....	69

### Chapitre 04 : Propriétés du béton aux fibres métalliques

4.1. Introduction .....	72
4.2. Essai d'ouvrabilité .....	72
4.3. Résistance à la compression .....	73
4.4. Résistance à la flexion .....	76
4.5. Déflexion des mini-poutres .....	78
4.5.1. Module de déformation .....	79
4.5.2. Energie de rupture.....	83
4.6. Résistance à l'abrasion.....	84

4.7. Retrait libre .....	86
4.8. Analyse corrélacionnelle .....	88
4.8.1. Corrélation de la résistance à la compression .....	88
4.8.2. Corrélation de la résistance à la flexion .....	90
4.8.3. Corrélation du module de déformation.....	91
4.8.4. Corrélation de la résistance à l'abrasion.....	92
4.8.5. Corrélation du retrait total.....	94
4.9. Conclusion.....	95

Chapitre 05 : Etude de l'effet d'échelle sur les propriétés du béton de fibres métalliques

5.1. Introduction .....	98
5.2. Effet de la hauteur des poutres (H) .....	99
5.3. Effet de la longueur des poutres (L) .....	106
5.4. Effet de l'élanacement de fibre (L/D) .....	110
5.5. Affaissement du béton en fonction du L/D de fibre.....	114
5.6. Conclusion.....	116

Conclusions Générales.....	118
----------------------------	-----

Références bibliographiques .....	122
-----------------------------------	-----



# *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 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.

Les caractéristiques mécaniques et les réponses des éprouvettes faites de ce matériau obtenues aux laboratoires ne sont pas nécessairement identiques à celles des ouvrages en service. Un problème majeur qui se pose vient du fait que l'identification des propriétés mécaniques des structures de génie civil de grande taille se fait sur des éléments de laboratoire qui sont d'une taille nettement plus inférieure. En effet, la gamme de taille de la plupart des essais expérimentaux au laboratoire est limitée. À l'échelle du laboratoire (éprouvettes, poteau/poutre), le comportement est plutôt quasi-fragile or il est parfaitement fragile à l'échelle des ouvrages (barrage, pile de ponts...).

Le phénomène de l'effet d'échelle peut trouver son explication à une échelle plus fine; celle du matériau. Si on se place à l'échelle des constituants du béton, on observe que le béton est un matériau fortement hétérogène constitué principalement de granulats, de mortier (avec ses composantes) et d'une zone de transition entre les deux. Le comportement interactionnel est à l'origine du développement d'une zone de micro-fissure à la pointe d'une fissure amorcée.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la présence de fibres métalliques dans le béton. Le projet aborde les aspects allant du comportement des fibres au comportement de ce matériau vis-à-vis des différentes sollicitations et de mettre en évidence l'importance de la prise en considération des phénomènes de l'effet d'échelle, 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 exécutés.

L'étude est composée de Cinq chapitres ; la première partie de ce travail, représentant la partie bibliographique ; contient deux chapitres.

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 une notion sur l'effet d'échelle ainsi que 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 Dramix. 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 et l'effet d'échelle, 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.

Dans le cinquième chapitre, on s'intéresse à interpréter et à modéliser les différents résultats trouvés. Certaines propriétés sont corrélées avec la résistance à la compression afin de rendre nos résultats plus pratiques. La résistance à la traction est représentée en fonction de la composition du béton et de la taille des éprouvettes où l'effet d'échelle peut se mettre en évidence.

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

Chapitre 01 :

*Utilisation des fibres  
dans le béton*

## *1.1. Introduction*

L'effet d'utiliser d'une fibre comme renfort au sein d'une matrice, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice. Sans toutefois ignorer le facteur économique (coût), qui est très important dans la mesure où le prix des fibres sur le marché est relativement élevé par rapport aux armatures traditionnelles. La variété de la nature et de la forme des fibres, fait que ces dernières présentent des caractéristiques différentes les unes des autres. Selon les objectifs recherchés, on peut faire la distinction entre les fibres possédant des résistances élevées (fibres de verres, d'acier, de carbone, d'amiante) et les fibres possédant des résistances faibles (fibres végétales, polypropylènes ...). Plusieurs variétés de fibres sont actuellement sur le marché selon leurs natures et leurs caractéristiques ; on les trouve sous des formes et des dimensions diverses. Parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des matériaux du Génie Civil et des Travaux Publics on peut citer ; les fibres polypropylènes, d'amiante, de carbone, de verres, les fibres végétales et métalliques [1].

## *1.2. Généralités sur les matériaux composites*

Un matériau composite est un solide polyphasé dans lequel deux ou plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'atteindre [2, 3].

D'un point de vue général et simplifié, les composites sont constitués des trois phases suivantes :

- la matrice constituée d'une phase continue,
- les fibres de renfort qui constituent une phase dispersée,
- les zones de transition (interfaces) fibres-matrice.

La diversité des composites est essentiellement due à la variabilité du renfort fibreux. La figure 1.1 synthétise la composition générale d'un matériau composite.

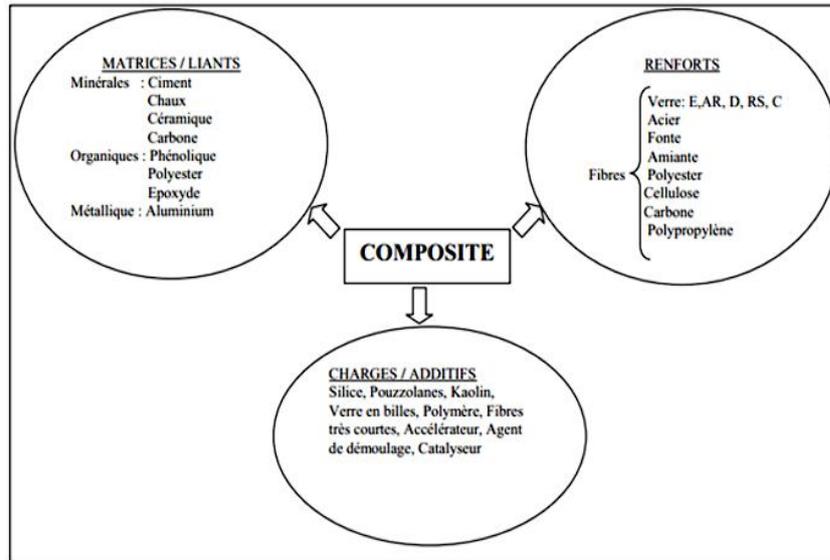


Figure 1.1 : Composition générale d'un matériau composite [3].

## 1.3. Composition

### 1.3.1. Béton

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. Le béton a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage ou de projection pour se prêter à diverses conceptions, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique, sa bonne tenue au feu et sa durabilité. Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps.

### 1.3.2. Fibres

Le terme *fibre* se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque millimètre 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 ; la fibre de grande longueur ou filament continu. En 1982, American Concrete Institute [4] 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 élanement qui est défini comme le rapport entre la longueur et le diamètre équivalent de 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 [5, 6] mettaient en évidence le rôle prépondérant de l'élanement 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.

### *1.3.3. Béton de fibres*

On appelle béton de fibres, le mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinus présentés 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 par projection (cas de béton de fibres projeté). En 1973, le comité 544 de l'*American Concrete Institute* [7], définit le béton de fibres comme un béton constitué d'un ciment hydraulique et un granulats 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.

## *1.4. 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 (Figure 1.2), 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.

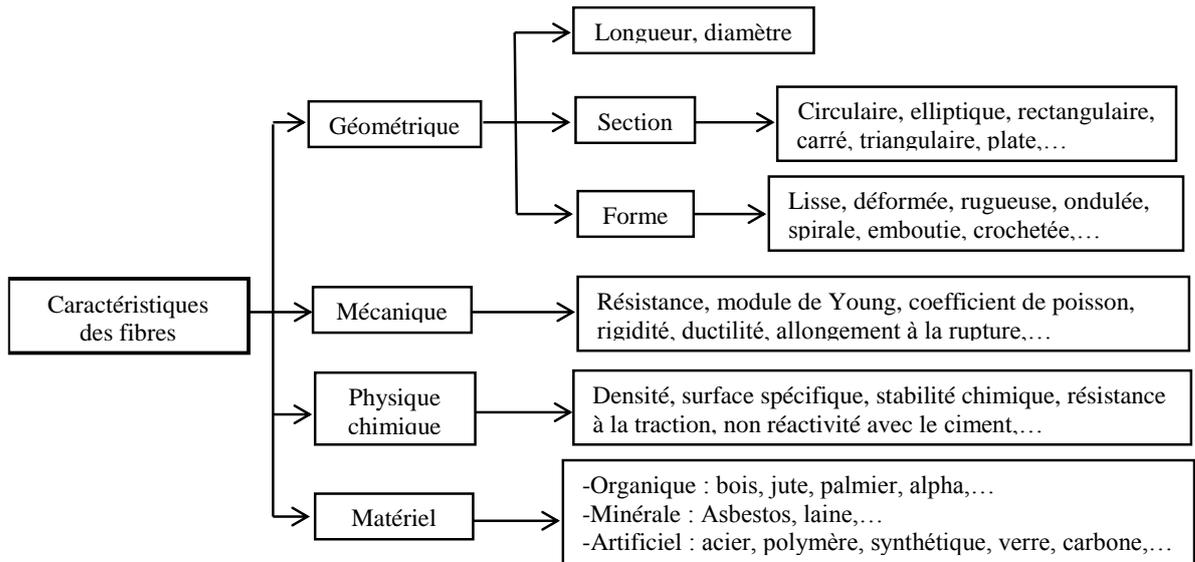


Figure 1.2 : Caractéristiques des fibres [8].

Tableau 1.1 : Différents types de fibres [9].

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

Tableau 1.2 : Principales propriétés physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées [10].

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	Densité	Rt(MPa)	E(10 <sup>3</sup> ) MPa	Allongement à La rupture	Coeff. de Dilatation (µ/m)	R <sub>feu</sub> 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		

## 1.5. Principales fibres utilisées

### 1.5.1. Fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines, découvert en 1954. Ils sont obtenus suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées [11].



Ces fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui une fois introduits dans le matériau se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment, leur masse volumique est d'environ 0.9 kg/dm<sup>3</sup> et une bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa avec une déformabilité élevée [12].

Les fibres de polypropylènes sont surtout utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, dans l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions, dans la fabrication de pieux de fondation ainsi que dans la réalisation des canalisations [13].

### 1.5.2. Fibres de verre

Le verre est un matériau solide qui s'est formé par refroidissement d'un liquide vis queux. Il est caractérisé par une très grande fragilité attribuée 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, chauffée par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 µm.



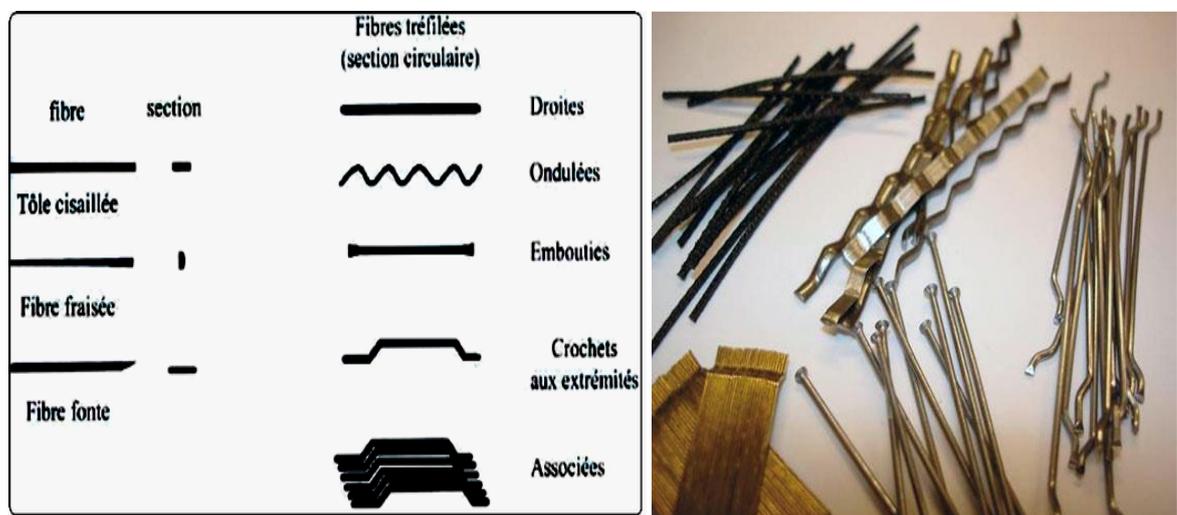
Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Elles sont regroupées en trois types ; la fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et les fibres de verre 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 [14, 15].

### 1.5.3. 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 inter-faciale 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 a conduit à de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leurs diamètres, leurs sections (ronde, carrée, rectangulaire), leurs longueurs et leurs modes d'opérations. La figure 1.3 représente les différentes formes géométriques des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton [16, 17].



**Figure 1.3 :** 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.

### 1.5.4. 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 [18, 19]. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans divers applications telles que les voiles, les tuyaux, les panneaux, les matériaux d'isolation thermique, la protection contre le feu, les tuyaux d'égout, les plaques de toitures plates et ondulées et les revêtements de mur.



### 1.5.5. 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 sont comprises entre 10 à 50 mm, alors que l'élançement 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'un 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 [20,21] a montré que ce type de fibres est sensible aux effets d'humidité.



### 1.5.6. Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité de 200 à 800 GPa. L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles de précontrainte. La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements, les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouve des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires [22, 23].



### 1.5.7. Fibres d'aramide

Appelés aussi polyamide aromatique, les fibres d'aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom Kevlar. Ces fibres possèdent la densité la plus faible et le rapport résistance-poids le plus élevé en comparaison aux autres fibres de renfort. Elles sont 43% plus légères que les fibres de verres et environs 20% que les fibres de carbone [24]. En plus de leur grande résistance à la traction, les fibres d'aramides offrent une bonne résistance à l'abrasion et aux chocs, une bonne résistance à la fatigue et une bonne tenue à la température et aux agressions chimiques. Les inconvénients de ce type de fibres sont la résistance faible à la compression et au cisaillement ce qui justifie pourquoi elles sont peu utilisées dans les PRF destinés aux renforcements des structures de génie-civil. La densité des fibres d'aramides est de l'ordre de  $1.4\text{g/cm}^3$ . Ces fibres possèdent, dans le sens longitudinal, une résistance à la traction variant de 3400 à 4100 MPa et un module d'élasticité qui varie entre 70 et 125 GPa [25, 26].



## 1.6. Technologie de fabrication des bétons de fibres

### 1.6.1. Granulométrie

Comme pour le béton ordinaire, la qualité du granulat et la granulométrie affectent de façon significative la résistance et la performance du béton renforcé de fibres. Un granulat de qualité s'impose quand le béton de fibres est utilisé en milieu défavorable, lorsqu'une grande résistance est demandée. Le choix des fibres doit être compatible avec la taille des granulats afin d'aboutir à une bonne compacité et à une meilleure distribution des fibres. Le positionnement local des fibres dépend du rapport entre la longueur des fibres et le diamètre des granulats (Figure 1.4).



**Figure 1.4 :** Effet de  $L/D_g$  sur la structure interne d'une matrice [27].

Pour que les fibres agissent efficacement au niveau des fissures inter-granulaires et interviennent à l'échelle d'une structure, il est impératif que la longueur de la fibre soit plus grande au diamètre du plus gros granulat ; un rapport de deux étant préconisé dans la littérature [27].

### 1.6.2. Malaxage

Il faut apporter une grande attention à la méthode de malaxage et donc à la séquence d'introduction des différents composants de façon à assurer une distribution homogène des fibres dans le mélange frais. Un temps minimum est recommandé pour assurer l'homogénéité du mélange. Paillere [28] préconise de rajouter les fibres après avoir malaxé les matériaux avec 1/3 du volume d'eau.

Il a été recommandé plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées et les matériaux recherchés [4, 29]:

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

L'ajout des fibres s'effectue à la main au laboratoire pour des petites proportions, en revanche pour les grandes quantités, un matériel spécifique s'impose, nécessitant donc quelques minutes supplémentaires d'homogénéisation. Toutefois, on peut rencontrer quelques difficultés comme :

- ✓ Agglomération ou formation de pelotes de fibres (oursins), lorsque les fibres sont introduites sans précaution particulière ou temps de malaxage trop long ou un dosage excessif de fibres,
- ✓ Distribution hétérogène (temps de malaxage trop court).

En général, l'ajout des fibres se fait lorsque le malaxage du béton est terminé. Il faut donc prolonger de quelques instants le malaxage pour permettre la distribution des fibres dans le mélange.

### *1.6.3. Mise en œuvre*

Le déversement du béton doit s'effectuer de telle sorte que le moule ou le coffrage se remplisse aisément. Toute vibration doit faire l'objet d'une étude attentive. Sauf cas exceptionnel, 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 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 :

- Les 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.

#### *1.6.4. Ouvrabilité*

L'ouvrabilité d'un béton de fibres est un paramètre qui dépend essentiellement de :

- ✓ la granulométrie du squelette granulaire (dimension, pourcentage et la géométrie des granulats),
- ✓ la géométrie et l'état de surface des fibres,
- ✓ le pourcentage en volume des fibres dans la matrice,
- ✓ la durée de malaxage.

D'après Hugues et al. [30], la fluidité diminue avec l'augmentation de :

- ✓ l'élancement (longueur de la fibre/diamètre de la fibre),
- ✓ le diamètre  $d_{\max}$  du plus gros granulat,
- ✓ le pourcentage en volume des fibres.

##### *1.6.4.1. Taille et rugosité des granulats*

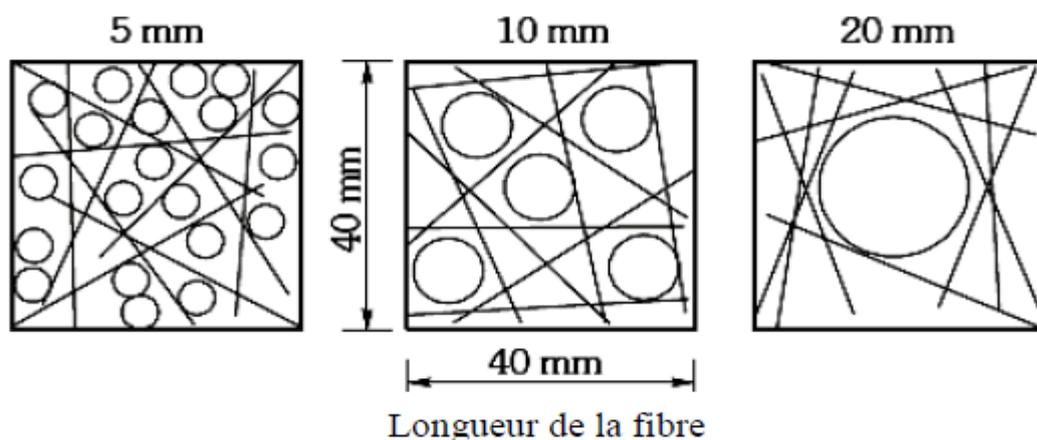
Le problème est plus compliqué quand les fibres sont introduites dans un béton au lieu d'un mortier. Dans un mortier, les fibres sont séparées par un matériau granuleux fin qui peut se déplacer facilement entre elles, mais dans le cas d'un béton, elles sont séparées

par des particules qui seront d'une plus grande taille que l'espacement moyen des fibres 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 [31]. 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 [32] (voir figure 1.5), avec des proportions supérieures de 2 à 4 fois.

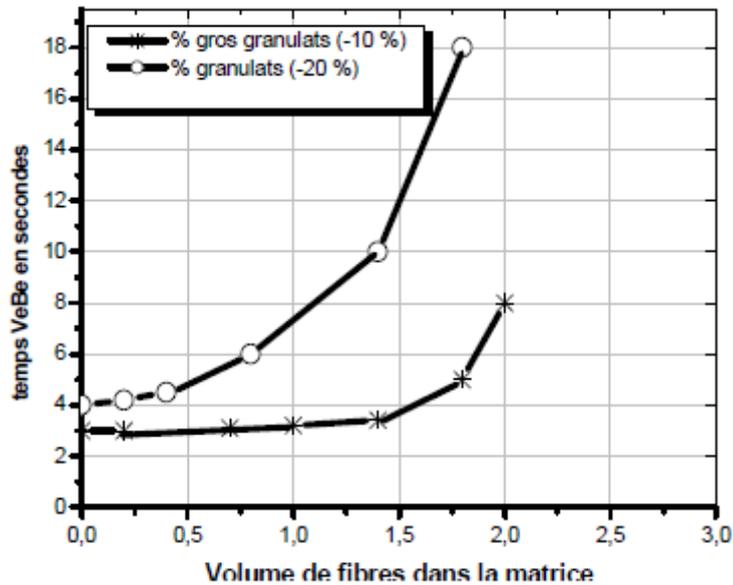
Ce principe est démontré dans la figure 1.5, qui montre nettement qu'il est difficile de réaliser une dispersion uniforme de fibres, une fois que la dimension d'agrégat augmente de 5 mm à 10 mm à 20 mm. Cependant, ceci est une image simplifiée parce que, en réalité, la dispersion des fibres et des agrégats est tridimensionnelle. Il peut y avoir jusqu'à 200 fibres en n'importe quel cube donné de mortier, de longueur latérale égale à la fibre avant que l'interaction devienne excessive. Néanmoins, il est clair (Figure 1.5) 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 [33].



**Figure 1.5 :** 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 [32].

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 1.6, 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 importances.



**Figure 1.6 :** Temps de vibration Vé-Bé en fonction de la teneur volumique ( $V_f$ ) fibres d'acier [34].

#### 1.6.4.2. Longueur et le rapport $l/d$ de fibre

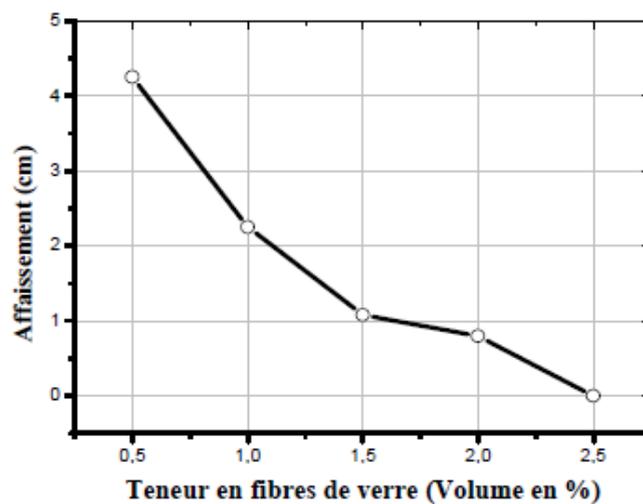
L'élançement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques). Des études expérimentales réalisées par plusieurs chercheurs [34, 35, 36, 37], ont montré que le rapport  $l/d$  de fibre joue un rôle principal dans la maniabilité.

Rossi [37] explique ceci par deux constatations, 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. Cette constatation est valable pour d'autres types de fibres telles que les fibres de verre et les fibres de carbone.

#### 1.6.4.3. Teneur en fibres

Le taux de fibre incorporé a une influence directe sur les propriétés de béton à l'état frais et durci. En effet les travaux menés par Abdul Ghaffar et al. [38] ont montré que

l'ouvrabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres métalliques. Autres résultats obtenus par Majumdar et al. [39], 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'élanement de la fibre, ainsi qu'avec l'augmentation de la proportion volumique des fibres incorporées. D'autre part, Marsh et al. [40], 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 1.7.

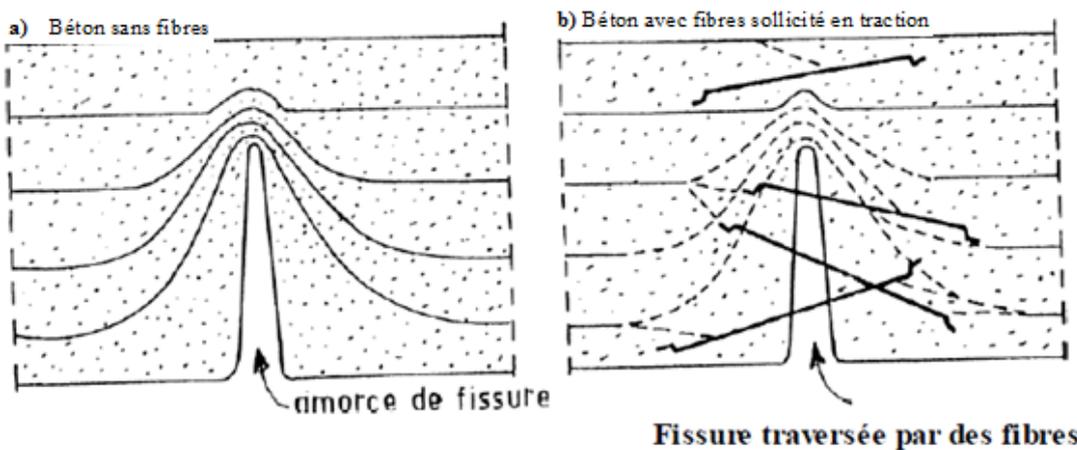


**Figure 1.7 :** Effet de la teneur en fibres de verre sur l'ouvrabilité [40].

### 1.7. Rôles des fibres dans le béton

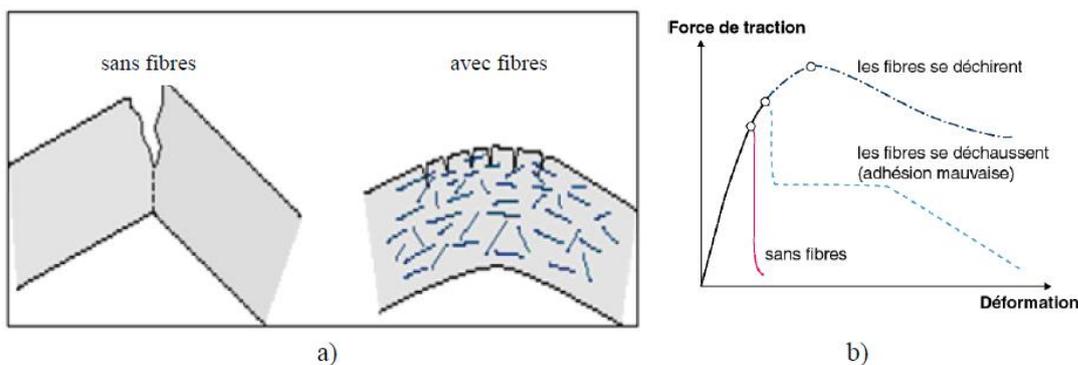
Le rôle principal des fibres est de mieux contrôler la fissuration du béton en état de service en limitant l'ouverture des fissures et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile. Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes telles que le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge, ...etc. Lorsqu'un béton fissuré est soumis à une traction, les lignes de tension s'infléchissent (Figure 1.8a) et les tensions aux extrémités de la fissure augmentent [41]. Cette inflexion est due au fait que la charge ne peut pas être transmise par la fissure. Pour un béton sans fibres sollicité en traction, sa faible résistance à la traction est vite atteinte, voire dépassée.

Une fissure apparaît alors et se propage librement conduisant ainsi à une rupture fragile. Dans le cas d'un béton avec fibres, sollicité en traction, une partie de l'effort est reprise par les fibres pontant les fissures (Figure 1.8b) ; cela empêche la rupture fragile du matériau car la propagation des fissures nécessiterait une plus grande énergie. En effet, comme la longueur maximale d'une microfissure est de l'ordre de la dimension du plus gros granulats [42] et la longueur moyenne d'une fibre est plus grande que la dimension du granulats, chaque microfissure se propageant dans la matrice peut être pontée par une ou plusieurs fibres. Ainsi, les microfissures ne peuvent s'agrandir que par l'allongement élastique ou plastique des fibres, l'effritement de la matrice au voisinage de la fibre, le glissement des fibres ou la rupture des fibres. Ces fibres sollicitées à la traction et au cisaillement absorbent une partie de l'énergie nécessaire à la propagation des fissures et évitent une propagation incontrôlée de la fissuration du béton. Il faudrait alors davantage d'énergie donc d'effort pour propager cette fissuration. L'efficacité des fibres est d'autant plus grande que la quantité de fibre est importante et leur longueur d'ancrage est grande.



**Figure 1.8 :** Rôle des fibres dans la matrice de béton[43].

Donc, l'incorporation des fibres dans le béton permet aussi de passer d'un comportement fragile à un comportement ductile, (Figure 1.9).



**Figure 1.9 :** Illustration de l'apport du renfort par des fibres[43].

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.

### *1.8. 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 et les silos. En préfabrication, les poutrelles, les voussoirs, les canalisations et les tuyaux soumis notamment à une forte abrasion. En béton projeté, où on utilise généralement des fibres courtes, pour la réfection des tunnels, galeries et talus de protection des berges [44].

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

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton ;
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post-fissuration (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.

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 ce qui provoque la difficulté de mise en place.
- Actuellement le prix des fibres est relativement très élevé et de ce fait le prix de revient du mètre cube de béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.

### *1.9. 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 traction 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 les fonderies, les 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 que celui utilisé pour la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton ordinaire.

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 réfection, 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 [8].

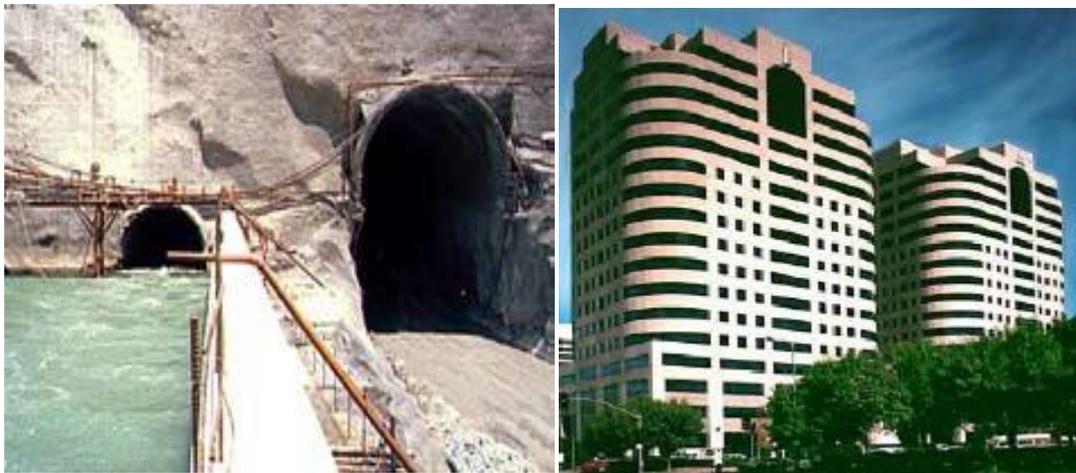
La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. Partant de leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et 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 1.3 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 1.3 : Applications des bétons renforcés de fibres [45].**

APPLICATIONS	INTERETS APPORTES PAR L'AJOUT DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	- 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	- 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 ...)	- Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Energie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements Routiers, tabliers de ponts	- 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	- Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
- Stabilisation des parois rocheuses, les talus, les tunnels, les galeries souterrains	- 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	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement



a) Réparation et réhabilitation Stabilisation de talus



b) Galerie à eau Constructions



c) Tunnels routiers Applications spéciales

**Figure 1.10 :** Autres utilisations du béton de fibres[46].

### **1.10. Conclusion**

La composition du béton de fibres est différente de celle du béton armé. L'ouvrabilité et l'homogénéité du béton de fibres dépendent de trois facteurs principaux qui sont la géométrie des fibres, la granulométrie de la matrice et l'ouverture des fissures inter granulaires et pour que les granulats soient bien encadrés par les fibres il est nécessaire d'avoir une matrice riche en éléments fins et le volume de fibres dans le composite. La teneur maximale en fibres est, quant à elle, limitée par le pourcentage de gros granulats car les fibres doivent être bien enrobées.

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 :

*Propriétés du béton de fibres  
et  
Notion générale sur l'effet d'échelle*

## 2.1. Introduction

Le principe de l'utilisation des fibres métalliques pour renforcer le béton est très différent du renforcement par des armatures traditionnelles. Dans le béton armé, l'acier travaille souvent sous sa contrainte maximale admissible ; ceci est possible lorsque l'armature est suffisamment ancrée. Mais dans le béton armé de fibres lisse et droites (dans la plupart des cas) ; généralement, seule une petite longueur d'ancrage est disponible. Cela signifie que les propriétés mécaniques du béton fibré dépendent généralement de la qualité des fibres, de la qualité de la matrice et de l'adhérence entre elles. La résistance du béton fabriqué à partir d'une matrice contenant des fibres courtes est principalement contrôlée par la liaison inter-faciale, la qualité des fibres et d'autres paramètres [27, 33, 38].

## 2.2. Comportement mécanique du béton de fibres

Le comportement du béton renforcé de fibres est influencé par plusieurs paramètres qui affectent son ouvrabilité et son comportement mécanique, pour cette raison on peut conclure qu'il est très difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton. Les principaux paramètres qui ont un effet sur le comportement de béton sont les suivants :

- Nature des fibres (métallique, synthétique ...).
- Distribution des fibres et leur orientation.
- Forme de la fibre (ondulée, droite, plate ...).
- Longueur de la fibre  $L_f$  et l'élanement  $L_f/D_f$ .
- Dosage de fibres dans la matrice de béton.

### 2.2.1. Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques

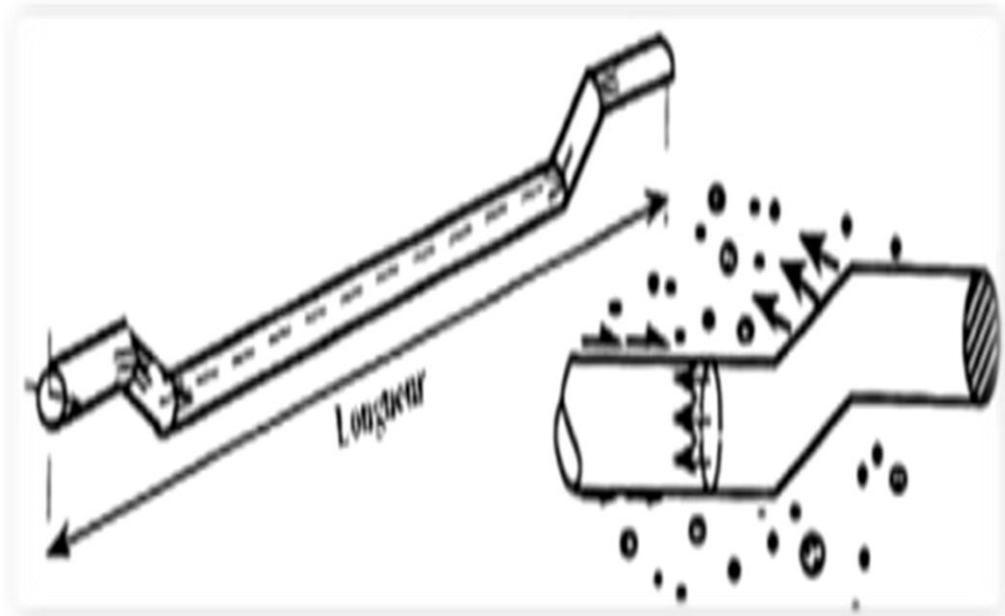
Les fibres ont des propriétés géométriques et mécaniques qui varient en fonction de leurs natures. Chaque type de fibre aura un impact particulier sur le comportement mécanique du béton, qui peut être transformé en applications spécifiques. Par conséquent, le choix du type de fibre dépend du domaine d'utilisation et des propriétés désirées [47, 48, 49].

La ductilité dépend principalement du volume, de l'orientation et du type de fibre. Certains chercheurs ont montré que les fibres déformées à leurs extrémités sont plus efficaces que celles déformées sur toute leur longueur. Cependant, les fibres à crochets présentent le plus grand avantage en raison de leur bonne adhérence mécanique. Les

fibres de crochet sont très efficaces et ont une meilleure ductilité. Le crochet forme progressivement un ancrage puis dissipe l'énergie par sa plastification et son frottement à l'interface avec le substrat [50, 51]. En conséquence, le crochet se déforme et fait glisser la fibre dans la matrice (Figure 2.1).

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.

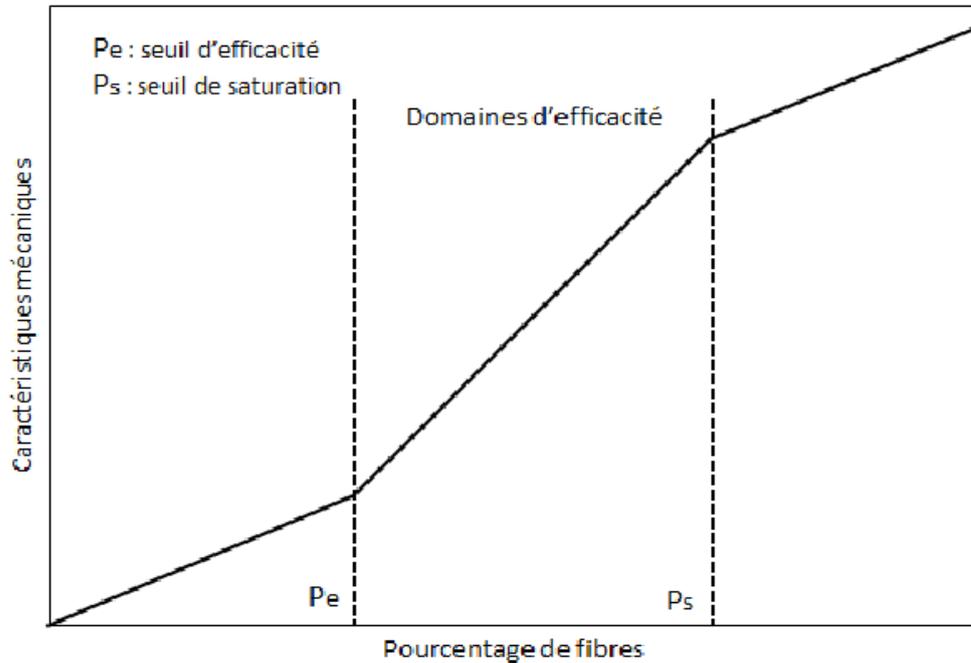


**Figure 2.1** : Déformation du crochet et glissement de la fibre [43].

### 2.2.2. Influence du pourcentage des fibres

L'augmentation du pourcentage de fibres dans le béton augmente son efficacité dans le comportement à l'échelle du matériau ou à l'échelle de la structure. Que ce soit de fibres courtes ou longues, la figure 2.2 présente l'évolution d'une propriété mécanique du BFM en fonction du pourcentage de fibres. Il est évident que le choix de la fibre est lié aux propriétés mécaniques à améliorer. Par exemple, les fibres courtes peuvent améliorer la résistance (traction, compression ...) et les fibres longues peuvent améliorer le comportement post-fissuration du béton de fibres. Que ce soit le seuil de validité ( $P_e$ ),

Ou seuil de saturation ( $P_s$ ), selon le type et la taille de la fibre, les fibres sont manipulées par ancrage le long des fibres ou concentrées à leurs extrémités ou par orientation des fibres adhérentes [52]. Le pourcentage de fibre optimal du point de vue technico-économique se trouve dans l'intervalle ( $P_e$ ,  $P_s$ ) cet intervalle appelé ; domaine d'efficacité d'un BFM [37].

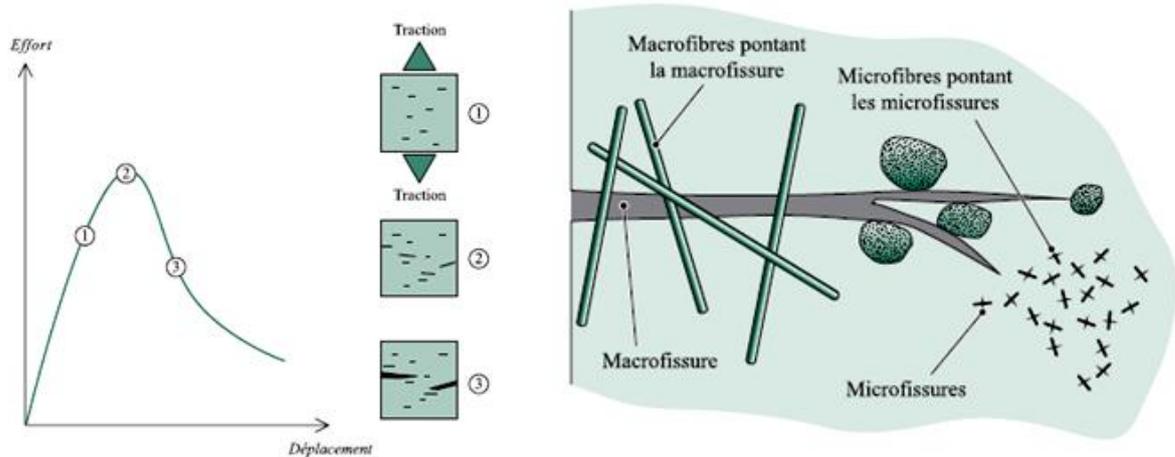


**Figure 2.2 :** Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un BFM en fonction du pourcentage de fibre [37].

### 2.2.3. Influence de la longueur de fibres

Les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Lorsque la charge augmente, l'ouverture de la fissure augmente également.

Cela provoque l'arrachement des fibres courtes, tandis que les fibres longues continuent de transférer la contrainte à travers les fissures, ce qui contribue à augmenter la résistance résiduelle après fissuration [37, 43, 53]. Par conséquent, les fibres longues ont généralement pour effet d'améliorer la ductilité (Figure 2.3) [43].



**Figure 2.3 :** Rôle des fibres dans le processus de fissuration du béton [43].

#### 2.2.4. Influence de l'adhérence fibres matrice

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 [49], 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).

#### 2.2.5. Effet de l'orientation sur les caractéristiques mécaniques

L'orientation préférentielle des fibres est principalement causée par la mise en place du béton dans le moule ou le coffrage. Lors du processus de coulage, les fibres sont orientées selon l'axe de l'écoulement puis parallèlement aux parois. Par conséquent, cette orientation préférentielle (effet de paroi) se produit inévitablement à proximité de la paroi. Le béton considéré doit être étudié pour la mise en œuvre et le compactage en fonction de l'ouvrabilité, qui est généralement différente du béton ordinaire sans fibres.

L'orientation et la dispersion des fibres sont fortement 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).

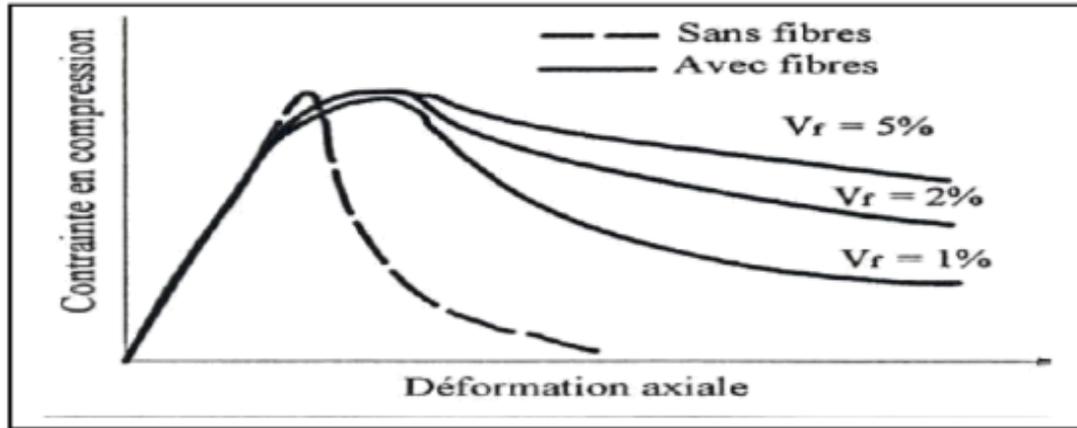
Donc l'orientation des fibres au cœur du béton joue un rôle important dans la résistance à la traction. En effet, le gain de résistance apporté par les fibres au travers d'une fissure varie en fonction de l'angle d'incidence. Une fibre perpendiculaire au plan de la fissure aura une efficacité maximale. 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 [49, 54].

## *2.3. Effet sur les caractéristiques mécaniques du béton*

### *2.3.1. Comportement en compression*

Les différents chercheurs sont d'accord pour dire que la fibre n'apporte aucune amélioration significative de la compression. Dans certains cas, la contrainte ultime augmentera légèrement, tandis que dans d'autres cas, elle diminuera légèrement. Dans la matrice, les fibres peuvent avoir deux fonctions contradictoires ; la première est de maintenir les fissures, ce qui est favorable à la phase post-pic, la seconde est de produire d'autres défauts à l'interface fibre-béton, ce qui peut provoquer des dommages limitant ainsi la charge maximale.

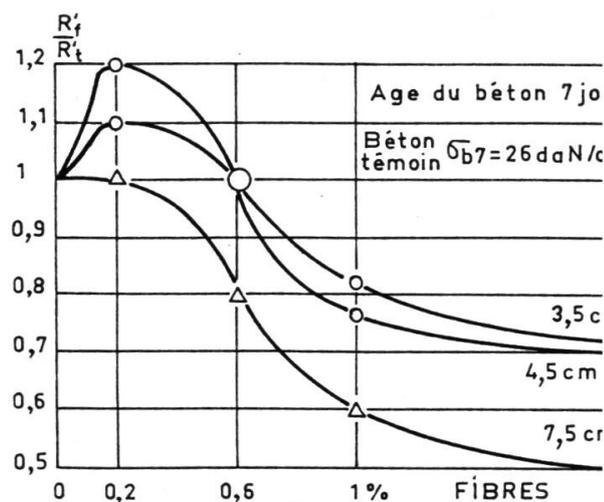
Sur la base de l'expérience, plusieurs chercheurs [54, 55, 56, 57, 58] montrent que plus la teneur en fibres est élevée, plus la dispersion de la partie descendante de la courbe contrainte-déformation est grande. La figure 2.4 montre la résistance et la ténacité du béton renforcé de fibres.



**Figure 2.4 :** Influence du dosage en fibres lors d'un essai de compression [55].

Dans les travaux de Song et Hwang [56], l'utilisation de la fraction de fibre en volume de 1,5% a entraîné une amélioration de 15,3% de la résistance à la compression. L'augmentation de la résistance à la compression peut être expliquée par la forme et l'orientation des fibres, ainsi qu'une bonne adhérence ou liaison de fibre avec la matrice ; ce qui a été confirmé par d'autres résultats [57, 58].

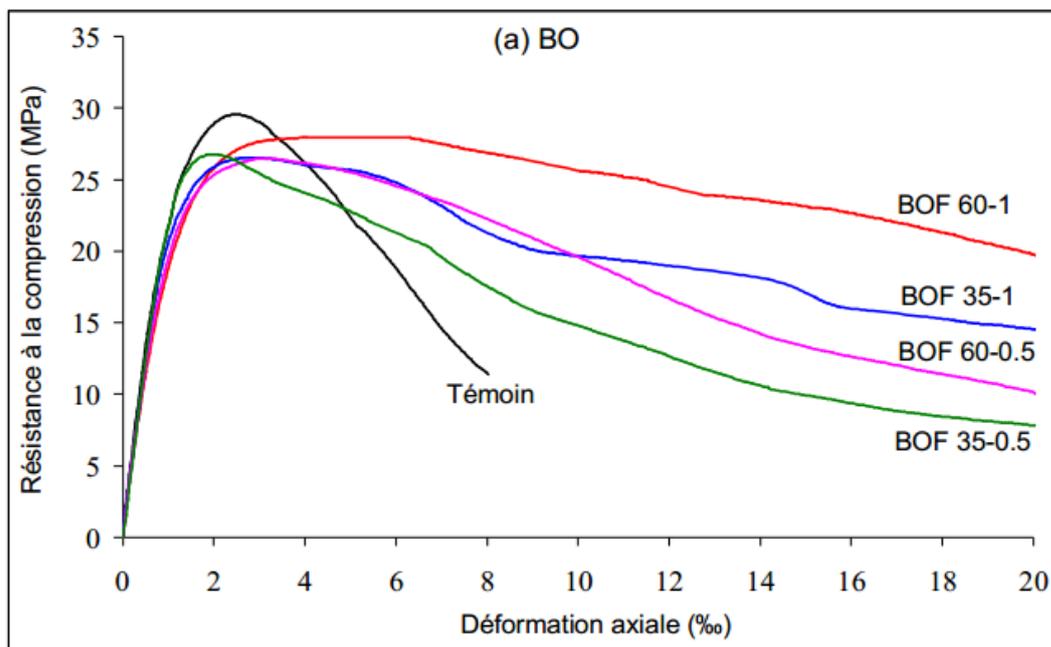
En revanche, Les résultats des travaux de Dardar [59] présentés sur la figure 2.5 montrent que la résistance peut être diminuée par l'addition de fibres dans le béton. A partir d'un volume de fibre de 0.5 %, pour les fibres de polypropylène, la résistance à la compression diminue et les fibres les plus 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 2.5 :** Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres [59].

D'autres part, certains résultats [37, 60] montrent que la résistance à la compression de béton renforcé de fibres métalliques est inférieure à celle de béton 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.

Boulekbache[8], a observé dans ses travaux que le béton avec une teneur en fibre de 1% présente un comportement mécanique très amélioré par rapport au matériau avec 0,5 % de fibre, ainsi que la présence de fibres réduit légèrement la résistance à la compression par rapport au béton témoin, voir Figure 2.6.



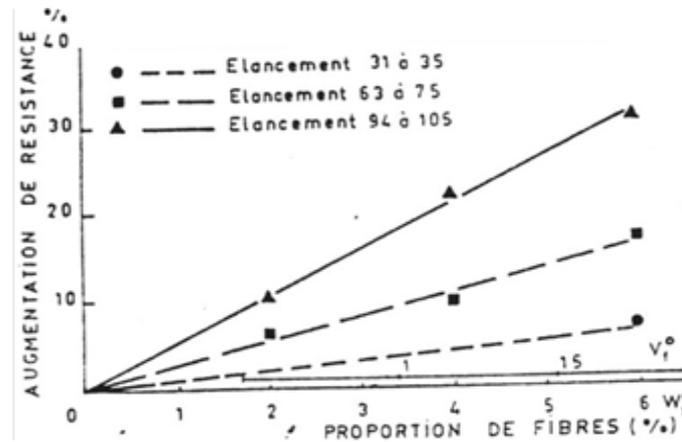
**BOX**  $l-f$  :  $X=T$  : béton ordinaire témoin,  $X=F$  : béton fibré,  $l$  : longueur des fibres,  $f$  : dosage en fibre.

**Figure 2.6 :** Influence de la teneur et la longueur de fibres métalliques sur le comportement en compression d'un béton fibré [8].

### 2.3.2. Comportement en traction

Selon la littérature, l'augmentation de la résistance à la traction due aux fibres est variable. Lorsque la résistance des fibres est faible, elle devient plus faible ou nulle, tout comme la fibre de polypropylène. Il est recommandé qu'après une série d'études, si la teneur en fibres est inférieure à 2% (volume), le rôle de la fibre dans la traction puisse être ignoré[59].

Les résultats fournis par Johnston et Coleman [61] montrent que la résistance du béton fibreux augmente la résistance à la traction directe du béton non fibreux de 5% à 30%. Cette augmentation est fonction de la teneur en fibres et de leur élançement, comme le montre la figure 2.7.



**Figure 2.7 :** Augmentation de la résistance de traction d'un mortier fibré en fonction de l'élançement des fibres [61].

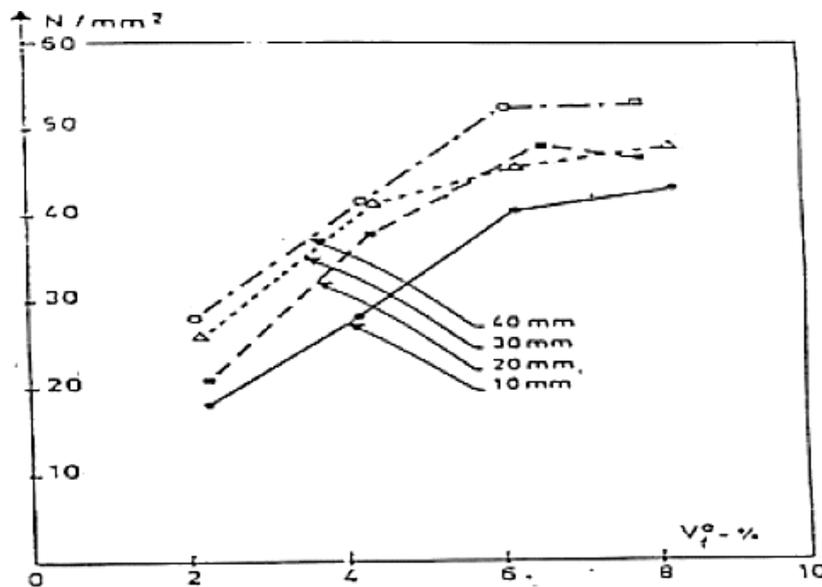
Généralement, la résistance à la traction du béton renforcé de fibres augmente avec l'augmentation de la longueur et du volume de la fibre placée, qui dépend de l'orientation de la fibre par rapport au sens de la force, et est affectée par la taille des particules de la matrice. Il est observé que le module d'élasticité reste en fait le même et que la courbe contrainte-déformation montre une certaine ductilité du matériau au-delà de la contrainte ultime. La loi de comportement est une loi locale applicable à la zone fissurée d'une éprouvette en traction [62].

### 2.3.3. Comportement en flexion

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post fissuration. L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue en utilisant des fibres pour augmenter la résistance résiduelle. Cette propriété est également fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de rappeler que la répartition uniforme des fibres dans le mélange est une condition nécessaire pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré.

Une étude étendue de la majorité de données disponibles a été faite par Johnston [33] où il a trouvé une relation fondamentalement linéaire entre la résistance à la flexion

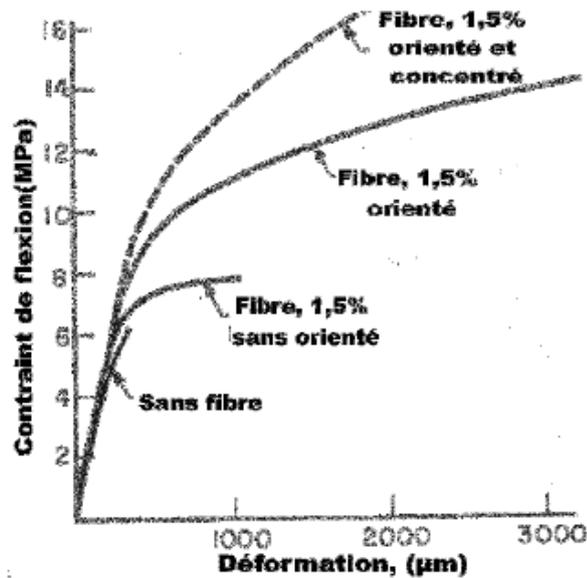
et le dosage en fibre ( $V$ ) et de leur élancement ( $l/d$ ). De même avec des fibres de verre, Majumdar et al. [39] ont trouvé des résultats intéressants comme indiqué sur la figure 2.8.



**Figure 2.8:** Résistance à la flexion du ciment avec fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres [39].

Les travaux réalisés par Serna Ros [50] montraient 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. De même, il a été observé une résistance de rupture 3 fois plus élevée pour les prismes avec 2% en volume de fibres par rapport à ceux avec 0,5% en volume de fibres [63].

Houari [64] 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 testées. Il conclut dans ses 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 rupture. 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, mais aussi aux orientations plus favorables des fibres longues. La figure 2.9 illustre les résultats trouvés par Edgington [65], où l'effet de l'orientation des fibres est important sur la résistance à la flexion de béton de fibres.



**Figure 2.9 :** Effet de l'orientation des fibres sur le comportement du béton de fibres en Flexion [65].

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.

#### 2.3.4. Déformabilité (courbe charge-flèche)

Sur un essai de flexion trois points mené jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette, la courbe charge-flèche peut être obtenue 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 2.10, 2.11 et 2.12 illustrent trois exemples de courbes effort-déformation en compression, traction et flexion [66]. 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.

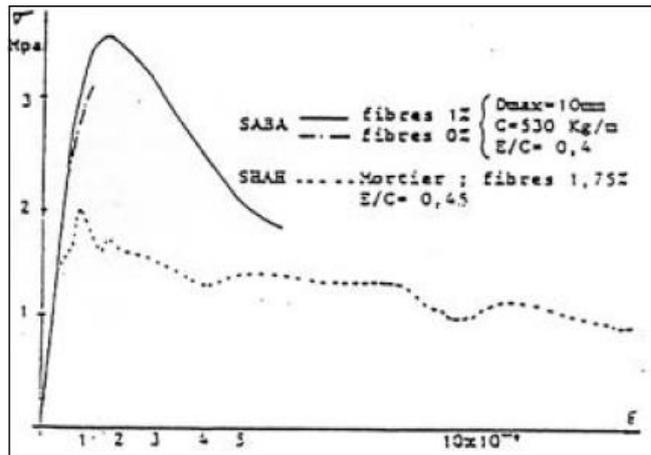


Figure 2.10 : Courbe effort- déformation en compression[66].

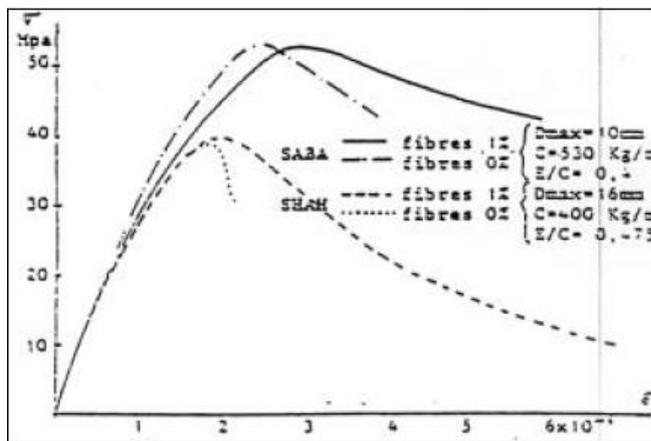


Figure 2.11 : Courbes effort- déformation en traction [66].

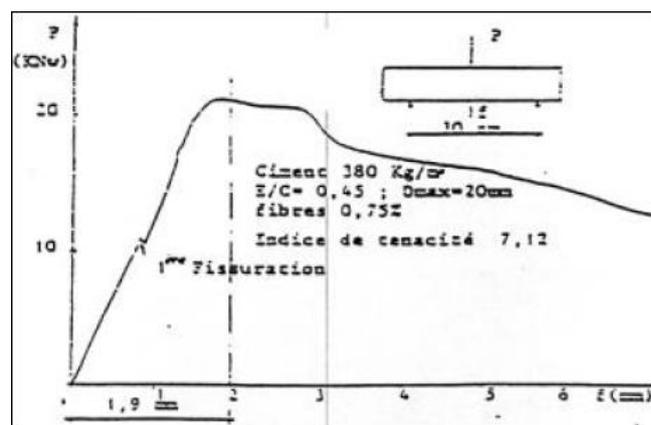
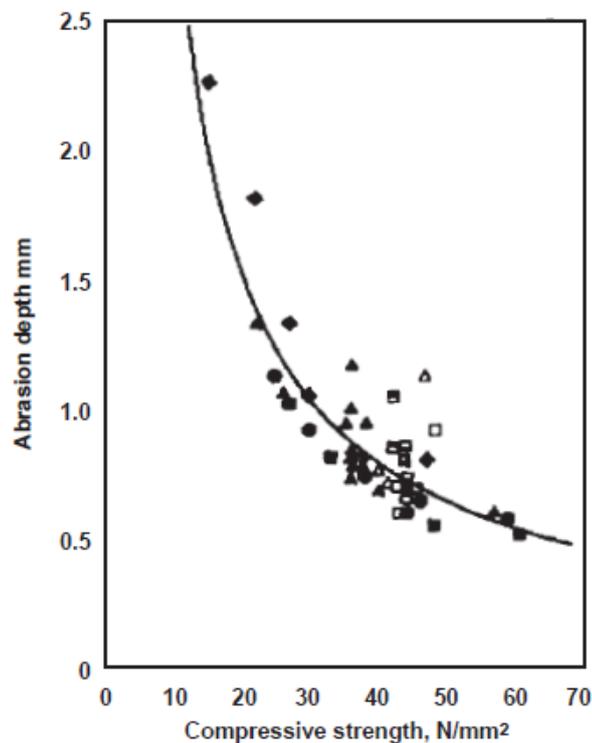


Figure 2.12 : Courbe charge –flèche en flexion [66].

### 2.3.5. Résistance à l'abrasion

Le béton est utilisé pour construire des structures de génie civil, qui peuvent être affectées par le frottement mécanique lorsque le béton entre en contact avec de l'eau. La résistance à l'abrasion est un facteur clé de la conception technique. L'usure de surface causée par l'abrasion et l'érosion contribue à la réduction de la durabilité du béton [67]. L'abrasion due au trafic affecte particulièrement les sols industriels, les trottoirs et les chaussées [68]. L'ajout de fibre métallique au béton augmente la résistance à l'abrasion, qui est directement influencée par la résistance à la compression du matériau [69]. Les échantillons en béton renforcé de fibres avec des teneurs volumétriques de 0,5% et 1% peuvent réduire l'usure mécanique de 2% à 9%, respectivement [70]. Le béton renforcé en fibres métalliques se distingue par sa capacité à absorber et dissiper l'énergie, réduire l'initiation et la propagation de fissures, d'augmenter la durabilité du béton soumis à l'abrasion et à ralentir la dégradation du matériau. La résistance à l'abrasion est liée à la résistance à la compression comme indiquée sur la figure 2.13.



**Figure 2.13:** Relation entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression [71].

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, le développement des fissures sera accéléré et ces dernières deviennent préjudiciables. Dans le cas d'une 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 correspondent à une légère rectification) améliorer la résistance à l'abrasion. Tout 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.).

### ***2.3.6. 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 augmente avec le temps pour tendre après quelques années, vers une limite qui dépend de plusieurs facteurs, notamment les facteurs intrinsèquement liés aux composants du 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'une manière générale, le retrait des bétons renforcés de fibres est moins important que celui des bétons sans fibres. A cet effet, nombreux sont les chercheurs qui ont montré l'influence positive des fibres sur le phénomène de retrait. Alekrish et al. [72] rapportent que les études réalisées au cours des deux dernières décennies sur le retrait et les mesures de ce dernier pour les bétons fibreux ont montré que l'incorporation de fibres dans les mélanges de béton réduit le retrait de séchage. Selon Sounthararajan et al.[73], l'addition de fibres d'acier dans le béton a entraîné la réduction du retrait de séchage par rapport au béton ordinaire, et avec l'accroissement du pourcentage de fibres d'acier, une augmentation du pourcentage de la réduction du retrait de séchage a été remarquée. Aussi, Ahmad et al. [74] ont conclu que la teneur en fibres a une influence directe sur la réduction du retrait de séchage du béton, ainsi que sur le contrôle de la fissuration [75].

Abdou et Houari [76] dans leurs travaux sur deux natures des fibres conclurent 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. Chern et al. [77] observèrent que le retrait de dessiccation est légèrement inférieur pour les bétons fibrés par rapport au béton sans fibre. De même, d'autres résultats[78] montrèrent 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. Notion sur l'effet d'échelle*

L'existence de l'effet d'échelle dans la nature est connue et observée depuis longtemps. La littérature rapporte un grand nombre de travaux sur ce phénomène sous différentes conditions et différents matériaux. Les pionniers étaient Léonard de Vinci (1452-1519), Galileo Galilée (1564-1642) et George Luis Leclerc de Buffon (1707-1788) entre autres. Mais c'est seulement à partir du milieu du 20<sup>ème</sup> siècle que l'étude de l'effet d'échelle s'est renforcée, surtout après la publication de Weibull [79].

La notion d'effet d'échelle en mécanique caractérise la dépendance des performances des matériaux, notamment au voisinage de la rupture, aux différentes dimensions en passant d'une échelle à une autre [80]. Le problème d'effet d'échelle est plus complexe et plus aigüe pour le béton car c'est un matériau quasi-fragile dont le comportement à la rupture est fortement non linéaire.

### *2.4.1. Effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragile*

Les matériaux quasi-fragiles (bétons, roches, céramiques, etc.) sont des matériaux incapables de présenter des déformations plastiques. Ils cèdent selon une rupture qui est caractérisée par une zone d'élaboration et de la fissuration relativement importante, dans laquelle le matériau subit de l'endommagement distribué lié à un adoucissement sous la

forme de microfissurations, et de frottement de glissement. Autrement dit, la rupture de ces matériaux n'apparaît pas dès l'amorçage de la fissuration comme c'est le cas pour les matériaux fragiles [81]. Le matériau quasi-fragile qui a été l'objet des recherches intenses sur la plus longue durée est le béton. La rupture de ce matériau fortement hétérogène est un phénomène très complexe exhibant des effets d'échelle. En effet, au voisinage de la rupture, le comportement très différent de la matrice et des inclusions, résultant de leurs propriétés mécaniques différentes, est à l'origine de la naissance, la propagation et enfin la coalescence des microfissures pour former enfin des microfissures dont la croissance est souvent stable.

A l'échelle macroscopique, deux types d'effet d'échelle sont observés dans les matériaux quasi-fragiles de type béton ; l'effet de volume situé à l'échelle de l'éprouvette au laboratoire et l'effet d'échelle de structure situé à l'échelle de la structure.

#### 2.4.1.1. Effet d'échelle de volume

Cet effet d'échelle existe lors des observations expérimentales où la contrainte ultime moyenne observée diminue avec l'augmentation du volume d'échantillon ( $V$ ) soumis à une sollicitation homogène. Une expérience de compression simple sur des éprouvettes homothétiques de forme cylindriques (figure 2.14) a prouvé l'existence de cet effet proportionnel. De plus, les contraintes suivent la loi de puissance de volume [82].

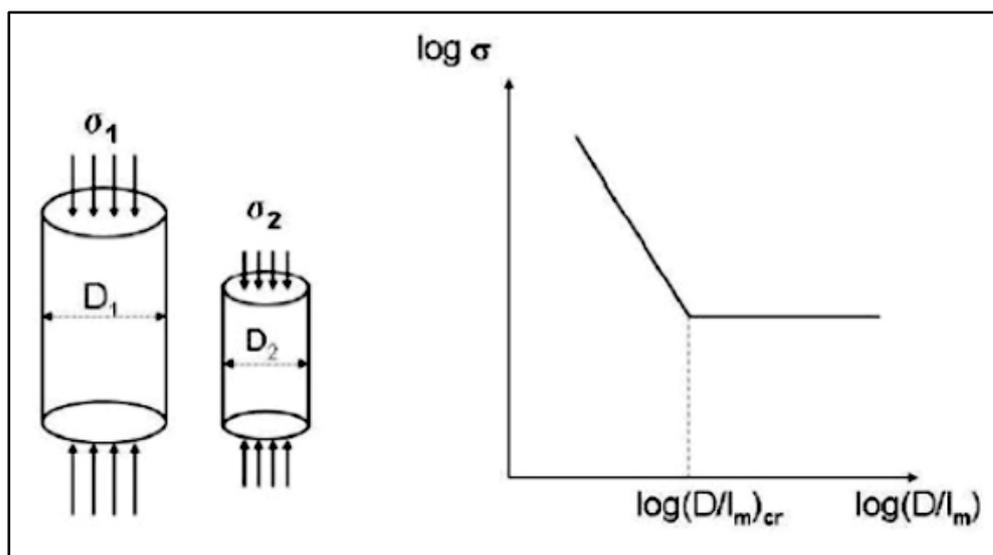


Figure 2.14 : Effet d'échelle de volume[82].

L'effet d'échelle de volume est souvent lié à l'existence des défauts dans les matériaux [80]. En effet, à cause de l'hétérogénéité du matériau, la résistance locale des éléments de matière n'est pas uniforme, mais suit une distribution aléatoire. Par conséquent, la probabilité de trouver des éléments de faible résistance croît avec la taille de l'éprouvette d'essai. De ce fait, la rupture apparaîtra plutôt quand la taille de l'éprouvette augmente. C'est en partant de ces constatations que les approches probabilistes de la rupture des matériaux de type Weibull [79] ont été développées.

#### 2.4.1.2. Effet d'échelle de structure

Cet effet d'échelle est dû au fait que les propriétés mécaniques de la structure réelle sont différentes de celles des échantillons testés en laboratoire. On observe alors que la contrainte de rupture diminue lors de l'augmentation de la taille de la structure. L'Hermite [83] en particulier, a bien mis en évidence ce phénomène à partir des travaux conduits sur des poutres non entaillées de dimensions homothétiques sollicitées en flexion 3 points. Les résultats obtenus, à partir d'un calcul élastique linéaire fragile, montrent une dépendance des contraintes à la rupture avec l'échelle de la structure. La contrainte de rupture en traction  $f_t$  dans ces expériences (Figure 2.15) est déterminée en supposant un matériau élastique fragile et en utilisant la théorie classique des poutres pour calculer le champ de contraintes dans l'éprouvette.

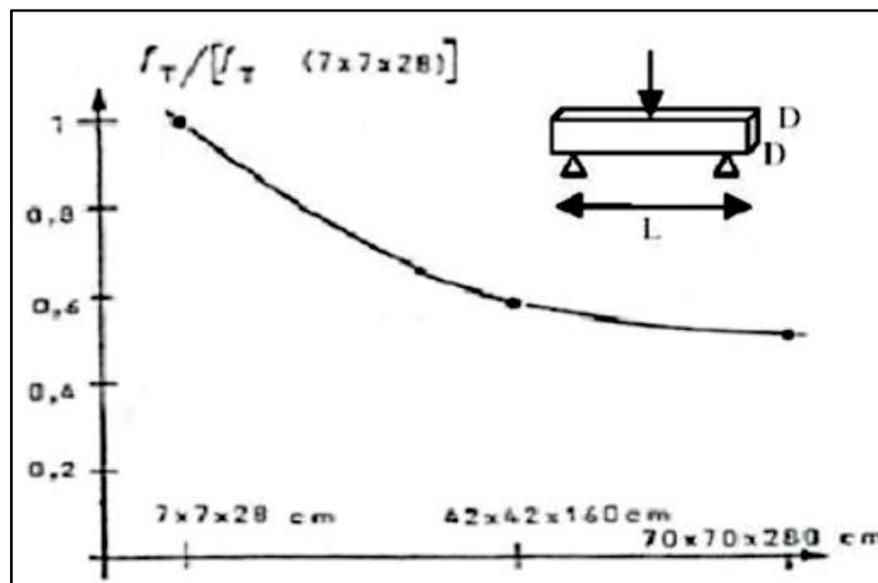


Figure 2.15 : L'effet d'échelle de structure d'après L'Hermite [83].

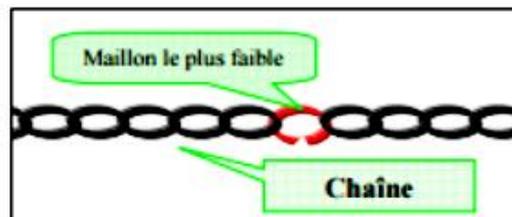
### 2.4.2. Différentes approches décrivant l'effet d'échelle

Historiquement, différentes approches ont été proposées pour expliquer et prédire les effets d'échelle. Le matériau quasi-fragile qui a fait l'objet des recherches les plus nombreuses durant la plus longue période est le béton. De part sa nature hétérogène, des théories de nature encore plus hétérogène ont été développées pour décrire cet effet d'échelle, on cite :

- La théorie statistique de la distribution aléatoire de la résistance locale.
- La théorie liée au caractère fractal des surfaces de rupture
- La théorie déterministe de Bazant, liée à une redistribution des contraintes et à un relâchement de l'énergie emmagasinée engendrée par une propagation stable des fissures larges.

#### 2.4.2.1 Théorie statistique de Weibull

Basant sur une étude de la rupture d'une chaîne composée de «n» maillons identiques et indépendants (Figure 2.16), Weibull [79] a proposé une théorie statistique de la résistance des matériaux en 1939. Ces informations statistiques reposent principalement sur l'hypothèse du «maillon le plus faible», il suffit qu'un seul maillon de la chaîne casse pour que l'ensemble de la chaîne casse.



**Figure 2.16 :** La rupture d'une chaîne constituée de « n » maillons [79].

Selon Bazant [84], la théorie de Weibull s'appuie sur deux hypothèses de base :

- La structure cède dès qu'un petit élément de matière atteint sa résistance limite.
- La résistance limite est aléatoire et la probabilité « P » pour qu'un petit élément de matière ne cède pas à une contrainte inférieure à  $\sigma$  est donnée par la distribution cumulée de Weibull suivante :

$$P(\sigma) = \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \quad \text{pour } (\sigma > \sigma_u) \quad (2.1)$$

$$P(\sigma) = 0 \text{ pour } (\sigma \leq \sigma_u) \quad (2.2)$$

D'où :  $m$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_u$  sont des constantes du matériau.

- $m$  est appelé module de Weibull, et est représentatif de la dispersion des contraintes de rupture et il est habituellement compris entre 5 et 50.
- $\sigma_0$  est un paramètre d'échelle.
- $\sigma_u$  est un seuil de contrainte qui est généralement égal à 0.

En se basant sur l'équation précédente, une généralisation tridimensionnelle du modèle du maillon le plus faible pour une chaîne avec des maillons de résistance aléatoire conduit à la distribution suivante :

$$p(\sigma_N) = 1 - \exp \left[ - \int_V C [\sigma(x), \sigma_N] \cdot dV_x \right] \quad (2.3)$$

Avec :

«  $p$  » représente la probabilité qu'une structure cède à une contrainte nominale  $\sigma_N$  dès que la fissuration macroscopique est amorcée à partir d'une microfissure (ou d'un défaut quelconque) quelque part dans la structure. Pour des structures géométriquement similaires en deux dimensions, la loi d'effet d'échelle de Weibull s'écrit :

$$\sigma_N = \sigma_0 \left( \frac{d_0}{D} \right)^{\frac{2}{m}} \quad (2.4)$$

- $\sigma$  est le champ de contrainte juste avant la ruine ;
- «  $x$  » est la fonction donnant la répartition spatiale de la probabilité de ruine au matériau.

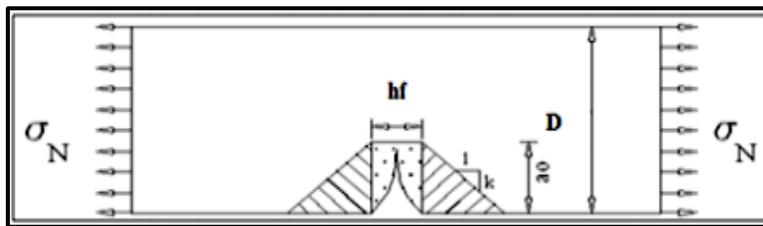
Ainsi plus le volume ( $V$ ) de l'éprouvette d'essai de la structure est grand, plus la probabilité de présence d'un défaut est importante et donc plus la résistance est petite : c'est l'explication probabiliste des effets d'échelle. Le travail de Weibull a complété le cadre de base de la théorie statistique de l'effet d'échelle. Selon Bazant [84], la plupart des études qui ont suivi le travail de Weibull jusqu'au 1980 s'intéressaient à des raffinements, des justifications et des applications de sa théorie. Il était alors généralement supposé que si un effet d'échelle était observé, il devait être nécessairement du type Weibull.

### 2.4.2.2 La théorie déterministe de Bazant

Pour expliquer l'effet d'échelle de la structure observée dans les matériaux quasi-fragiles, Bazant [84] s'est basé sur la mécanique non linéaire de la rupture. L'effet d'échelle est étudié sur la contrainte nominale. La contrainte nominale pour une charge est donnée par le calcul de la contrainte maximale dans une poutre de flexion trois points non entaillée par la théorie des poutres :

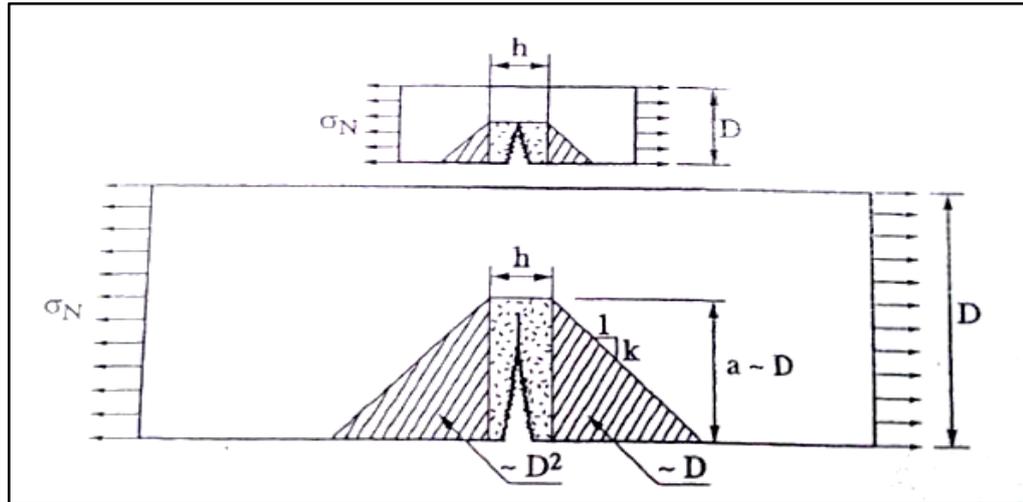
$$\sigma_N = \frac{3}{2} \frac{P \cdot S}{b \cdot D^2} \quad (2.5)$$

D'où : **D**, **S** et **b** sont respectivement la hauteur, la portée et l'épaisseur de la poutre. Afin d'identifier la loi de transition entre les deux comportements asymptotiques (grandes et petites échelles), Bazant a considéré dans son raisonnement une plaque rectangulaire qui est initialement dans un état de contrainte uniforme égale à la contrainte nominale  $\sigma_N$  (Figure 2.17).



**Figure 2.17** : Zone de relâchement des contraintes dans une éprouvette entaillée.

Bazant suppose que la rupture est précédée par la formation d'une bande de fissuration d'épaisseur  $hf$  dans la section centrale de la plaque. L'extension de cette bande d'une unité de longueur nécessite un certain taux d'énergie de fissuration  $G_F$ . La condition de conservation d'énergie consiste à écrire que l'énergie emmagasinée est égale à l'énergie nécessaire à la propagation de cette bande. Lorsque la bande de fissuration s'allonge de  $\Delta a$ , l'énergie additionnelle relâchée est causée par la partie densément hachurée. Ensuite, Bazant a considéré deux plaques homothétiques ayant des modes de rupture géométriquement similaires (Figure 2.18). Ainsi, plus la plaque est large, plus la bande de fissure est longue à la rupture. En conséquence, plus la plaque est large, plus l'aire de la zone fortement hachurée est grande.



**Figure 2.18** : Zone de relâchement dans les poutres de grandes et de petites tailles.

Alors, pour une même extension de la bande de fissuration, une quantité d'énergie plus importante est relâchée dans une structure de grande taille que dans une petite structure. Par conséquent, la petite structure aura une résistance plus grande, ce qui explique l'effet d'échelle de structure. En se basant sur ce raisonnement énergétique et moyennant un raccordement asymptotique. Bazant a abouti à une loi d'effet d'échelle très simple, mais qui est valable uniquement pour le cas des structures pré-fissurées ou renfermant une entaille initiale.

Cette loi s'écrit sous la forme suivante :

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad (2.6)$$

Avec :

- B est un paramètre dépendant de la géométrie de la structure ;
- $f_t$  est la résistance à la traction du béton ;
- D est la hauteur ou la longueur de l'éprouvette entaillée ;
- $D_0$  est une dimension caractéristique appelée « taille de transition ».

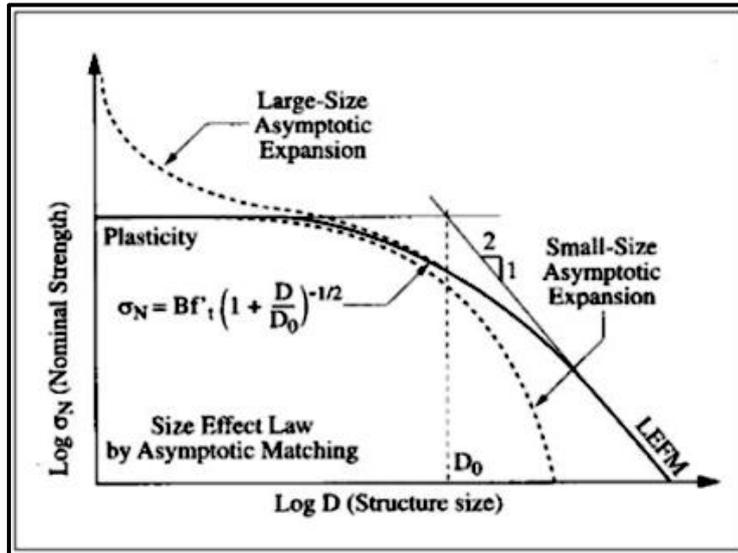


Figure 2.19 : Loi d'effet d'échelle proposée par Bazant pour des structures entaillées [85]

Cette loi d'effet d'échelle met en évidence l'existence de trois cas :

➤ Lorsque la structure est de petite taille c'est-à-dire a une dimension caractéristique  $D$  inférieure à  $D_0$  qui est la taille correspondante au point d'intersection entre les deux comportements asymptotiques, la contrainte nominale sera constante et égale à la contrainte maximale  $\sigma_{max} = Bf_t$ . Dans ce cas la zone de rupture occupera toute la structure donc l'effet d'échelle sera négligeable, c'est le cas de la plasticité.

➤ Lorsque  $D$  est supérieur à  $D_0$  ( $D \gg D_0$ ), la zone de processus de rupture sera petite par rapport à la taille de la structure, donc l'effet d'échelle dans ce cas sera géré par la mécanique linéaire élastique de la rupture.

➤ Et la loi de Bazant notée précédemment sera appliquée pour les structures de taille moyenne c'est-à-dire lorsque  $D$  s'approche de  $D_0$ .

Ensuite, Bazant [86] a proposé une loi « universelle » pour expliquer les effets d'échelle de structure dans les matériaux quasi-fragiles. En effet, sa loi s'applique pour des structures avec et sans entaille initiale :

$$\sigma_N = B f'_t \left[ 1 + \left( \frac{D}{D_0} \right)^r \right]^{-1/2r} \left[ 1 + s \frac{(2 l_f D_0)}{(2 \gamma l_f + L)(D + D_0)} \right]^{1/s} \quad (2.7)$$

Avec :

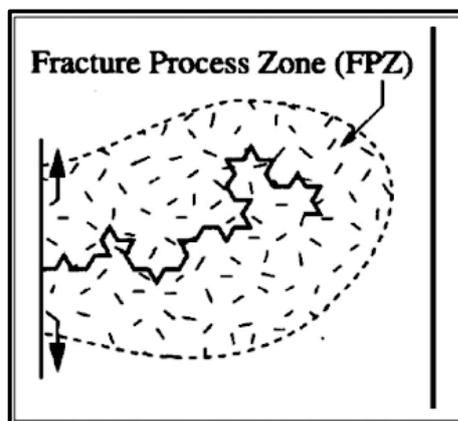
$l_f$  est une épaisseur critique dans laquelle se développe des microfissures pour une poutre non entaillée, tandis que pour une poutre entaillée ( $l_f = 0$ ) et on retrouve la loi précédente, et  $\gamma$  est une constante. Bazant a suggéré que les valeurs de ( $r = s = 1$ ) sont les plus appropriées pour caler les expériences.

Cette loi a été vérifiée pour un grand nombre de données expérimentales, pour différents matériaux (béton, mortier, roches, céramiques, etc.), pour des échantillons entaillés ou non, pour des géométries différentes (poutres, cylindres) et pour diverses sollicitations mécaniques (essais de flexion 3-points, essais de compression, essais de fendage).

Ainsi, la théorie déterministe proposée par Bazant pour expliquer et prédire les effets d'échelle de structure est considérée aujourd'hui comme la mieux adaptée au cas des matériaux quasi fragiles. Cependant, cette théorie ne tient pas compte de l'effet d'échelle de volume puisqu'elle suppose que pour des structures de petites tailles, un critère ultime de résistance est applicable.

#### 2.4.2.3 La théorie fractale des effets d'échelle

En 1989, Carpinterie [87] explique les effets d'échelle des structures par la présence des défauts créés par le chargement. Puis, en 1994 et en s'inspirant de nombreuses études réalisées sur les caractéristiques des fissures dans divers matériaux, il suggéra que le caractère fractale des surfaces de rupture joue un rôle significatif dans le processus de formation d'une nouvelle surface de rupture, et que la différence entre les caractéristiques fractales des fissures et des microfissures à différentes échelles d'observations est la source principale des effets d'échelle observés dans les matériaux quasi-fragiles de type béton [88] (Figure 2.20).



**Figure 2.20 :** Fissure fractale et sa zone d'élaboration d'après Carpinterie[88].

Cette théorie a été critiquée notamment par Bazant, qui s'est penché sur la question de l'aspect fractale des fissures, pour conclure à la fin que cette théorie ne peut pas expliquer les effets d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles.

## ***2.5. Conclusion***

À la lumière de cette synthèse bibliographique 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. Nous avons souligné l'importance du phénomène d'effet d'échelle en rappelant ses types et ses différentes théories de base. La suite de ce travail, sera orientée vers la quantification de l'apport de fibres métalliques sur certaines propriétés du béton.

Chapitre 03 :

*Matériaux et  
Protocole expérimental*

### 3.1. Introduction

Les propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons renforcés par les fibres métalliques dépendent principalement des propriétés et du volume de fibres, de la matrice ainsi que de la liaison inter-faciale fibre–matrice. Dans cette partie de ce travail, on présente les différents essais effectués avec l'introduction des fibres métalliques dans la formulation du béton. 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.

### 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 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 de calcaire. 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 cm<sup>2</sup>/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 <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PAF
	20.58	4.90	4.70	62.8	0.53	2.28	0.63	0.42	1.00
Composition minéralogique %	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> 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  $E_s = 90\%$ . 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.

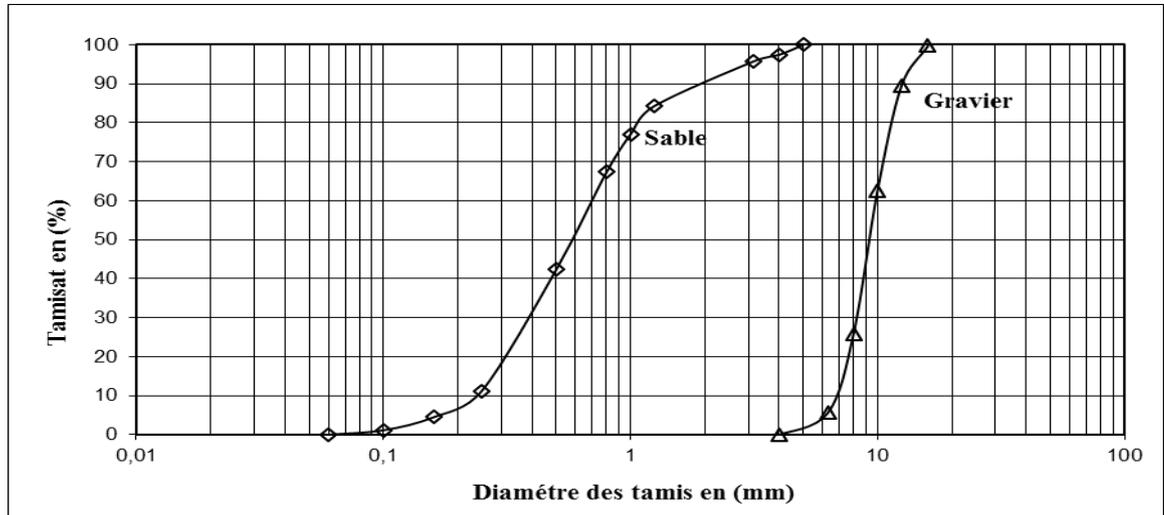


Figure 3.1: Analyse granulométrique du sable et du gravier.

### 3.2.3. Gravier

Le gravier utilisé est un gravier concassé de la carrière d'Oued Fodda de la région de Chlef (Algérie), illustrée 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 (Chlef).

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. Il est conçu à base de polycarboxylates 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.

**Tableau 3.3 :** Caractéristiques du 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. Fumée de silice

Les fumées de silice sont des poudres de silice extrêmement fines (inférieures à 1  $\mu$  m), issues de l'industrie du silicium et de ses alliages rendues utilisables par densification ou suspension dans l'eau. Le type de fumée de silice utilisée est une « S 95 DS » fabriquée par la société canadienne SKW, commercialisé par la société « SIKA». Le tableau 3.4 illustrent les caractéristiques de ce produit.

**Tableau 3.4 :** Données techniques de la fumée de silice « S 95 DS ».

Densité apparente	0,65 ±0,10
Densité réelle	2,24
Teneur en SiO <sub>2</sub>	95% (≥ 92%)
Teneur en Na <sub>2</sub> Oéq.	0,60% (≤ 1,0%)
Teneur en SiC	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en Clibre	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en Stotal	0,10% (≤ 0,20%)
Surface spécifique BET(m <sup>2</sup> /g)	23 (20 à 26)
Teneur en Oxydes (Fe, Al, Mg,Ca)	1,00% (≤ 1,50%)
Teneur en Cl <sup>-</sup>	0,06% (≤ 0,20%)

### 3.2.6. 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 (eau potable). La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est la valeur conventionnelle de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Cette eau est supposée potable et ne contient aucune impureté nuisible (matières organiques, alcalis...) conformément à la norme NF P 18-303 [89].

### 3.2.7. Fibres d'acier

Les fibres métalliques utilisées sont des fibres DRAMIX de type RC-48/50-BN, RC-60/50-BN et RC-80/50-BN. Ce sont des fibres à haute teneur en carbone. Elles sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé et comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux deux extrémités. Les fibres de type RC-80/50-BN sont encollées les unes aux autres en plaquette afin d'assurer leur répartition et se décollent facilement au cours du malaxage. La figure 3.3 illustre les trois fibres utilisées dans cette étude et le tableau 3.5 récapitule leurs caractéristiques.



**Figure 3.3 :** Fibres métalliques de type DRAMIX utilisées.

**Tableau 3.5 :** Caractéristiques des fibres utilisées.

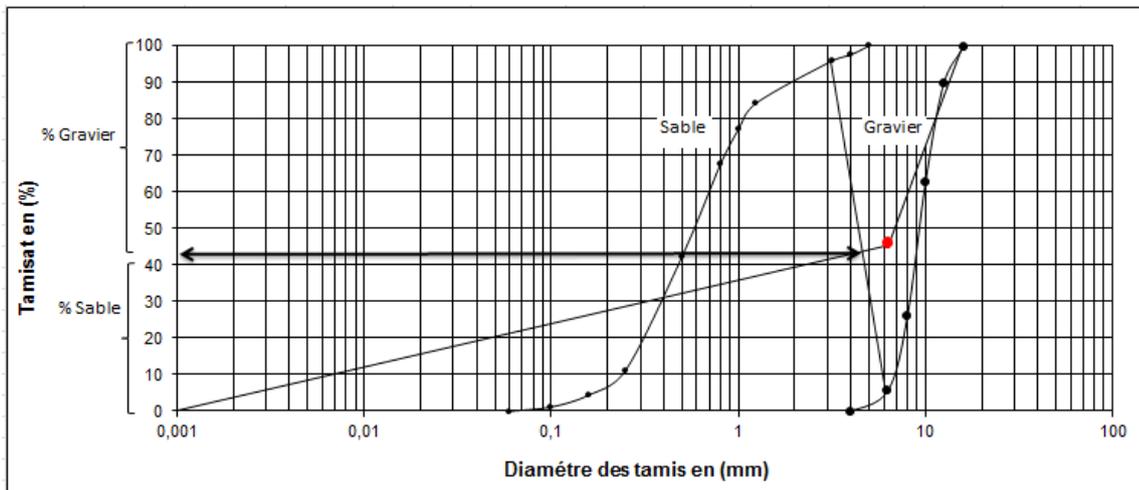
Type	RC-48/50-BN	RC-60/50-BN	RC-80/50-BN
Forme			
Longueur	50 mm	50 mm	50 mm
Diamètre	1,05 mm	0,75	0,62
Elancement	48	60	80
Nombre de fibres	2800 fibres/kg	5700 fibres/kg	8168 fibres/kg
Résistance en traction	1000 MPa (sur fil)	1900MPa (sur fil)	1100 MPa (sur fil)

### 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 telles que la bonne étanchéité, la bonne résistance mécanique, le faible retrait, la bonne durabilité etc.

Dans le présent travail, la formulation de béton est réalisée par la méthode de Dreux-Gorisse [44] dont la détermination des fractions des granulats est présentée sur la figure 3.6. 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 utilisés. Le tableau 3.4 récapitule la composition des quatre bétons testés.



**Figure 3.4 :** Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

**Tableau 3.6 :** Composition massique en  $\text{kg/m}^3$  du mélange béton.

Béton	Sable	Gravier	Ciment	E/C	Adjuvant (%)	Fumée de silice(%)	Fibres	Affaissement (mm)
BO	660	1124	400	0.4	1.3	8	0	196
BFM (0.5%)	660	1111	400	0.4	1.8	8	39	192
BFM (1%)	660	1098	400	0.4	2.5	8	78	188
BFM (1.5%)	660	1085	400	0.4	2.9	8	117	185

### 3.4. Mode de fabrication du béton

#### 3.4.1. Malaxage du béton

Après pesage de tous les constituants de notre béton à l'aide d'une balance électronique de 0.1 g de précision, la fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe incliné de capacité 20 litres. La fabrication des éprouvettes nécessite pour chaque type de béton une seule gâchée.

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 :

a) Pour les bétons sans renfort de fibres :

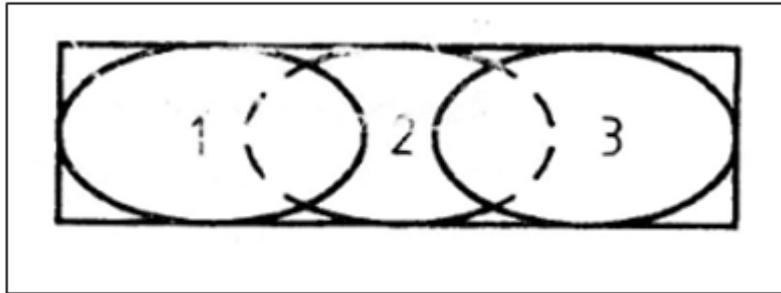
- malaxage à sec des granulats pendant 30 secondes,
- introduction du ciment, et malaxage à sec pendant 2 minutes,
- Ajout de 2/3 de l'eau de gâchage et brassage en 2 minutes,
- Ajout de 1/3 de l'eau mélangé de superplastifiant et malaxage en 2 minutes,
- vidange du malaxeur en 15 secondes.

b) Pour les bétons renforcés de fibres :

- malaxage à sec des granulats pendant 30 secondes,
- introduction du ciment, et malaxage à sec pendant 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. Confection des éprouvettes

Après avoir effectué la vérification de l'affaissement au Cône d'Abrams, chaque 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 [90]. Le béton est introduit en trois tas d'environ un tiers chacun du volume total, dans le moule selon la figure 3.5 à l'aide d'une pelle à coque cylindrique.



**Figure 3.5 :** Remplissage du moule avec le béton frais [90].

Les moules d'éprouvettes utilisés sont métalliques en acier inoxydable illustrés sur la Figure 3.6. La forme des moules est comme suit :

- Prismatique 70x70x280 mm (flexion + retrait)
- Cubique 100x100x100 mm (compression + abrasion)
- Prismatique 100xhx400 mm et 100x100xL (effet d'échelle)



a) Eprouvettes prismatiques 70x70x280 mm (flexion + retrait)



b) Eprouvettes cubiques 100x100x100 mm (compression + abrasion)

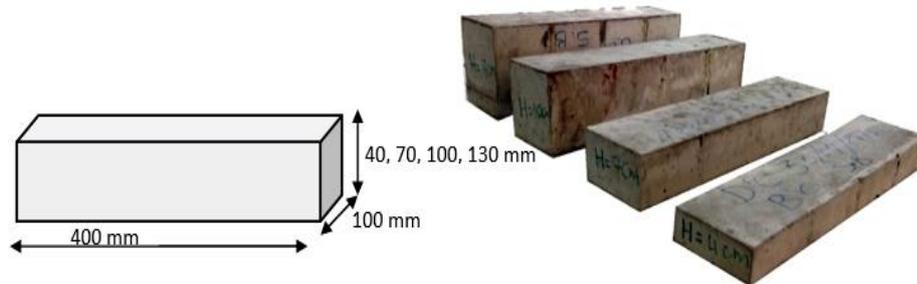


c) Eprouvettes prismatiques 100x100x400 mm (effet d'échelle)

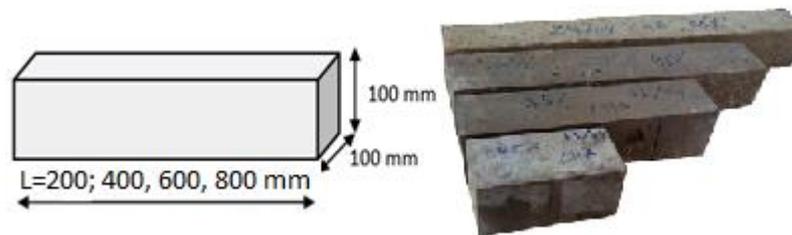
**Figure 3.6 :** Différents moules utilisés.

Quatre mini-poutres de différentes tailles ont été coulées afin d'étudier les effets de la taille en fonction de la teneur en fibres d'acier. Les figures 3.7 et 3.8 illustrent les tailles d'échantillons utilisés pour ce test. La forme géométrique des poutres testées pour étudier l'effet de la hauteur pour un béton témoin et des bétons fibrés est illustrée sur la Figure 3.7. Les petites poutres testées ont des hauteurs différentes de 40, 70, 100 et 130 mm et conservent la même largeur (100 mm) et la même longueur (400 mm).

La forme géométrique des poutres testées pour étudier l'effet de la longueur pour un béton témoin et un béton fibré est illustrée sur la Figure 3.8, avec des longueurs différentes de 200, 400, 600 et 800 mm et conservent la même largeur (100 mm) et la même hauteur (100 mm).



**Figure 3.7 :** Mini-poutres testées en déflexion sur l'effet de la hauteur.



**Figure 3.8 :** Mini-poutres testées en déflexion sur l'effet de la longueur.

Le remplissage des moules (cubique et prismatique) a été fait en deux couches conformément aux prescriptions de la norme NF P18-409 [90]. Après chaque couche les moules ont été vibrés à l'aide d'une aiguille vibrante. Dans le cas des bétons de fibres, une vibration interne est déconseillée pour éviter le phénomène de cheminements des fibres et formations de pelotes "effet d'oursins". Ainsi, le compactage a été fait au moyen d'une vibration externe par la table vibrante (Figure 3.9). L'opération de finition a été effectuée à l'aide d'une règle à araser comme il est mentionné dans les prescriptions de la norme.



**Figure 3.9 :** Table vibrante utilisé pour le compactage des bétons de fibrés.

### 3.4.3. Conservation des éprouvettes

Les moules contenant des éprouvettes sont conservés pendant 24 h à une cure sous chiffons maintenus humidifiés. 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 bac de conservation est maintenue à  $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  (Figure 3.10). Les éprouvettes sont conservées conformément à la norme NF P 18-404 [91]. Les éprouvettes destinées à l'essai de retrait sont préparées à l'essai juste après leurs démoulages et équipées pour les mesures après le premier jour.



**Figure 3.10 :** Bac de Conservation des éprouvettes.

### 3.5. Procédure des 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 :

- L'ouvrabilité
- La compression
- La flexion
- La déformabilité (effet de la hauteur, de la longueur et l'effet de L/D)
- Calcul de l'énergie de rupture
- Retrait
- Abrasion

#### 3.5.1. Essai de d'ouvrabilité

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 (Figure.3.11) suivant la norme NF EN 12350-2 [92]. Cet essai est absolument un des plus simples et des plus fréquemment utilisés



**Figure 3.11** : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

L'ouvrabilité des bétons a été mesurée au moyen de l'essai au cône d'Abrams. Les bétons formulés doivent avoir une grande fluidité. Cet essai est utilisé pour vérifier le dosage en eau et en superplastifiant dans le béton confectionné. Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement. On prend la moyenne de trois essais successifs.

On remarque que l'ajout des fibres tend à diminuer l'ouvrabilité des bétons fibrés. L'ouvrabilité est affectée par le dosage en fibres. Au-delà d'un dosage optimum de 1.5%, le béton fibré est difficilement mis en œuvre, caractérisé par la formation d'un amas fibreux.

### 3.5.2. Essai de compression

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de différentes dimensions ou sur des cubes selon la norme NF EN 12390-3 [93]. Les éprouvettes cubiques présentent des facettes lisses, qui ne nécessitent pas un surfaçage. Pour cette étude, la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques 100×100×100 mm, à l'aide d'une presse de capacité de 3000 kN (figure 3.12). L'éprouvette doit être centrée entre les plateaux de la presse et la mise en charge doit s'effectuer à vitesse constante de 0.5 MPa/s jusqu'à la rupture.



**Figure 3.12 :** Essai de compression.

Le mode opératoire de l'essai de compression doit s'effectuer comme suit :

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai,

- Essuyer les plateaux de la machine d'essai et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux,
- Positionner les éprouvettes cubiques de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens du coulage,
- Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur,
- Sélectionner une vitesse constante de chargement 5 kN/s,
- Application de la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante,
- La charge maximale obtenue doit être enregistrée.
- La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \quad (3.1)$$

Avec:

- $\sigma_c$ : Contrainte de rupture (MPa)
- P : Charge de rupture (N)
- S : Section de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>)

### 3.5.3. Essai de traction par flexion

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm. Pour mesurer la résistance en traction par flexion, on utilisera l'essai de flexion trois points. Le mode opératoire de l'essai de flexion doit s'effectuer comme suit selon la norme NF EN 12390-5 [94]. Les éprouvettes avant et après la rupture en flexion sont illustrées sur la figure 3.14.

- L'appareil de chargement doit comporter un rouleau de chargement centré par rapport aux rouleaux inférieurs, comme l'indique la Figure 3.13,
- Les éprouvettes sont tout d'abord retirées de l'eau, et séchées pendant une heure à l'air libre,
- l'éprouvette étant placée sur deux points d'appuis distant de 210 mm « 3a » et chargée en son milieu par une charge concentrée « P » jusqu'à rupture, avec une vitesse de chargement constante.
- La résistance à la flexion est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_{fl} = \frac{3.P.l}{2.bh^2} \quad (3.2)$$

Où :

- $\sigma_{fl}$  : résistance en flexion, en méga pascals (newtons par millimètre carré) ;
- P : charge maximale, en Newtons ;

- l : écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;
- h : hauteur de la section transversale de l'éprouvette, en millimètre.
- b : largeur de l'éprouvette en mm.



Figure 3.13: Essai de flexion.



Figure 3.14: Mode de rupture.

### 3.5.4 Essai de déformabilité

Ce sont des essais de flexion (3 points) sur des éprouvettes prismatiques, de dimensions  $b \times h \times l$  mm. Les mini-poutres sont sollicitées par un effort  $F$  au milieu de leurs travées avec une augmentation graduelle. Sur le côté bas de la mini-poutre, un comparateur de  $1\mu\text{m}$  de précision a été installé pour suivre l'évolution de la flèche comme l'illustre la figure 3.15. Le but de l'essai est de tracer les courbes force-flèche et de déduire l'énergie de déformation pour différents dosages de fibres à savoir ; 0, 0.5, 1 et 1.5%.

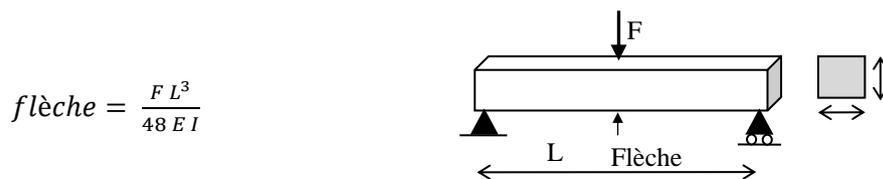


Figure 3.19 : Instrumentation des mini-poutres pour suivre l'évolution des flèches.

a) Effet de la hauteur des éprouvettes

Pour des poutres de  $L=400$  mm et de largeur  $b=100$  mm, on a fait varier la hauteur de 40, 70, 100 et 130 mm pour étudier l'effet de la taille des éprouvette en fonction du dosage des fibres. Les essais sont effectués à 28 jours en suivant les résistances mécaniques correspondantes (figure 3.16).



**Figure 3.16 :** Essai de déformabilité (Effet de H).

***b) Effet de la longueur des éprouvettes***

Ce sont des essais de traction par flexion (3points) sur des poutres de largeur et hauteur constantes ( $h = b = 100 \text{ mm}$ ) et de longueur variable ( $L = 200, 400, 600$  et  $800 \text{ mm}$ ) avec béton de référence et un béton fibré à plusieurs dosage de fibres de (0.5, 1 et 1.5%) à 28 jours. Les flèches sont mesurées en utilisant un comparateur de précision (Figure 3.17).



**Figure 3.17 :** Les éprouvettes de déformabilité (Effet de L).

### c) Effet de l'élanement des fibres $l/d$

L'effet de l'élanement des fibres est étudié sur des essais de flexion (3 points) des éprouvettes prismatiques normalisées, de (100x100x400) mm avec trois types de fibres ( $l/d=45$ ,  $l/d=60$ ,  $l/d=80$ ) à trois dosage (0.5, 1 et 1.5%) à 28 jours. La figure 3.18 illustre la rupture par flexion d'une mini-poutre contenant 1% de fibres avec élanement  $l/d=80$ .



**Figure 3.18 :** Essai de déformabilité des mini-poutres pour un élanement des fibres de  $l/d=80$ .

### **3.6.5. Retrait libre**

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 en béton (figure 3.19).



**Figure 3.19 :** Eprouvettes pour mesure du retrait.

L'expérimentation mise en œuvre consiste à mener des essais de mesure du retrait libre sur des éprouvettes prismatiques, menues avec des embouts fixés à leurs surfaces (Figure 3.19). Etant donné que le retrait est fortement influencé par les conditions de conservation, les éprouvettes sont laissées 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 âges  $t$ , la variation du raccourcissement d'une éprouvette 70x70x280mm, par rapport à sa valeur au temps  $t_0$  (en jours).

### 3.6.6 Essai de résistance à l'abrasion

L'essai est effectué sur des échantillons ayant pratiquement le même volume (100x100x100 mm). Ensuite, on fait passer les échantillons obtenus à l'essai d'abrasion sur l'appareil micro- Duval (Figure 3.20) où dans chaque compartiment, on prépare un échantillonnage d'essai qui est composé de :

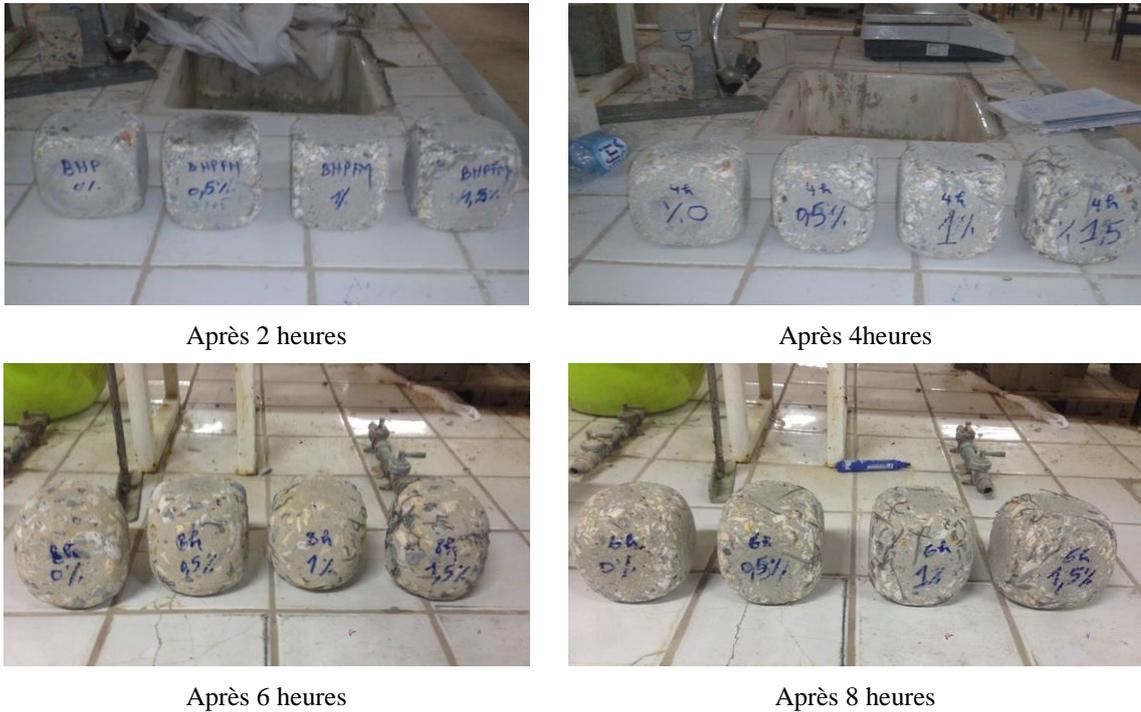
- 1 cube en béton 100x100x100mm
- 1 kg de petites billes sphériques en acier inox ; ( $D=10 \pm 0.5$  mm)
- 2 litre d'eau
- 500g de sable.



**Figure 3.20 :** Micro-Duval utilisé pour l'essai d'abrasion.

On commence l'essai, en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations (pour 2h) à une vitesse régulière de  $100 \pm 5$  trs/min. On élève ensuite l'échantillon après l'essai, le bien lavé, 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 tels que 2, 4, 6 et 8 heures. La figure 3.21

présente l'état des échantillons après avoir subi un essai d'abrasion de différentes durées.



**Figure 3.21 :** *Eprouvettes après l'essai d'abrasion.*

### 3.7. 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. La maniabilité des différents bétons reste influencée par la présence des fibres, seulement tous les bétons gardent une aptitude de mise en œuvre acceptable.



Chapitre 04 :

*Propriétés du béton  
aux fibres métalliques*

## 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 étudiées telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la déformabilité, le retrait libre du béton et la résistance à l'abrasion. Une analyse et une discussion pour chaque propriété sont présentées dans cette partie.

## 4.2. Essai d'ouvrabilité

L'ouvrabilité représente la facilité avec laquelle le béton peut être mélangé, transporté et mis en place. Pour un béton frais à l'état plastique, les fibres d'acier se répartissent dans des orientations aléatoires dans le béton lorsque l'ouvrabilité est faible [95, 96]. Avec l'augmentation de l'ouvrabilité, les fibres d'acier ont tendance à s'orienter le long de la direction de l'écoulement dans un plan horizontal, où le taux de distribution des fibres d'acier a tendance d'augmenter progressivement de la couche supérieure vers la couche inférieure du béton [96, 97].

Les résultats de l'ouvrabilité des bétons contenant différents teneurs en fibres métalliques sont présentés sur la figure 4.1. Généralement, l'ajout de fibres dans le béton réduit l'ouvrabilité et nécessite un dosage supplémentaire de superplastifiant pour maintenir la même ouvrabilité. La comparaison entre le béton de référence et le béton renforcé de fibres métalliques montre que l'ouvrabilité diminue légèrement avec l'augmentation du dosage des fibres pour le même dosage de superplastifiant. Selon ces résultats, chaque 0.1% de fibres métallique incorporé dans le béton réduit son affaissement de 10 mm. Cela est dû à un dosage accru de fibres qui empêche le mouvement de la pâte de ciment [36, 95]. Il est à noter que l'ajout de fibres tend à réduire l'ouvrabilité du béton et à augmenter la viscosité de la pâte de ciment-fibre. Cette diminution est linéairement proportionnelle au dosage de fibres où la présence de 1,5% de fibres fait d'un béton fluide un béton pratiquement ferme. Une teneur plus élevée en fibres lors du malaxage augmente leur interaction avec les granulats, ce qui provoque à son tour l'effet de ballonnement et affecte négativement l'aptitude à l'ouvrabilité du mélange de béton. L'ouvrabilité et la méthode de mise en œuvre affectent le mouvement des fibres lors du coulage du béton ; une ouvrabilité trop élevée permet une meilleure orientation des fibres. La taille de l'échantillon affecte indirectement l'orientation des fibres

car elles doivent s'aligner le long de la surface du coffrage de l'échantillon [96, 97].

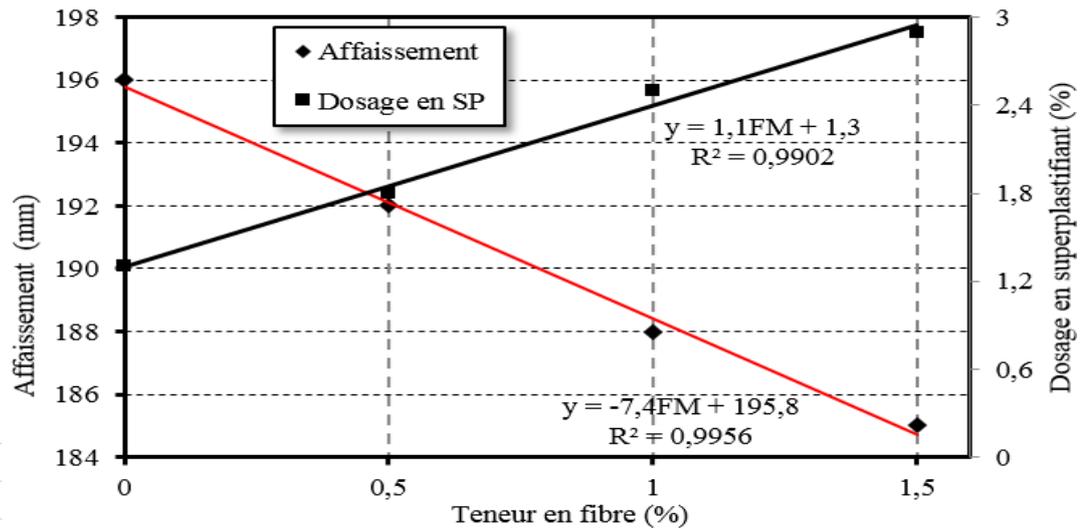


Figure 4.1 : Variation de l'ouvrabilité du béton en fonction du dosage de fibre.

### 4.3. Résistance à la compression

Les essais de compression sont exécutés selon la norme NF EN 12390-3 [93] sur des éprouvettes cubiques 100 mm de côté provenant de chaque gâchée de béton. Les bétons utilisés pour la confection de ces éprouvettes sont le Béton témoin (sans fibres) et le Béton renforcé de 0, 0,5, 1 et 1,5% du volume total de fibre. Les résistances à la compression des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes durant la période de 90 jours sont représentées dans la figure 4.2.

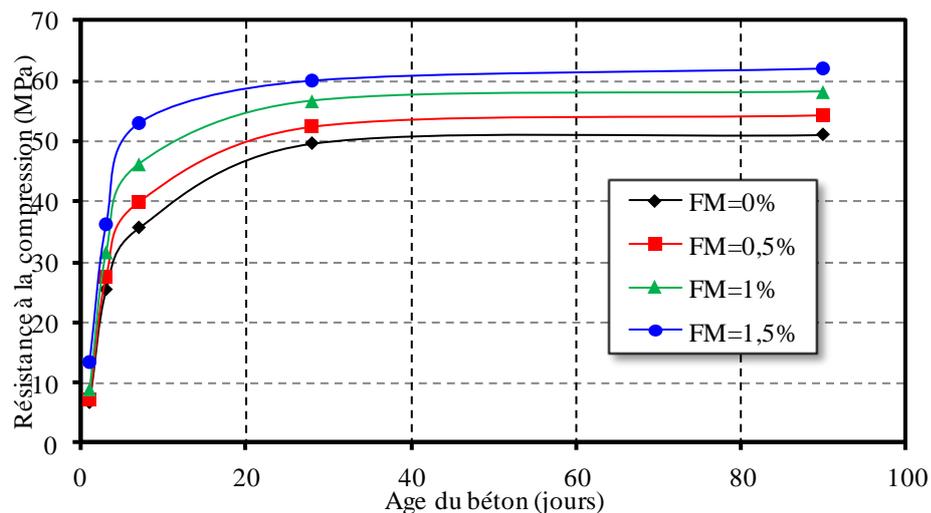
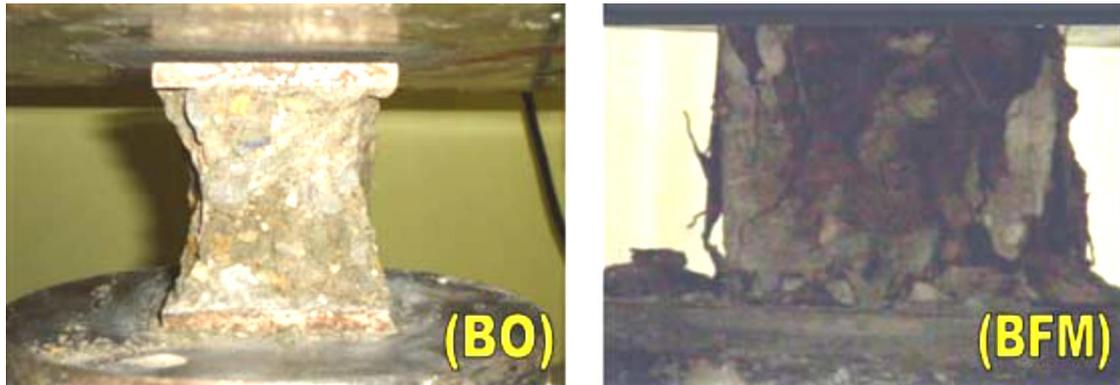


Figure 4.2 : Evolution de la résistance à la compression des bétons fibrés en fonction de l'âge du béton.

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 4.3 montrent une différence remarquable de la forme des éprouvettes sans fibres **(BO)** et avec fibres **(BFM)** après écrasement.



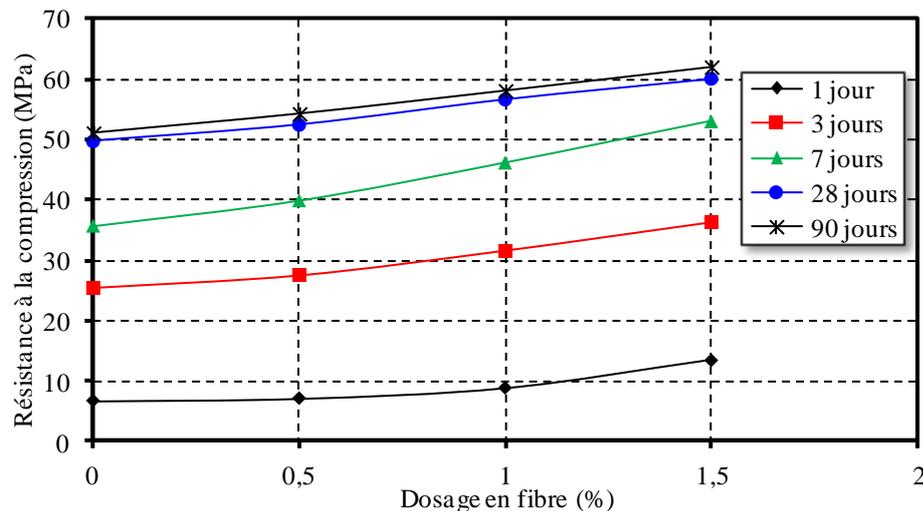
**Figure 4.3 :** *Présentation des éprouvettes écrasées en compression.*

Les résultats obtenus de la résistance à la compression du béton avec différents volumes de fibre à différents âges sont présentés sur la figure 4.4. La résistance à la compression augmente avec le temps d'une manière similaire à celle du béton de référence qui indique un effet très positif de la présence de fibres. A 28 jours, on observe un gain de résistance de 5, 14 et 21%, pour une teneur en fibres de 0.5, 1 et 1.5%, respectivement. Ce résultat est conforme aux résultats de Song et Hwang[56], dans lesquels l'utilisation de la fraction de fibre en volume de 1,5% a entraîné une amélioration de 15,3% de la résistance à la compression. L'augmentation de la résistance à la compression peut être expliquée par la forme et l'orientation des fibres, ainsi qu'une bonne adhérence ou liaison de la fibre avec la matrice. Cela permet au béton d'augmenter sa résistance en limitant l'expansion latérale, ce qui retarde la formation des fissures et d'arrêter leur propagation [98, 99].

La figure 4.4 montre que pour chaque âge du béton les fibres confèrent au béton un gain linéaire de résistance. Il est clair que la présence des fibres n'a qu'un effet marginal à un jour d'âge où leur effet ne commence à ressentir qu'un des taux supérieurs à 1%. Pour un béton dosé de 1.5% de fibre sa résistance à la compression est doublée. Pour des âges avancés, la présence des fibres est ressentie même à des dosages plus faibles.

Cette amélioration de la résistance à la compression est attribuée aussi à l'introduction de la fumée de silice dans le béton conduit à une augmentation de la résistance à la compression. Cela est dû, évidemment, au double rôle que joue la fumée de silice dans la matrice du béton :

- La fumée de silice densifie la pâte de ciment, grâce à ses particules ultrafines qui s'intercalent dans les pores créés lors de l'hydratation du ciment, entre les granulats et les produits d'hydratation.
- La fumée de silice est considérée comme l'ajout le plus réactif ; elle commence à réagir après 2 à 3 jours environ, en se précipitant sous forme de C-S-H avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , libéré lors de l'hydratation du ciment et par conséquent la résistance mécanique du béton s'améliore.



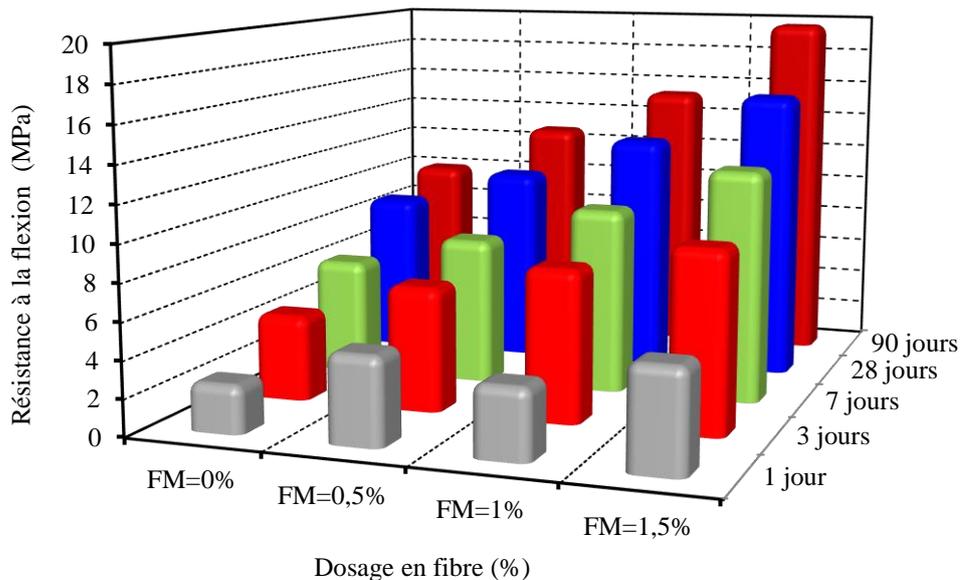
**Figure 4.4 :** Evolution de la résistance à la compression des bétons fibrés en fonction du dosage en fibres.

L'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée à la diminution du rapport E/L (Eau/ciment+fumée de silice) dans le béton et l'utilisation du superplastifiant haut réducteur d'eau. Les fibres ont un rôle surtout bénéfique sur la résistance à la traction et moins sur la résistance à la compression. Dans la matrice béton, les fibres peuvent avoir deux effets :

- les fibres ont un effet de couture des fissures provoquées par les charges extérieures.
- les fibres évitent l'endommagement de la structure et lui permettent un comportement ductile.

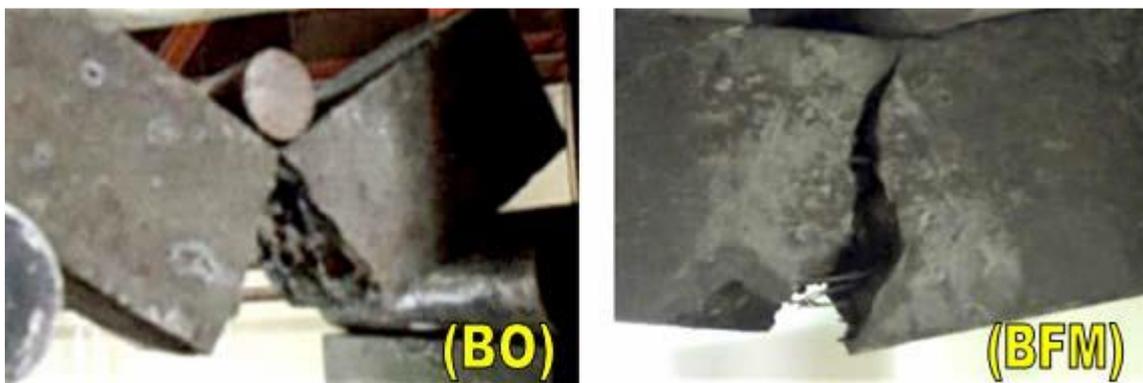
#### 4.4. Résistance à la flexion

Les essais de traction par flexion sont exécutés selon la norme NF EN 12390-5 [94] sur des éprouvettes prismatiques provenant de chaque gâchée de béton. Les bétons utilisés pour la confection de ces éprouvettes sont le béton témoin et le béton renforcé de fibre 0.5, 1 et 1.5% de fibres métalliques. Les résultats de flexion des éprouvettes par flexion trois points sont présentés sur la figure 4.5.



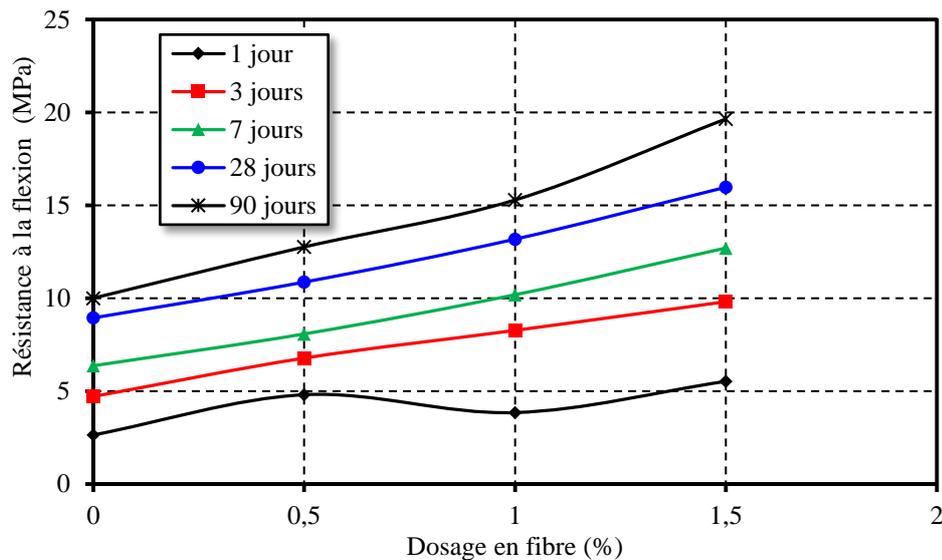
**Figure 4.5 :** Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge et du dosage en fibre.

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 4.6. La bonne orientation des fibres modifie le mode de rupture par flexion ; d'un mode brutal (**BO**), à un mode progressif où l'ouverture et la propagation de la fissure pourront être suivies (**BFM**). Cela se manifeste par une augmentation substantielle de la ductilité du matériau.



**Figure 4.6 :** Présentation des éprouvettes écrasées en flexion.

Les résultats illustrés dans la figure 4.7 montrent l'augmentation de la résistance à la flexion au cours du durcissement du béton. A un jour d'âge, le béton témoin possède une résistance à la flexion de 2.6 MPa, cette résistance grimpe à 10 MPa à 90 jours et à 19.6 MPa lorsque le béton contient 1.5% de fibres métalliques. En outre, l'addition de 1,5% de fibre produit une résistance à la flexion 2,2 fois plus grande par rapport à celle du béton sans fibres à un jour. Cette augmentation est d'environ 45% en présence de 1% de fibre. L'amélioration apportée par l'addition des fibres est dû à la participation des fibres dans la résistance à la propagation des fissures par leur effet de couture. Toute fibre qui passe à travers une fissure crée un pont entre les deux bords. Ce pont permet de transférer une partie de la contrainte qui a provoqué l'ouverture de la fissure. Ainsi, les fibres s'opposent à l'élargissement des fissures et jouent le rôle d'une couture qui augmente la résistance du béton après la fissuration. Les fonds structurels permettent de coudre les microfissures et d'empêcher leur propagation, ce qui évite et retarde leur apparition. La présence des fibres améliore les caractéristiques mécaniques post-fissurations au béton [99, 100,101].



**Figure 4.7 :** Evolution de la résistance à la flexion en fonction du dosage en fibre.

En conclusion, on constate que l'effet de l'ajout des fibres métalliques sur la résistance à la traction par flexion du béton est important. L'ajout des fibres métalliques au béton augmente sa résistance à la traction par flexion jusqu'à un dosage de 1,5 % de fibres métalliques. Cette augmentation de la résistance à la traction par flexion peut être attribuée à :

- ✓ Les fibres métalliques jouent un rôle très important à l'amélioration de la résistance à la traction par flexion des bétons [66].

- ✓ La teneur en fibres joue aussi un rôle important, car l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques dans un béton augmente leur efficacité vis-à-vis à la résistance à la traction par flexion [60].

#### 4.5. Déflexion des mini-poutres

L'évolution des différentes courbes force-flèche des diverses mini-poutres contenant différentes proportions de fibres métalliques a été effectuée en suivant les valeurs enregistrées sur un dynamomètre de précision de 0.2 kN et sur un comparateur de 1 $\mu$ m de précision, les valeurs sont synchronisées sur un film enregistré au cours de l'essai. La Figure 4.8 illustre l'état des poutres 100x100x400 mm fissurées après l'essai de déflexion. La rupture est dans la plupart des cas effectuée à mi-portée de chaque mini-poutre ce qui témoigne de la fiabilité des essais.

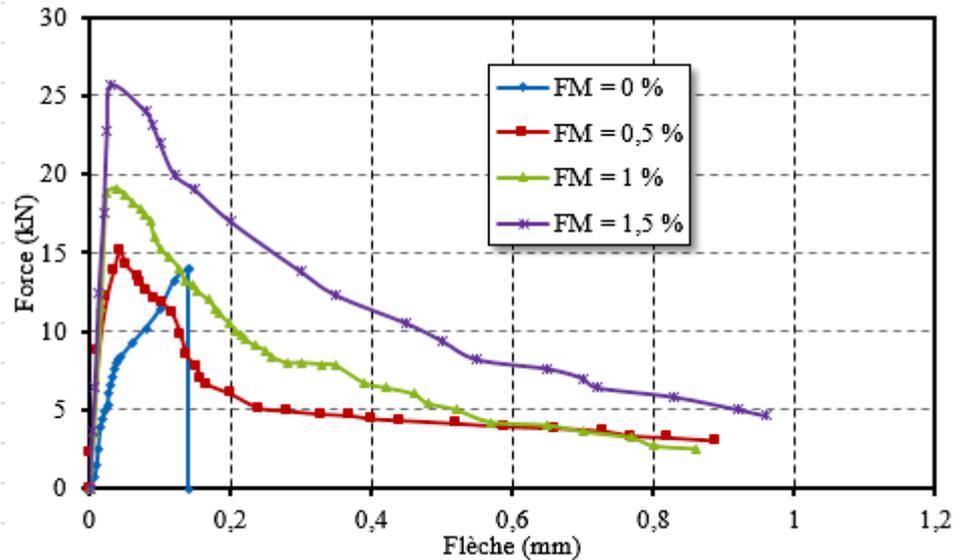


**Figure 4.8 :** *Spécimens après l'essai avec de multiples fissures.*

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour le béton de fibres parce que c'est un matériau composite qui est souvent soumis à ce type de chargement. Les fibres sont ajoutées à la matrice de béton pour améliorer la ductilité et de fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. Ces fibres sont utilisés pour améliorer le comportement mécanique du béton de structure, afin de réduire la largeur des fissures et de limiter leur ouverture. Il est clair dans la figure 4.9 que la forme des courbes force-flèche est la même pour tous les pourcentages de fibres utilisées. A partir de ces résultats, il semble que le retard de l'apparition des fissures, augmente la force maximale et améliore la ductilité et la résistance à la flexion. On peut voir trois zones;

- La première zone du schéma est une zone sans dégradation, ce qui reflète la phase élastique, avant l'apparition de la première fissure dans laquelle des micro-fissures sont très rares dans cette partie.

- La seconde zone est une zone avec un léger décalage du début de craquage est la limite au-delà de laquelle les fissures se développent d'une manière instable.
- Une troisième zone caractérisée par une phase plastique très apparente, où les flèches continuent à augmenter même pour des charges pratiquement constantes.



**Figure 4.9 :** Courbe charge-flèche des poutres en béton renforcé de fibres métalliques.

Ce résultat est conforme à d'autres résultats [102, 103], dans lesquels le béton de fibres devient plus ductile en introduisant les fibres métalliques conduisant à une augmentation de l'énergie de rupture et de la taille effective de la zone de rupture.

Le béton de fibres a montré une déflexion à la charge maximale, proportionnelle à sa teneur en fibres. Pour un échantillon ayant une épaisseur de 100 mm, sa déviation correspondant à la charge maximale est de 0.14, 0.043, 0.037 et 0.031 mm respectivement pour des éprouvettes contenant 0, 0,5, 1 et 1,5% de fibres métalliques. Pour la poutre sans fibres, la fracture est fragile et au-delà de la charge maximale aucune résistance à la flexion n'a été enregistrée. Après cette charge maximale, la déflexion continue d'augmenter pour les bétons fibrés tout en conservant une résistance à la flexion acceptable.

#### 4.5.1. Module de déformation

L'amélioration des principales caractéristiques du béton durci (résistance, module de déformation, fluage, perméabilité) est atteinte grâce à l'incorporation des fibres métalliques qui rigidifient la matrice et diminuent sa déformabilité. La faible déformabilité d'un béton autorise des contraintes de service en compression très élevées. De même, le contrôle de la

fissuration offre une très bonne durabilité au béton qui le rend plus performant en milieux agressifs.

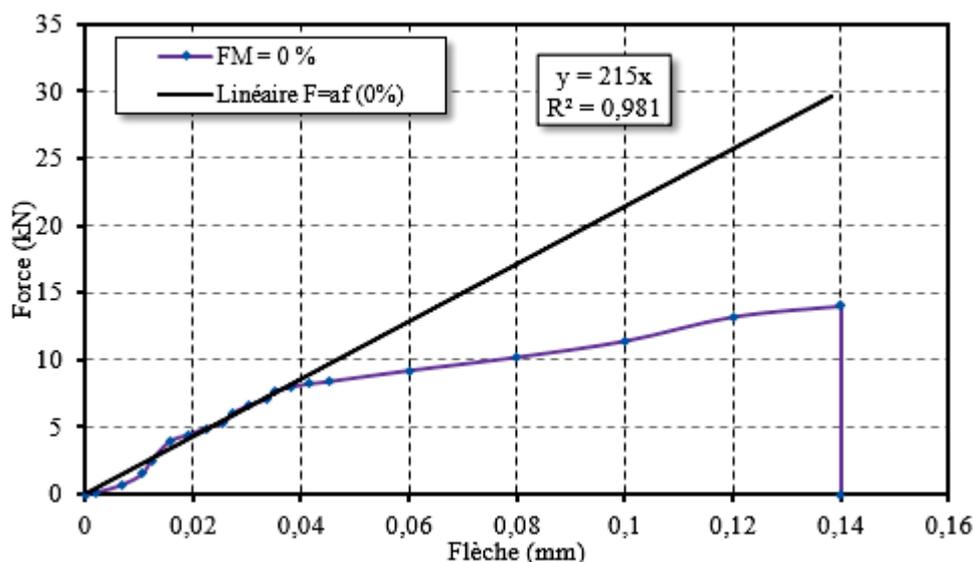
Pour les quatre bétons testés et pour les essais de déflexion, on peut déduire le module de déformation des bétons pour chaque dosage en fibres. Sur les figure 4.10, 4.11, 4.12 et 4.13, on calcule la pente de la courbe force = f (flèche) dans la première phase linéaire et à partir de l'équation de la résistance des matériaux le module de déformation est déduit en fonction des caractéristiques de chaque mini poutres :

$$f_{\text{flèche}} = \frac{FL^3}{48EI} \Rightarrow E = \frac{F}{f} \frac{L^3}{48I} \quad (4.1)$$

Avec :

L : longueur de la travée,  
I : moment d'inertie.

Les résultats des modules de déformation pour les différents bétons en fonction du dosage en fibres sont illustrés sur la figure 4.14. Le module de déformation du béton augmente linéairement en fonction du dosage en fibre. La présence des fibres attribue au béton une résistance accrue à la déformation. Chaque 1% de fibre offre au béton un accroissement de son module de déformation de 25 GPa.



**Figure 4.10** : Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 0%.

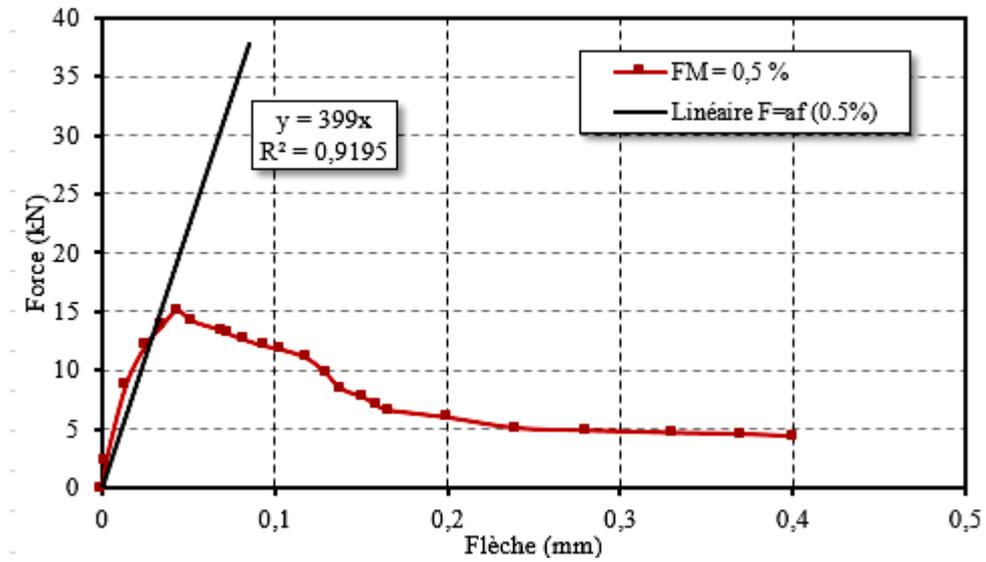


Figure 4.11 : Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 0.5%.

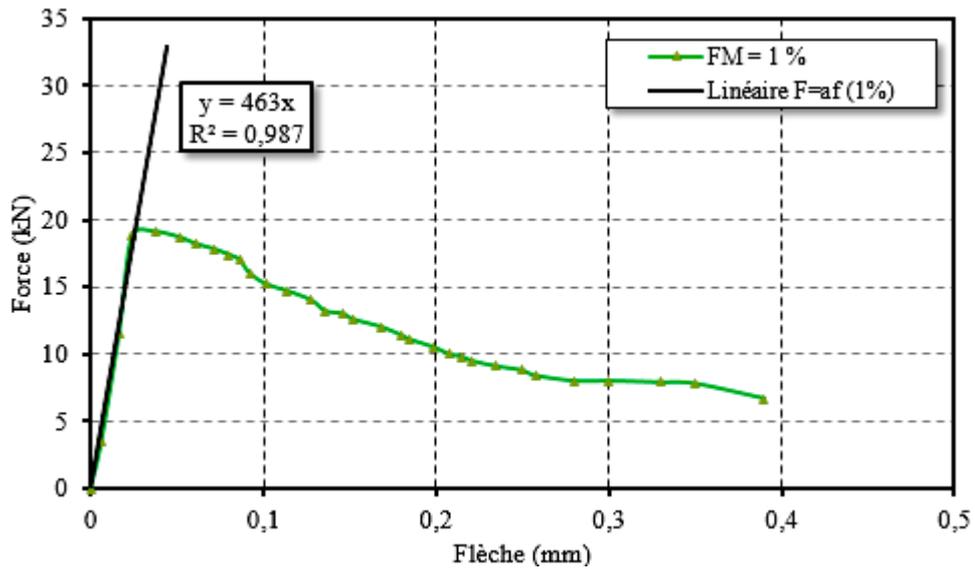
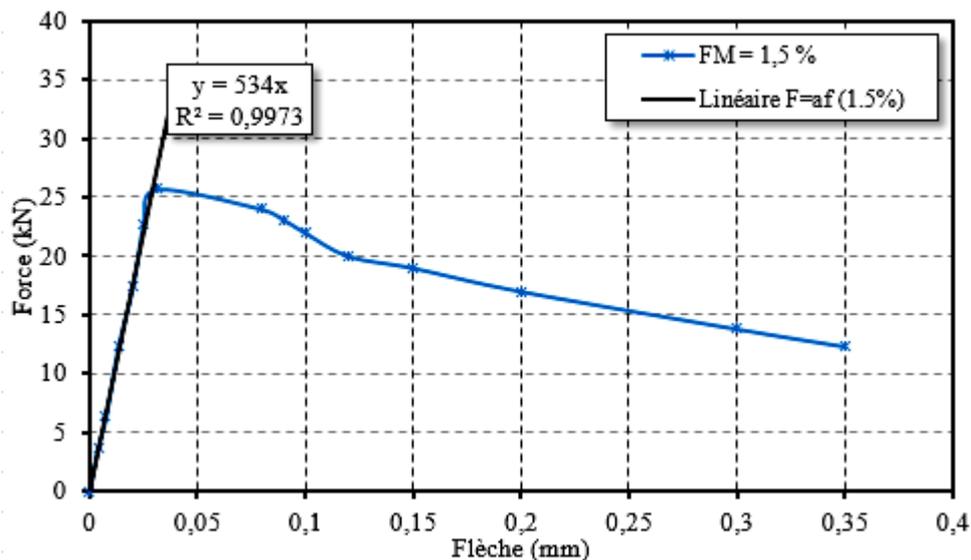
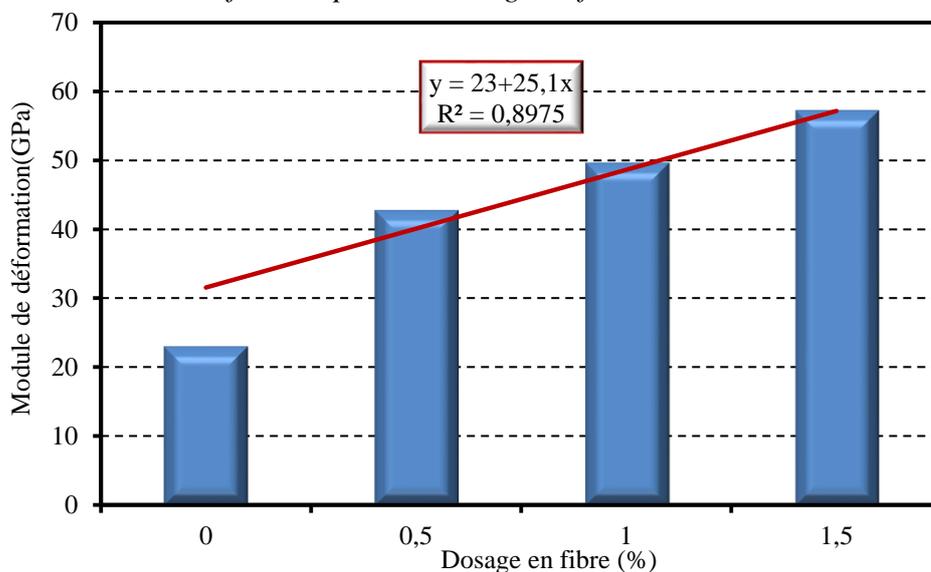


Figure 4.12 : Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 1%.



**Figure 4.13 :** Détermination du module de déformation du béton à partir de l'essai de déflexion pour un dosage en fibre de 1.5%.



**Figure 4.14 :** Variation du module de déformation du béton fibré.

Ce gain du module de déformation est efficace pour retarder l'apparition des fissures et pour réduire la tendance inhérente à la fissuration au jeune âge de la matrice. Cela se produit car à un âge précoce, le module élastique des fibres est encore plus élevé que celui de la matrice cimentaire [104]. Quelques études sur les bétons durcis révèlent peu de variabilité du module de déformation du béton avec 10 % de fibres métalliques [105]. Rigaud et al. [106] ont observé un module de déformation qui aboutit de 45 à 47 GPa pour un béton contenant 2 et 2.5% de fibres de verre sous un essai de déflexion.

### 4.5.2. Energie de rupture

Pour mieux analyser l'effet des FM sur la déflexion des poutres en béton armé, il est nécessaire d'introduire le concept de la méthode d'énergie de rupture. L'énergie de rupture en flexion de la poutre peut être divisée en deux parties : l'une concerne l'initiation de la fissure et la deuxième à sa propagation [107]. Dans cette étude, il a été considéré que l'énergie relative à l'initiation de la fissure est négligeable et l'énergie de rupture  $G_F$  peut être obtenue, à partir des résultats expérimentaux des courbes de déviation de charge, comme suit :

$$G_F = \frac{W_0 + 2 P_0 u_0}{b(d - a_0)} \quad (4.2)$$

Avec  $W_0$  la zone sous la courbe de déviation,  $P_0$  la charge équivalente au poids de la poutre,  $b$  l'épaisseur de la poutre et  $d$  sa profondeur.  $a_0$  est la profondeur de l'entaille qui est égale à zéro dans le cas de cette étude. Sur la base des résultats des tests illustrés sur la figure 4.9, l'énergie de rupture est évaluée pour chaque dosage de fibre. La figure 4.15 illustre ces résultats. Il est bien noté que l'énergie de rupture est fortement liée à la teneur en fibres. La corrélation linéaire obtenue sur la figure 4.15, montre que 1% de fibre métalliques offre au béton une énergie de rupture supplémentaire de 610 J/m<sup>2</sup>. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Kazemi et al. [102] dans laquelle 0,2% de fibre améliore l'énergie de fracture de 118 à 674 J/m<sup>2</sup>. D'autre part, dans certains résultats expérimentaux [107,108], L'énergie de rupture atteint des valeurs élevées allant de 9 à 40 kJ/m<sup>2</sup> pour un béton fibré ultra haute performance. La présence des FM retarde l'apparition et la propagation de fissures qui conduit à une amélioration de la capacité portante de la poutre ainsi que son énergie de rupture [108].

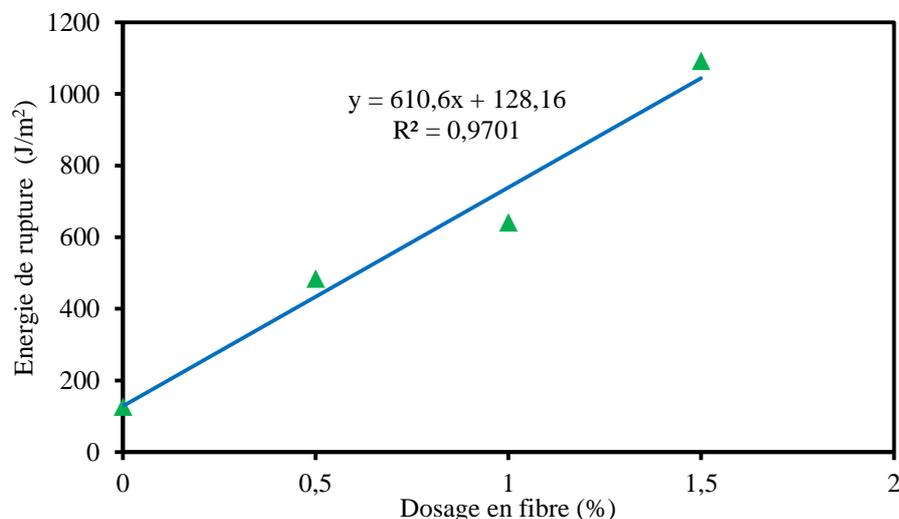


Figure 4.15 : Variation de l'énergie de rupture en fonction de la teneur en fibres.

### 4.6. 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 micro Duval. Les échantillons ayant pratiquement le même volume avec une même charge abrasive. Les figures 4.16 et 4.17 représentent les résultats d'essais des différents échantillons à 28 jours. Pour plusieurs durées d'essai, la figure 4.18 montre l'état des éprouvettes à la fin de l'essai. Les arrêtes arrondies et leur forme cubique commence à ressembler à une sphère avec le frottement du béton de peau. On constate que la résistance à l'abrasion des bétons contenant des fibres métalliques est remarquablement améliorée en fonction du volume de celle-ci ; par rapport au béton non fibré. En fonction du temps d'abrasion, le béton témoin présente une dégradation linéaire ; par contre lors de la présence des fibres métalliques.

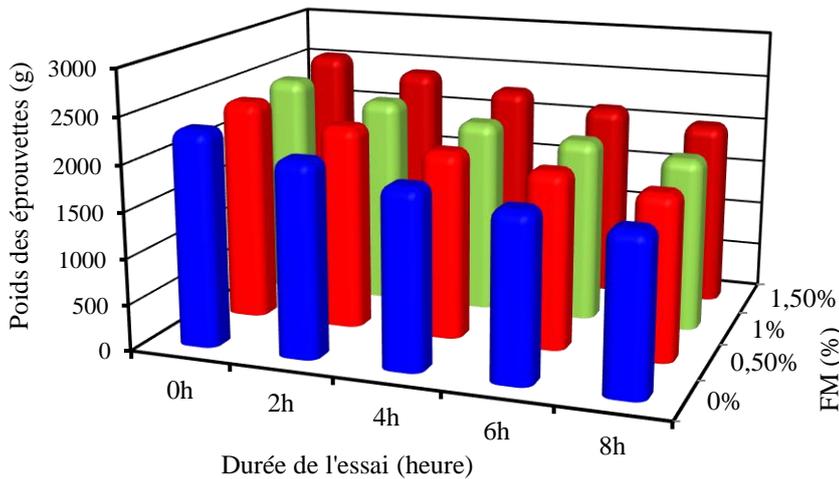


Figure 4.16 : Perte en poids due à l'abrasion des différentes éprouvettes.

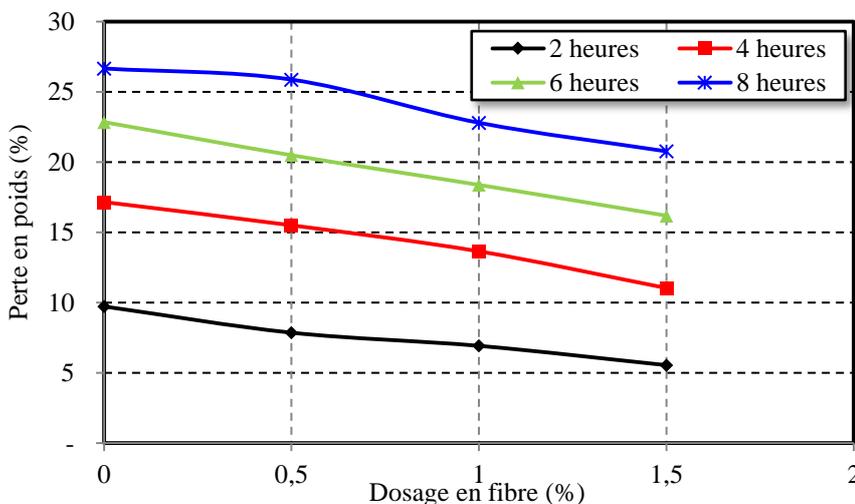


Figure 4.17 : Résistance à l'abrasion d'un béton fibré en fonction du temps.



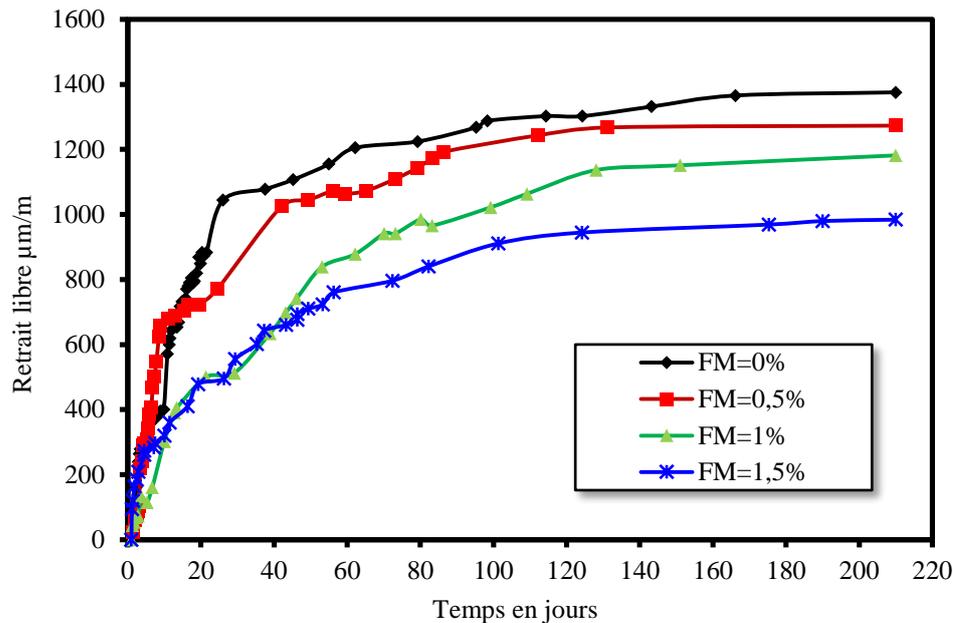
**Figure 4.18 :** *Éprouvettes ayant subi l'essai d'abrasion pendant différentes durées.*

Comme le dosage de fibres augmente, la perte en poids due à l'abrasion diminue. L'abrasion par les billes d'acier a été très agressive. Au début, l'abrasion dégrade facilement le béton de peau, mais aussitôt que l'abrasion atteint le gros granulat un ralentissement de la perte en poids du béton est ressenti. L'adhérence des fibres à la matrice cimentaire rend cette dernière plus rigide et l'abrasion moins forte. La différence dans la perte due à l'abrasion peut être observée 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 7.87, 15.51, 20.50, 25.88 % après 2, 4, 6 et 8 heures d'abrasion.

Ce résultat est similaire à celui trouvé par d'autres études [70], 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 trs/min de l'unité à Los Angeles. La contribution des fibres en polypropylène et des fibres d'acier à l'abrasion a également été rapportée [109].

## 4.7. Retrait libre

Les courbes d'évolution du retrait libre des différents bétons testés en fonction du temps sont présentées sur la figure 4.19. 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.

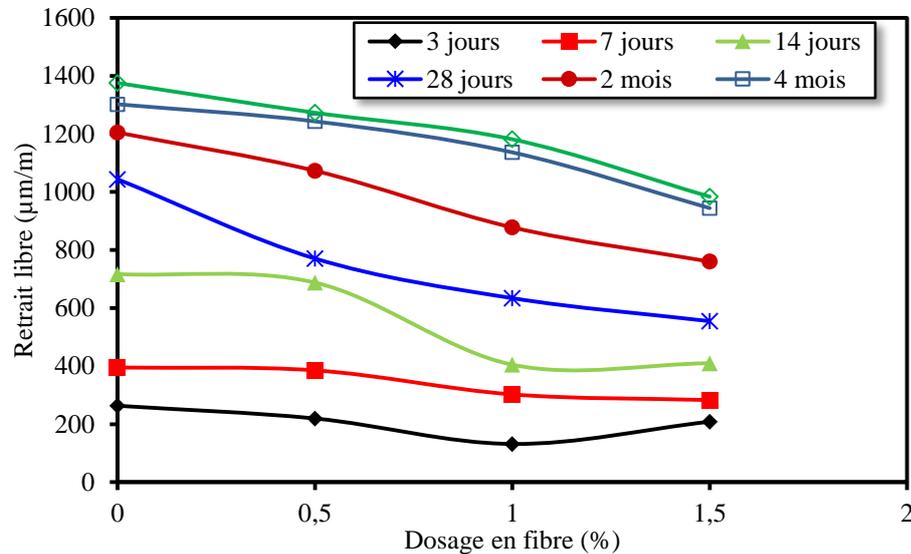


**Figure 4.19 :** Retrait libre d'un béton renforcé avec des fibres métalliques.

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 un certain âge du béton. 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 celui du béton témoin, comme on le constate sur la figure 4.19.

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 4.20 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.



**Figure 4.20 :** Evolution du retrait en fonction de la teneur en fibre à différents âges.

Il apparaît clairement sur les résultats présentés sur la figure 4.20 que la présence de fibres métallique réduit le retrait total proportionnellement au dosage de fibres utilisées. A trois jours, la présence des fibres a un effet faible à la déformation de retrait à cause de la maturité précoce de la matrice cimentaire qui ne développe pas encore d'adhérence avec la surface des fibres. A 28 jours, un dosage de fibres de 0.5, 1 et 1.5% engendre une baisse de retrait respectivement de 26, 39 et 46%. A six mois, cette réduction n'est que de 7, 14 et 28% pour les mêmes dosages respectifs. Quantitativement, les fibres d'acier deviennent plus efficaces pour limiter le retrait du béton à mesure que la durée de l'essai augmente comme cela a été prouvé dans les travaux d'autres chercheurs [110, 111]. Les résultats des tests [72] sur des poutres en béton montrent, l'ajout de 1% en volume de fibres d'acier réduit le retrait ultime en haut, à mi-hauteur et en bas de la poutre de 16, 23 et 28%, respectivement. Cette différence est expliquée par les auteurs de la distribution aléatoire de la direction des fibres le long de la profondeur des poutres.

## 4.8. Analyse corrélationnelle

La méthode corrélationnelle permet d'étudier les relations qui existent entre des comportements différents et d'établir des relations mathématiques les reliant. Lorsqu'on observe un lien entre deux caractéristiques du béton, on essaye d'établir des prédictions. Cette méthode offre essentiellement une approche descriptive des liens entre les caractéristiques. On peut quantifier la force de la relation entre deux variables à l'aide d'un coefficient de corrélation ( $-1$  à  $+1$ ). Ce coefficient  $r$  représente le quotient de leur covariance par le produit de leurs écarts types.

$$r = \frac{\hat{\sigma}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.3)$$

Pour chaque relation testée, la méthode des moindres carrés est utilisée pour trouver la relation qui minimise la somme quadratique des déviations entre les mesures et les prédictions. La relation qui représente le minimum de déviation représente le bon ajustement.

### 4.8.1. Corrélation de la résistance à la compression

La résistance à la compression est une propriété dont son équivalence doit être toujours prise en considération. Afin de mieux analyser ces résultats, nous utilisons une approche adoptée par l'ASTM standard [112] pour l'estimation des résistances du béton par l'approche de la maturité et qui suppose que la cinétique de l'hydratation peut être prédite par l'équation suivante :

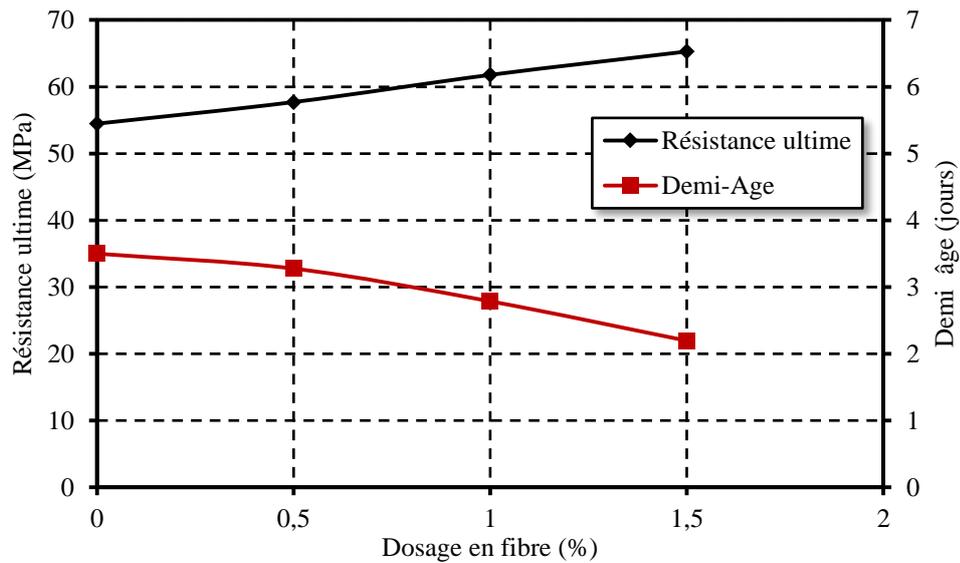
$$R_c(t) = R_{cu} \frac{(t-t_0)}{(t-t_0)+T_{50}} \quad (4.4)$$

avec :

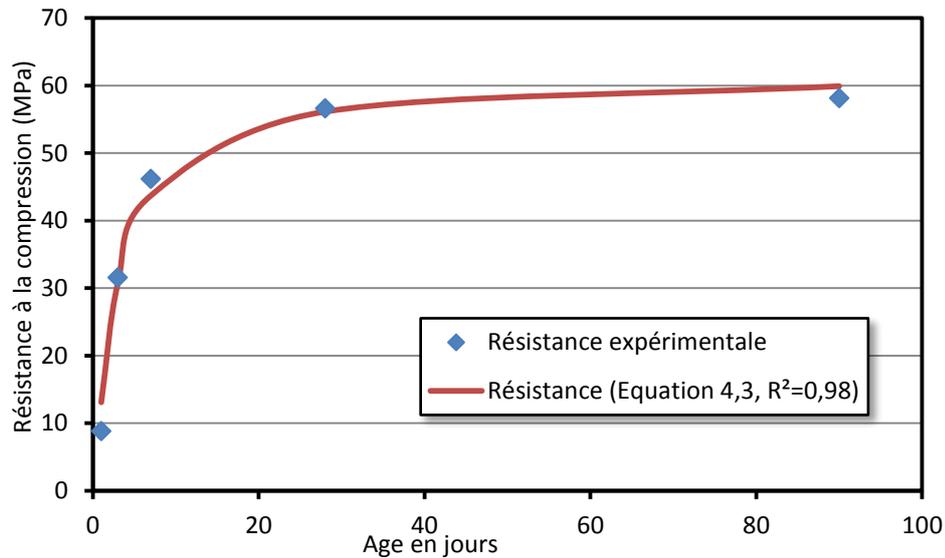
- $R_c$  : propriété du ciment (chaleur d'hydratation, retrait, résistance, etc.)
- $R_{cu}$  : valeur ultime,
- $t_0$  : temps représentant l'âge où la résistance commence à se développer, il peut être assimilé au temps de fin prise ( $t_f=6$  heures),
- $t_{50}$  : temps nécessaire pour atteindre 50 % de la valeur ultime en jours (demi-âge).

Une analyse de régression de l'équation 4.3 par la méthode des moindres carrés a été

utilisée pour déterminer les meilleures valeurs d'ajustement  $R_u$  et  $t_{50}$  pour chaque ensemble de données. La corrélation des résultats de la résistance à la compression par régression linéaire donne les valeurs de l'âge  $t_{50}$  et les valeurs de la résistance ultime  $R_u$  en fonction du dosage en fibres. La figure 4.21 illustre la variation des variables de l'équation 4.4. La courbe tracée sur la Figure 4.22 est un exemple représentatif relatif à un béton ayant 1% de fibres métalliques des courbes hyperboliques les mieux ajustées. On voit que l'équation 4.4 correspond assez bien aux données avec un coefficient de corrélation très élevé.



**Figure 4.21 :** Variation des résistances ultimes  $F_{cu}$  et des demi-âges  $T_{50}$  en fonction du dosage en fibres métalliques.

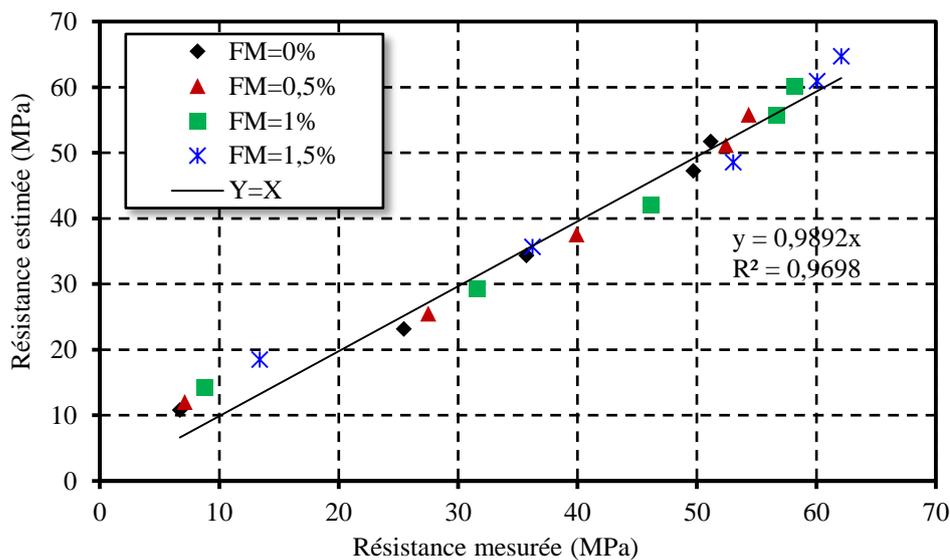


**Figure 4.22 :** Variation des résistances mesurées et calculées par l'équation 4.3 pour un béton contenant 1% de fibres métalliques.

Lorsque le béton contient une proportion volumique de fibres métalliques FM afin d'améliorer sa résistance à la fissuration, l'équation 4.4 prend la forme suivante en corrigeant les paramètres  $R_{cu}$  et de  $T_{50}$ , elle s'écrit comme suit :

$$R_c(t) = (54 + 8.4 FM) \frac{(t-t_0)}{(t-t_0)+(4-0.62 FM^2)} \quad (4.5)$$

Les résultats montrent une bonne corrélation de l'équation 4.4 avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,98. La figure 4.23 illustre ces résultats en comparant les résistances mesurées avec celles prédites par l'équation 4.5.



**Figure 4.23 :** Relation entre les valeurs de la résistance à la compression calculée et la résistance à la compression mesurée pour un béton fibré.

#### 4.8.2. Corrélation de la résistance à la flexion

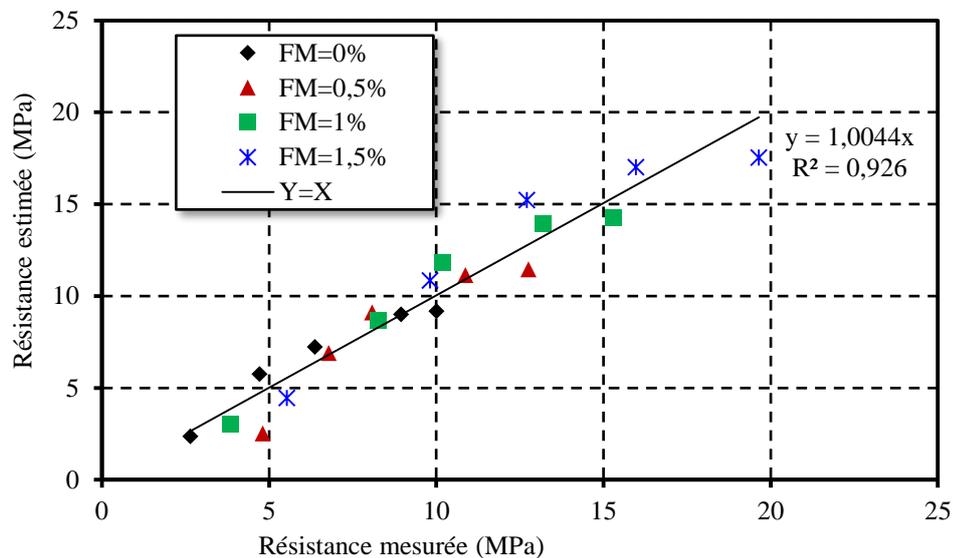
Il est souhaitable d'étudier la variation de la résistance à la flexion en fonction de la résistance à la compression. Pour cela, nous convertissons les résultats obtenus de la résistance à la flexion par des résistances à la traction simple en les multipliant par un coefficient de 0,6 qui prend en compte la plasticité du béton dans la phase de rupture [44]. Le modèle Eurocode [113], illustré par l'Equation (4.6), a été utilisé pour vérifier les résultats obtenus dans lesquels une correction a été ajoutée pour mieux ajuster les données trouvées.

$$f_t = 0.3 f_c^{\frac{2}{3}} \quad (4.6)$$

Puisque l'Equation (4.6) ne prend pas en compte la présence de fibres, sa corrélation avec les résultats obtenus donne une insuffisance totale. Un ajustement est introduit en modifiant le paramètre de l'équation conduit à un coefficient de corrélation de 0,9. Cette corrélation justifie la pertinence d'expression corrigée. Cette expression peut être écrite comme suit :

$$f_t = \frac{2}{3} f_c \left( \frac{2}{3} + 0.15 FM \right) \quad (4.7)$$

Où  $f_c$  et  $f_t$  sont respectivement les résistances à la compression et à la traction, et FM est le contenu des fibres dans la composition du béton. Figure 4.24 illustre une comparaison entre les valeurs mesurées et calculées par l'Equation (4.7). Cette dernière semble plus apte à prédire les résistances à la traction que l'Equation (4.6).



**Figure 4.24 :** Comparaison entre les valeurs de la résistance à la flexion mesurées et estimées à l'aide de l'Equation(4.7).

### 4.8.3. Corrélation du module de déformation

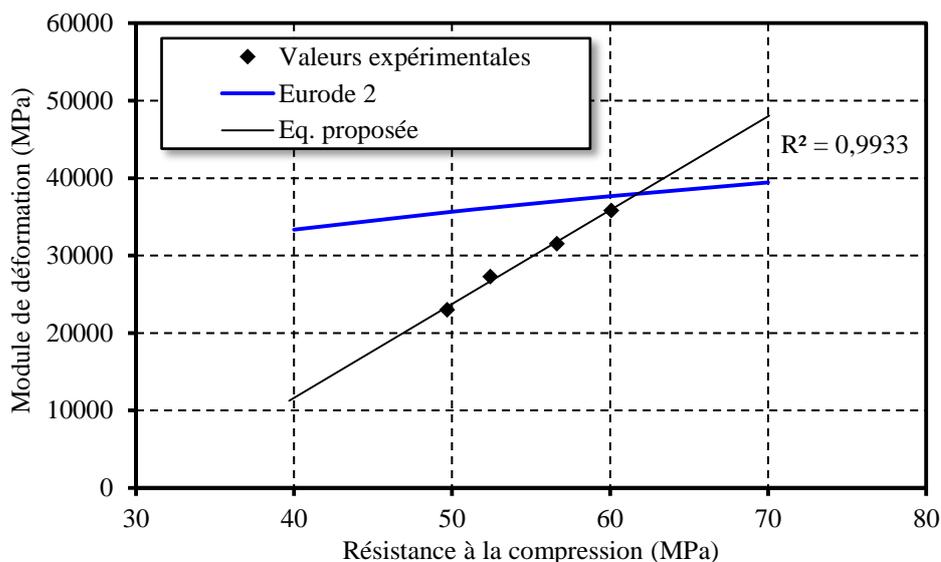
Le module d'élasticité est la contrainte mécanique qui engendre un allongement relatif unitaire d'un matériau. Il représente la pente initiale de la courbe contrainte-déformation. En pratique, il est possible de conclure le module d'élasticité d'après la résistance à la compression du béton à un âge donné. Plusieurs codes de calcul de béton armé proposent des formules empiriques simples pour estimer ce module à partir de la résistance à la compression comme l'Eurocode 2 [114].

$$E_{cm} = 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (\text{MPa}) \quad (4.8)$$

Avec  $f_{cm}$  est la résistance à la compression du béton en MPa à un âge donné.

La figure 4.25 illustre la variation du module d'élasticité prédit par l'Eurocode 2 en comparaison avec les résultats expérimentaux trouvés par les essais de déflexion. Il est bien clair que l'Eurocode 2 corrèle mal les résultats expérimentaux malgré que ces derniers restent dans le domaine de prédiction. En utilisant la méthode des moindres carrés, on peut apporter à l'expression donnée par l'Eurocode 2 une correction pour qu'elle puisse s'ajuster bien aux résultats expérimentaux. Le résultat a abouti à une nouvelle expression donnée en fonction de la teneur en fibres FM et dont le coefficient de corrélation est proche de l'unité avec un écart quadratique minimisé à 462 Pa.

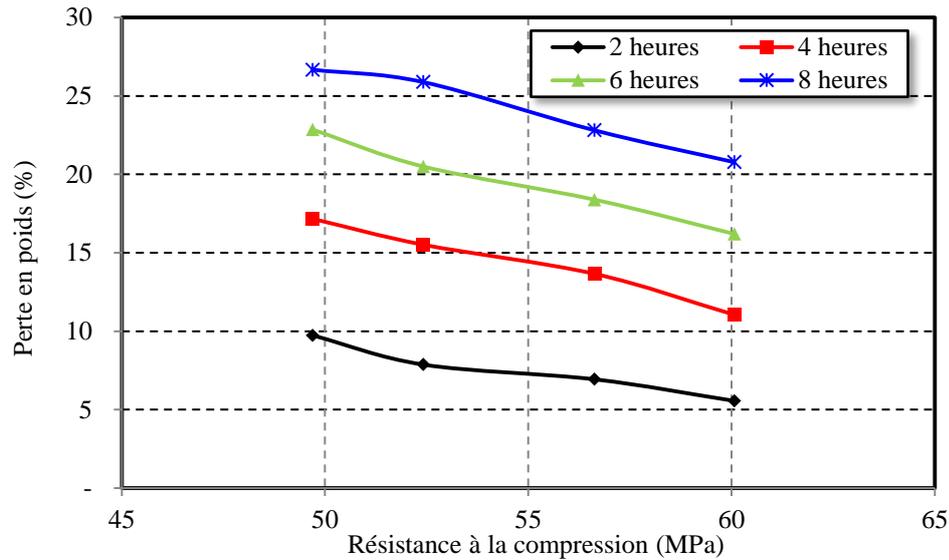
$$E_{cm} = 22000 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.04+0.16 FM} \quad (\text{MPa}) \quad (4.9)$$



**Figure 4.25 :** Comparaison de la variation du module d'élasticité prédit par l'Eurocode 2 et l'Equation proposée avec les résultats expérimentaux obtenus.

#### 4.8.4. Corrélation de la résistance à l'abrasion

Il est bien illustré sur la figure 4.26, 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 en fonction du dosage en fibres métalliques. La présence des morceaux de béton fracturés maintenus dans le corps principal du béton ralentit le processus de détérioration.



**Figure 4.26 :** Variation de la perte en poids par l'essai d'abrasion en fonction de la résistance à la compression ( $t=28$  jours).

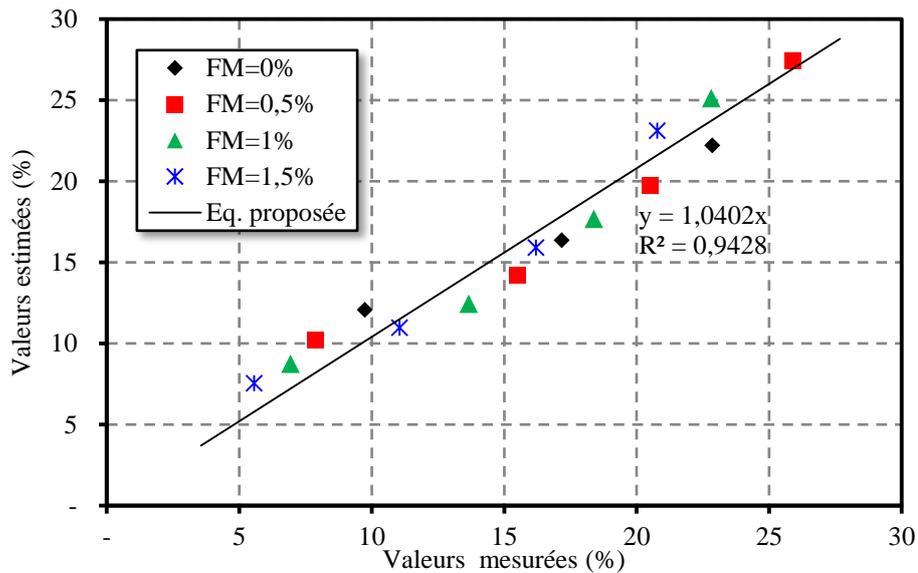
Pour cela, on a essayé de prédire la résistance à l'abrasion du béton fibré à 28 jours en fonction de sa résistance à la compression, sa teneur en fibres et la durée de l'essai. En testant plusieurs combinaisons relatives au programme expérimental présenté, la méthode des moindres carrés donne la relation ci-dessous avec un écart quadratique minimal de 1.7%.

$$Ab(\%) = 210^6 e^{-0.63 t} (R_{c0} + 6.2 FM)^{0.2 t - 3.15} \quad (4.10)$$

Avec :

- $t$  : la durée de l'essai d'abrasion en heures,
- $R_{c0}$  : la résistance à la compression à 28 jours du béton non fibré égale à 50 MPa selon cette étude.
- $FM$  : le taux de fibres métalliques en pourcentage.

La figure 4.27 illustre une comparaison entre les valeurs mesurées en fonction de leurs teneurs en fibres avec les valeurs estimées par l'équation 4.10. Le coefficient de corrélation évalué à 0.94 témoigne de la fiabilité du choix de la relation proposée.



**Figure 4.27 :** Comparaison entre l'abrasion mesurée et estimée à 28 jours.

#### 4.8.5. Corrélation du retrait total

Afin de mieux comprendre le retrait du béton fibré, on a appliqué les résultats trouvés au modèle d'évolution des caractéristiques du béton développé par ASTM [112] et reprise par l'ACI-209 [115] et représentée par l'équation ci-dessous.

$$Ret(t) = Ret_u \frac{t}{t+T_{50}} \quad (4.11)$$

Avec :

$Ret$  et  $Ret_u$  représente le retrait au temps  $t$  et le retrait ultime. Le  $T_{50}$  est un facteur représentant le temps pour atteindre la moitié du retrait ultime et dépend de la composition du béton, de la taille de l'éprouvette et des conditions de cure.

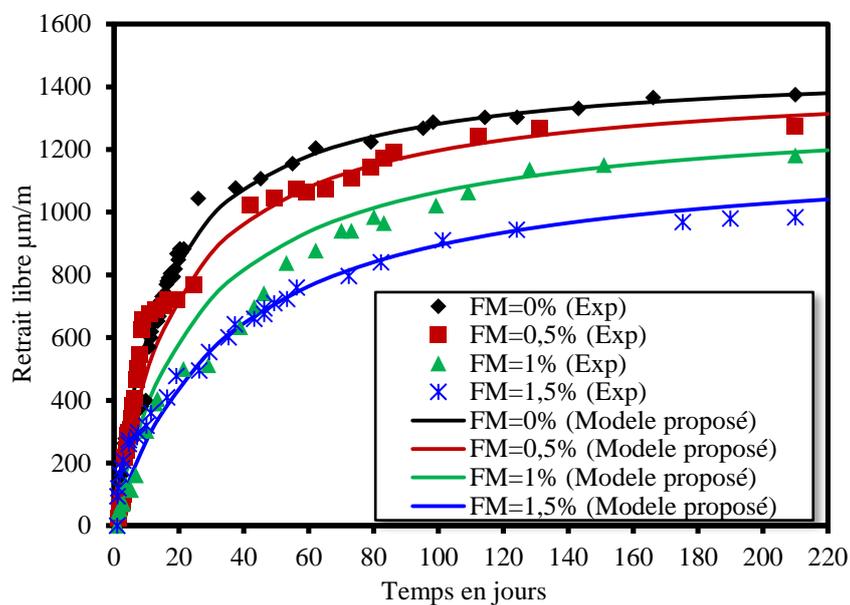
En ajustant l'équation 4.11 avec les résultats de retrait trouvés, la méthode des moindres carrés conduit à optimiser les paramètres de l'équation pour minimiser l'écart quadratique à sa valeur la plus faible possible. L'ajustement est effectué sur les valeurs au-delà de 50 jours afin de minimiser les écarts au maximum. Le tableau 4.1 récapitule les valeurs trouvées avec des coefficients de corrélation très élevés. Une comparaison est représentée sur la figure 4.28 où la concordance est presque totale.

**Tableau 4.1 :** Valeurs des paramètres d'ajustement de l'équation 4.11.

Dosage enfibre	0	0.5	1	1.5
Ret <sub>u</sub> (µm/m)	1474	1430	1337	1205
T <sub>50</sub> (jours)	15,0	19,5	25,5	34,7
R <sup>2</sup>	0,9127	0,8752	0,9691	0,9496

La modélisation des deux paramètres de l'équation 4.11 conduit à une nouvelle forme du modèle de retrait qui tient compte du taux fibre FM présent dans la composition du béton. La nouvelle équation s'écrit comme suit :

$$Ret(t) = (1492 - 180 FM) \frac{t}{t + 14.8 e^{0.56 FM}} \quad (4.12)$$

**Figure 4.28 :** Comparaison entre les retraits mesurés et estimés du béton fibré.

## 4.9. Conclusion

A travers ce travail, le béton renforcé de fibres métalliques offre une meilleure résistance à la flexion, à l'abrasion et une réduction du retrait. L'apport des fibres métalliques est proportionnel à leur dosage dans le béton. Cependant, le béton fibré est très visqueux à l'état frais et son ouvrabilité devient de plus en plus difficile ce qui rend l'utilisation de superplastifiant indispensable. Malgré que ces performances sont très remarquables par rapport au béton non fibré ce qui encourage son utilisation dans les milieux à risque majeur de fissuration, il reste son prix de revient plus élevé. Son comportement post fissuration donne une sécurité supplémentaire aux constructions qui deviennent plus ductiles et aptes à absorber l'énergie d'une action sismique.



Chapitre 05 :

*Etude de l'effet d'échelle sur  
les propriétés du béton de  
fibres métalliques*

## 5.1. Introduction

L'étude de l'effet de la taille des éprouvettes en béton est un procédé pour extrapoler les résultats des tests de laboratoire de petite échelle à des applications à grande échelle. L'effet de taille sur les propriétés mécaniques du béton est important lorsque des modèles à petite échelle sont utilisés pour prédire le comportement de structures réelles. Un effet de taille dans les éléments en béton indique que la résistance structurelle nominale et la fragilité du matériau (rapport entre l'énergie consommée pendant le processus de chargement après et avant le pic contrainte-déformation) diminuent toujours avec l'augmentation de la taille des éléments sous tension [116, 117]. Ainsi, les éléments en béton deviennent ductiles à petite échelle et parfaitement cassants à grande échelle.

Récemment, l'effet de la taille sur la résistance à la flexion du BRFM a été élaboré par plusieurs chercheurs [118, 119]. En effectuant des tests de flexion à trois et quatre points, Mahmud et al. [118] et Fladr et Bily [119] ont rapporté que l'effet de taille sur la résistance à la flexion dans le BRFM avec des gros granulats est très similaire à d'autres types de béton dans lesquels des poutres plus petites présentent une résistance plus élevée, probablement en raison de l'effet de couche de surface. Une autre étude a également mentionné que le BRFM avec une ductilité en traction plus élevée est moins sensible à l'effet de taille que celui avec une ductilité plus faible [120].

En général, toutes les approches expliquant l'effet de la taille de l'échantillon sur les propriétés mécaniques introduisent des paramètres indiquant la ductilité des matériaux. Deux approches principales sont largement connues dans ce domaine. L'approche statistique représentée par la théorie de Weibull [121, 122], et l'approche déterministe basée sur la mécanique de la rupture [116].

La théorie de Weibull prend en compte la variabilité interne du matériau, elle permet de décrire la probabilité de rupture d'un matériau fragile (céramique, verre, roche, béton). La prise en compte de l'effet de la taille est basée sur l'augmentation du nombre de défauts, probablement critique pour les gros échantillons. En effet, s'il y a plus de défauts critiques présents dans l'échantillon, la résistance à la rupture diminue. En corollaire, un petit échantillon est plus fort qu'un grand échantillon pour le même champ de contrainte. Plusieurs études expérimentales [82, 123, 124] considèrent que l'effet de taille suit généralement les lois de puissance du volumique de l'échantillon de la même manière que la distribution de Weibull qui a conduit à son utilisation dans certaines études. Pour deux

échantillons de deux tailles différentes  $V_1$  et  $V_2$ , Weibull proposa une relation reliant respectivement leurs forces  $S_1$  et  $S_2$  à leurs tailles.

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1/m} \quad (5.1)$$

Avec  $m$  supérieur à zéro, caractérisant la répartition des défauts dans le matériau. Il prend la valeur la plus faible pour le matériau le plus fragile.

Sur la base d'une théorie déterministe, Bazant [81,116] a proposé l'effet de la taille en utilisant la mécanique de la rupture pour les matériaux quasi- fragiles, décrit comme suit :

$$\sigma_N = \frac{Bf'_t}{\sqrt{1+\frac{d}{d_0}}} \quad (5.2)$$

Où  $\sigma_N$  est la résistance nominale,  $f'_t$  est la résistance à la traction du matériau,  $d_0$  est un paramètre dépendant de la géométrie structurale,  $d$  est la taille de l'élément structural et  $B$  est un paramètre caractérisant la solution.

Dans cette étude, l'effet de la taille sur le comportement en flexion des poutres BRFM a été étudié. Plusieurs petites poutres sont confectionnées selon différentes tailles et soumises à une flexion en trois points. Les flèches à mi- portée sont suivies pour chaque poutre à mesure que la charge augmente jusqu'à ce qu'elle se brise. Une analyse des résultats obtenus est conduite pour quantifier la variation de la résistance à la flexion en fonction de la taille de l'échantillon et de la teneur en fibres.

## 5.2. Effet de la hauteur des poutres (H)

Dans cette étude, l'effet de la taille sur le comportement en flexion des poutres en BRFM a été étudié. Plusieurs petites poutres sont faites de différentes tailles et soumises à une flexion trois points. Les dimensions des mini-poutres sont illustrées sur la figure 5.1. Les flèches à mi- portée sont suivies pour chaque poutre à mesure que la charge augmente jusqu'à la rupture. Une analyse des résultats obtenus est réalisée pour quantifier la variation de la résistance à la flexion en fonction de la taille de l'échantillon et de la teneur en fibres.

Sur un schéma statique en flexion trois points, les mini-poutres sont sollicitées par un effort au milieu de leurs travées et pour chaque incrément de force on enregistre la flèche à mi- portée. Les lectures des valeurs et sur le manomètre et sur le comparateur sont suivies

par un enregistrement vidéo dont l'analyse par synchronisation a abouti aux résultats représentés sur les figures 5.2, 5.3, 5.4 et 5.5.

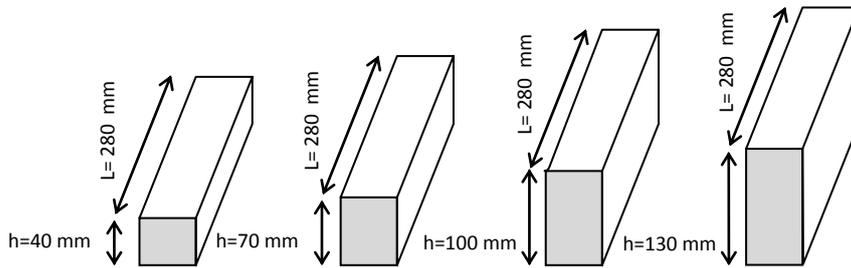


Figure 5.1 : Présentation des mini-poutres testées à l'effet d'échelle en flexion.

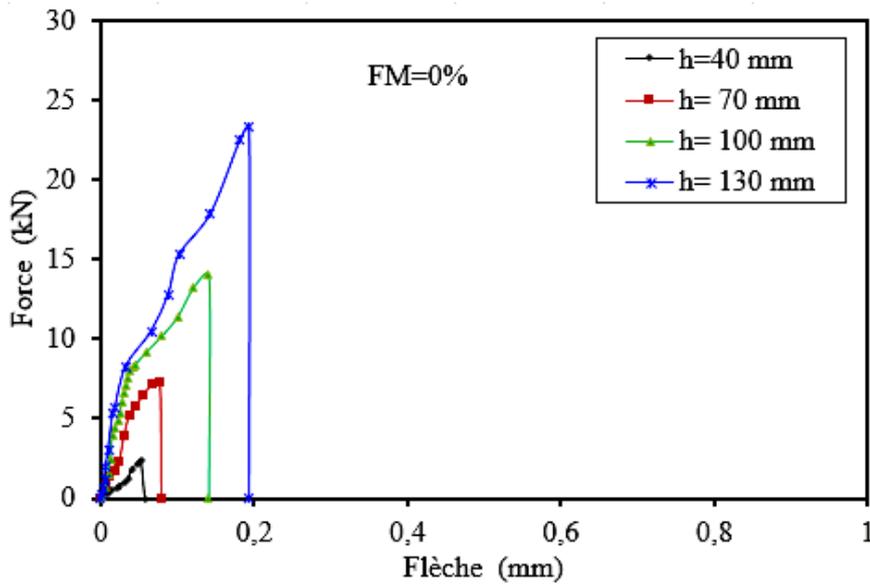


Figure 5.2 : Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 0% de fibres métalliques.

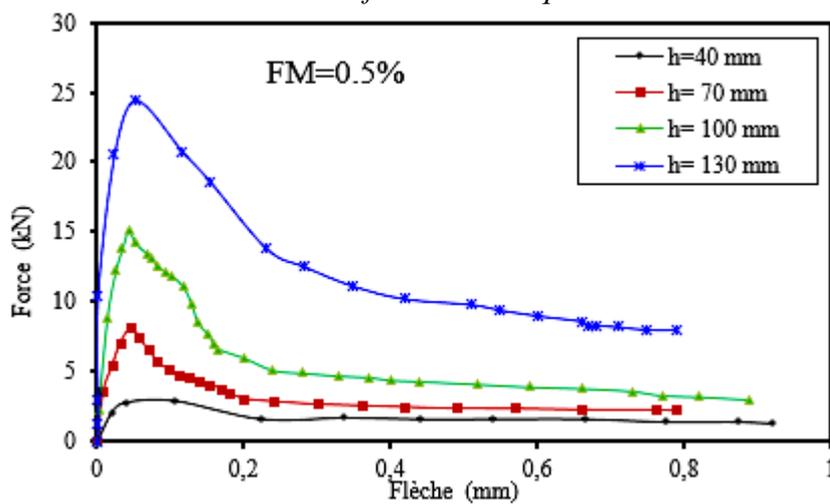


Figure 5.3 : Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 0.5% de fibres métalliques.

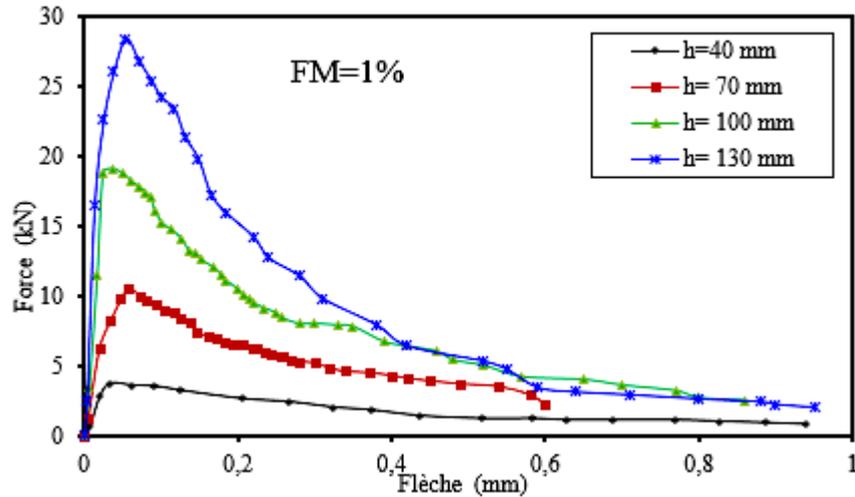


Figure 5.4 : Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 1% de fibres métalliques.

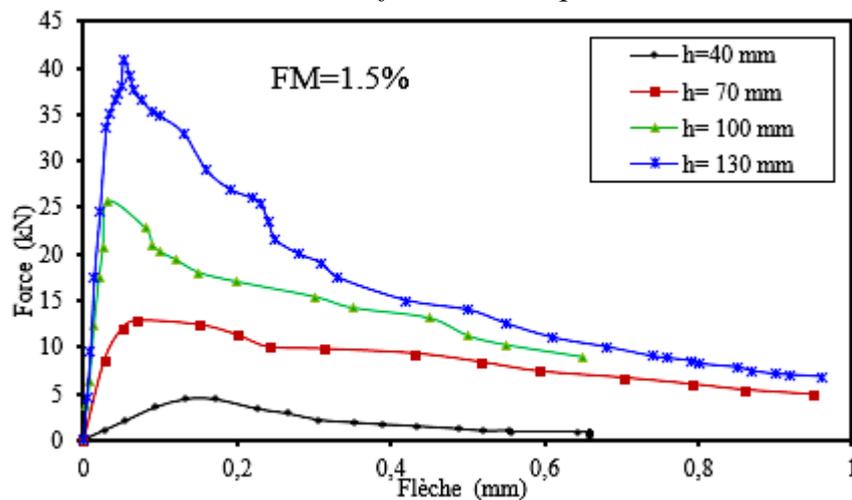
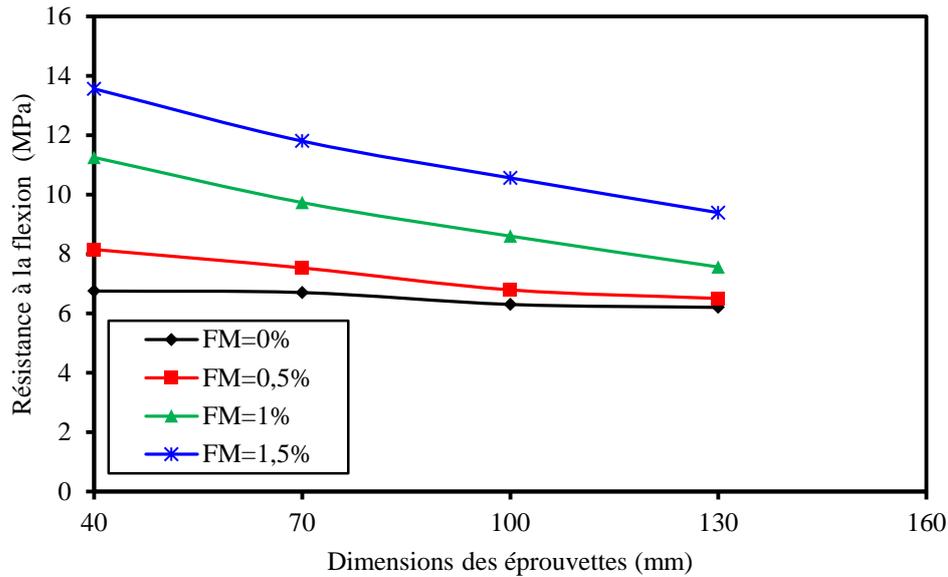


Figure 5.5 : Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs épaisseurs et fibrées de 1.5% de fibres métalliques.

La variation de la résistance à la flexion représentée par le pic de chargement en fonction des épaisseurs des poutres est illustrée sur la figure 5.6. Il est clair que cette résistance est très sensible à la taille de l'élément et autant que le pourcentage de fibres augmente. Lorsque la taille de la poutre en béton ordinaire passe de 40 à 130 mm, la résistance diminue de 1 MPa.

Cette chute atteint 4 MPa pour les échantillons contenant 1,5% de fibres. Les pentes des courbes de la figure 5.6 montrent une diminution linéaire de la résistance à la flexion à mesure que l'épaisseur du faisceau augmente. Pour chaque épaisseur de 100 mm, la résistance à la flexion du faisceau diminue de 0.7, 2, 4 et 4.6 MPa respectivement pour le BRFM contenant 0, 0.5, 1 et 1.5% de fibres.



**Figure 5.6 :** Variation de la résistance à la flexion en fonction de la taille échantillon.

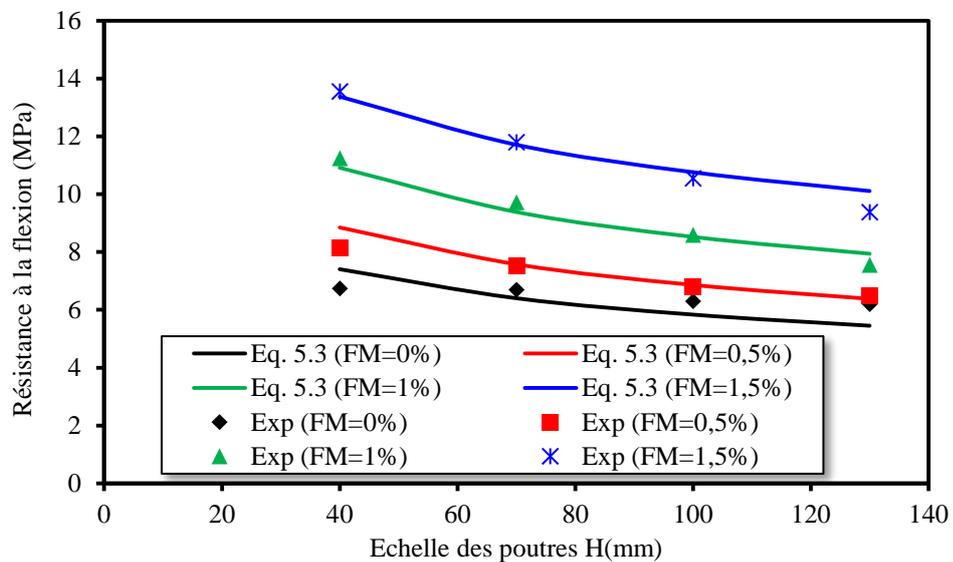
La raison essentielle de l'effet de taille dans le BRFM était la propriété différente de la distribution des fibres. L'effet de paroi dans les échantillons de poutres plus petites favorise l'orientation des fibres qui restent alignées avec la direction de l'écoulement lors de la coulée du béton correspondant à la direction verticale de la surface de la fissure. De plus, une mauvaise orientation des fibres avec un nombre plus faible de fibres a été obtenue pour les échantillons plus grands comme cela a été trouvé et expliqué par Yoo et al. [125].

Pour analyser les résultats obtenus, l'analyse de régression par la méthode des moindres carrés pour les équations (5.1) et (5.2) est utilisée pour trouver les meilleures valeurs d'ajustement de la résistance à la flexion en fonction de la taille de chaque poutre et la teneur en fibres métalliques. La corrélation entre les résultats obtenus selon l'équation (5.1) conduit à utiliser l'expression de la résistance à la traction exprimée par l'équation (4-7) et un paramètre d'échelle  $d_0$  qui sera optimisée en fonction de la méthode des moindres carrés appliquée aux résultats expérimentaux. Le paramètre  $m$  est remplacé par une fonction polynomiale variant en fonction du taux de fibres contenues dans le béton. Une nouvelle expression de l'équation (5.1) est déduite qui exprime mieux l'effet de taille et la teneur en fibres. La nouvelle expression est écrite comme suit :

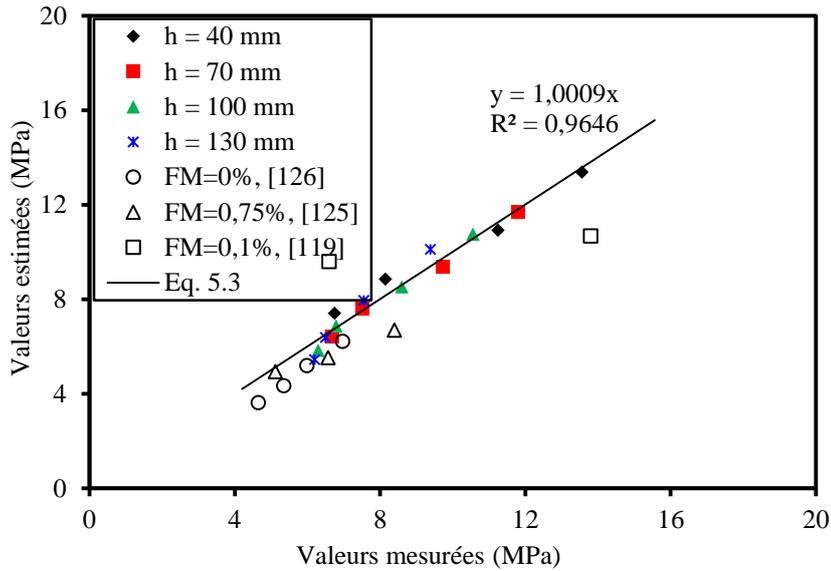
$$S_f = f_t \left( \frac{d_0}{d} \right)^{0.26+0.06 FM-0.05 FM^2} \quad (5.3)$$

Où  $f_t$  représente la résistance à la traction donnée par L'équation (4-7), FM est la teneur en fibres, d est la hauteur de la poutre en mm et le paramètre  $d_0$  représente une échelle égale à 1150 mm dans ce cas. La figure 5.7 illustre les résultats obtenus de la résistance à la flexion en fonction de la taille des éprouvettes. Il est très claire, selon ces résultats, que la résistance à la flexion diminue avec l'échelle des éprouvettes et augmente avec le taux de fibres utilisé dans chaque spécimen. Il s'avère que l'équation 5.3 corrèle bien les résultats et donne une précision acceptable en tenant compte et de la taille et du taux de fibres.

La Figure 5.8 illustre une comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs estimées avec l'équation (5.3). Il est clair que cette nouvelle équation corrèle mieux les résultats et prend en compte de manière appréciable l'effet d'échelle et la présence de fibres. Le coefficient de corrélation se rapproche de l'unité avec une valeur de 0,96 et l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées est inférieure à 0,4 MPa.



**Figure 5.7 :** Variation de la résistance à la flexion expérimentale et calculée par l'Equation 5.3 selon la taille des éprouvettes.



**Figure 5.8 :** Comparaison entre les valeurs de résistance à la flexion mesurées et estimées à l'aide de L'équation (5.3).

Pour tester l'équation (5.2), proposée par Bazant, sur les résultats obtenus, la valeur de la résistance à la traction  $f_t$  est exprimée par l'équation (4.7) et les paramètres B et  $d_0$  sont optimisés par la méthode des moindres carrés afin d'obtenir la meilleure corrélation. Les résultats de cette analyse donnent une nouvelle expression qui s'écrit comme suit :

$$S_f = \frac{(3+0.44 MF-0.4MF^2)f_t}{\sqrt{1+\frac{d}{d_0}}} \quad (5.4)$$

Où  $f_t$  est exprimé par l'équation (4.7), le paramètre  $d_0$  prend une valeur de 70 mm en fonction des résultats du test et  $d$  exprime la taille de la poutre en mm. La variation de la résistance à la flexion, en fonction de la taille des poutres et le pourcentage de fibre qu'elles contiennent, est illustrée sur la figure 4.9. Selon ces résultats, l'effet d'échelle sur la résistance à la flexion est plus prononcé pour les bétons les plus fibrées. Ainsi le béton de fibre est plus sensible à l'effet d'échelle que le béton ordinaire. En plus, l'équation 5.4 proposée donne un ajustement des valeurs expérimentales presque parfait surtout pour les poutres les plus fibrés.

La figure 5.10 illustre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par l'équation (5.4) où le coefficient de corrélation atteint 0,9699 et l'erreur quadratique moyenne prend une valeur moyenne de 2,2 MPa.

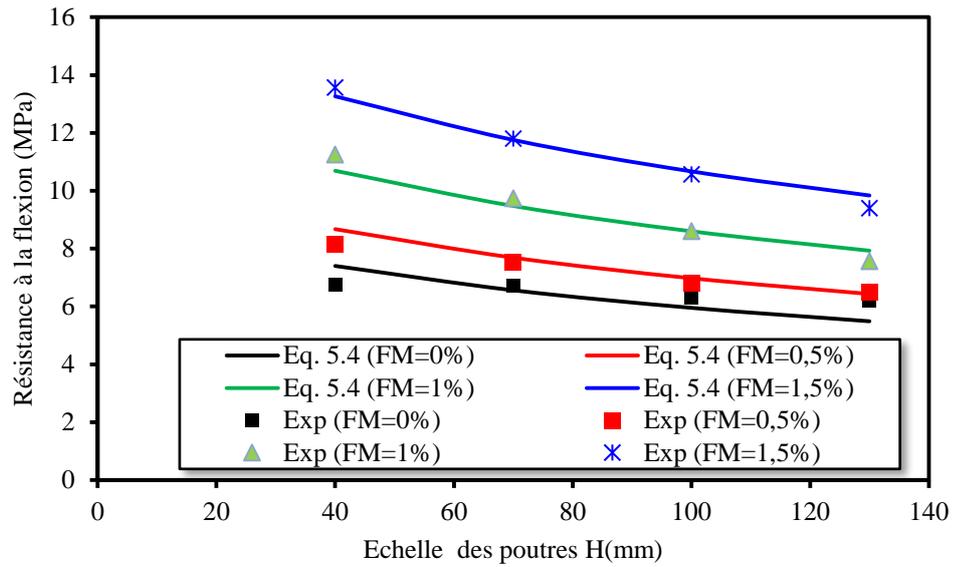


Figure 5.9 : Variation de la résistance à la flexion expérimentale et calculée par l'Equation 5.4 selon la taille des éprouvettes.

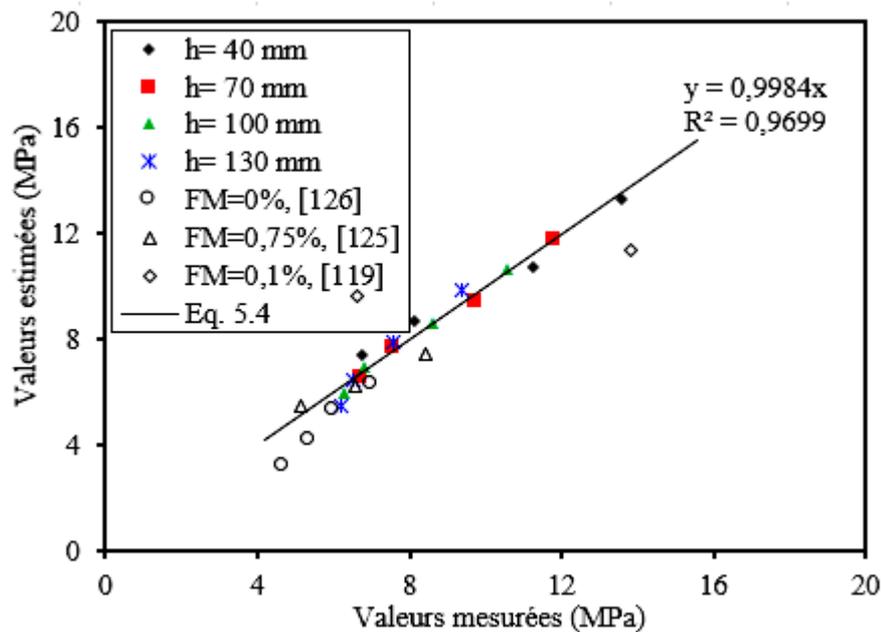


Figure 5.10 : Comparaison entre les valeurs de la résistance à la flexion mesurées et estimées à l'aide de L'équation (5.4).

On remarque que les équations (5.3) et (5.4) corrént assez bien aux données. Il est démontré que la résistance à la flexion des petites poutres est directement liée à l'effet de la taille et à la quantité de fibres présentes dans le mélange du béton. Ces fibres jouent un rôle important dans la résistance à la fissuration ainsi que pour empêcher sa propagation. La forme polynomiale de la présence des fibres introduites dans les deux équations rend le

BRFM plus efficace en résistance à la flexion et plus sensible à l'effet de taille. Ceci est plus clair sur les résultats présentés sur les figures 5.7 et 5.9 où les variations sont plus importantes en fonction de la taille de l'échantillon en particulier pour un béton contenant un dosage important de fibres.

Afin de vérifier l'aptitude de ces deux relations à prédire les résistances à la flexion en tenant compte de l'effet de taille du béton fibré, certains résultats rapportés par d'autres chercheurs sont utilisés. Grégoire et al. [126] ont rapporté des résultats expérimentaux de résistance à la flexion de plusieurs poutres sans fibres et de tailles différentes. Trois poutres en béton armé à 0,75% de fibres et 50, 100 et 150 mm de profondeur sont testées [125]. Deux poutres à deux dimensions et 0,1% de fibres ont également été testées pour la résistance à la flexion [119]. Les résultats des trois études montrent que la taille de la poutre a un grand effet sur la résistance à la flexion du BRFM. Les figures 5.8 et 5.10 montrent que les résultats de la résistance à la flexion expérimentale sont bien en corrélation avec les valeurs estimées par les équations (5.3) et (5.4). La distribution des résultats est proche de la droite  $Y = X$  ; ce qui justifie le coefficient de corrélation élevé.

Les résultats expérimentaux de trois auteurs et ceux qu'on trouve dans ce travail sont proches de celles exprimées par les deux équations et justifient le coefficient de corrélation trouvé. Ces deux équations méritent d'être vérifiées et ajustées pour avoir un outil plus simple pour tenir compte de l'effet de taille dans la poutre en BRFM.

### *5.3. Effet de la longueur des poutres (L)*

L'étude de l'effet de la longueur des poutres a été entreprise par la réalisation de différentes poutres de même section (10x10mm) et ayant différentes longueurs ( $L=200, 400, 600$  et  $800$  mm). Les mini-poutres contiennent différents taux de fibres à savoir 0%, 0.5%, 1% et 1.5%. Après 28 jours de cure, les spécimens sont soumis à l'effet de flexion trois points en suivant l'incrément de la force avec la flèche à mi-portée. Les résultats de déflexion des éprouvettes à 28 jours de différentes longueurs et pour chaque type du béton sont présentés dans les figures 5.11, 5.12, 5.13 et 5.14.

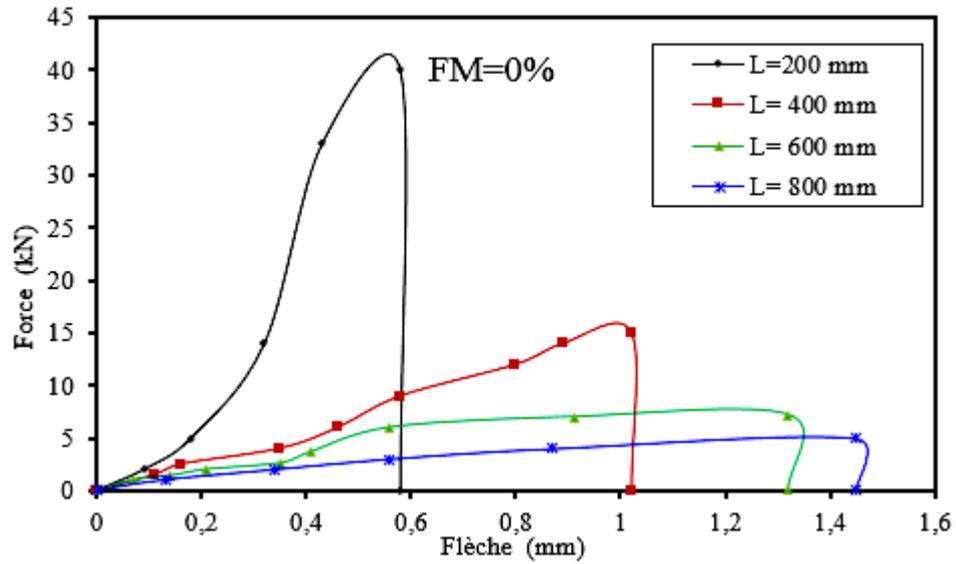


Figure 5.11 : Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton sans fibres métalliques.

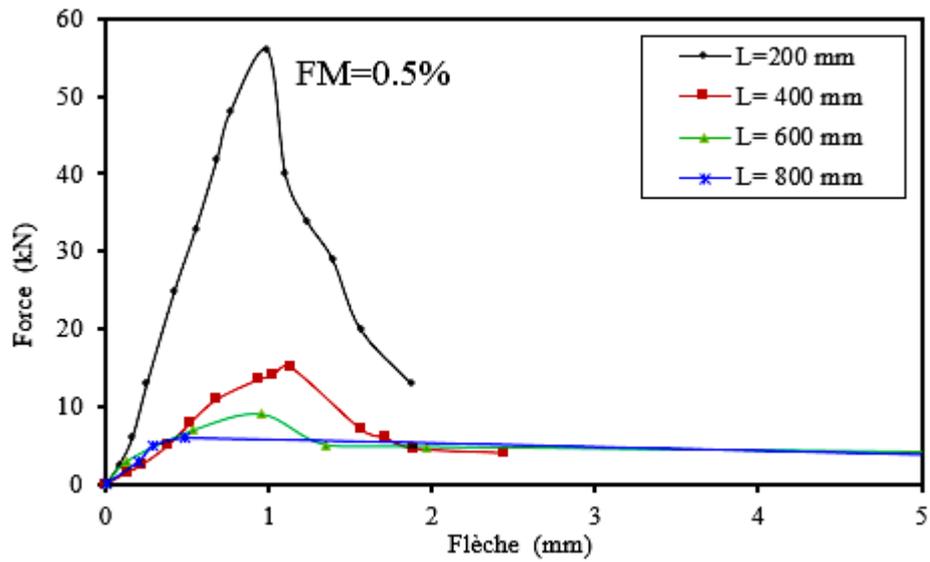
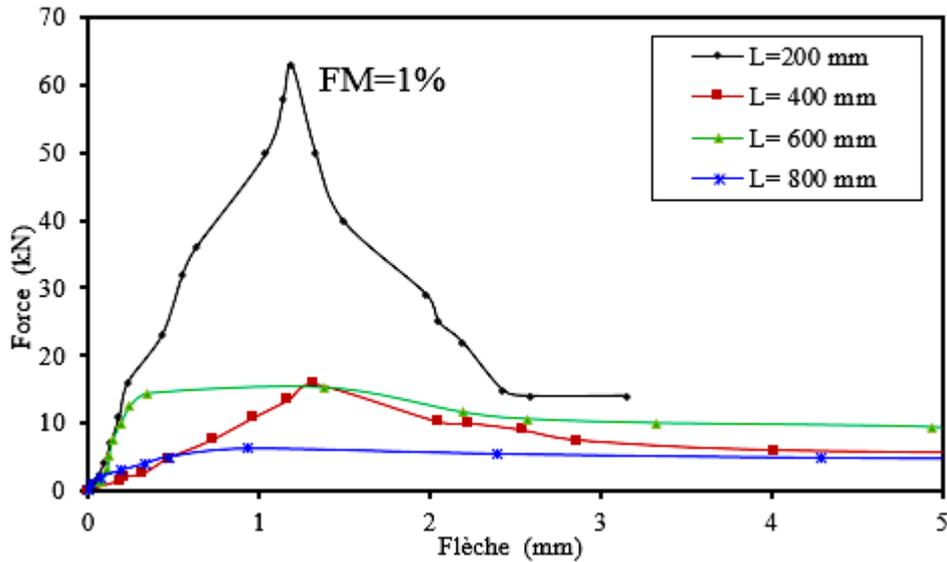
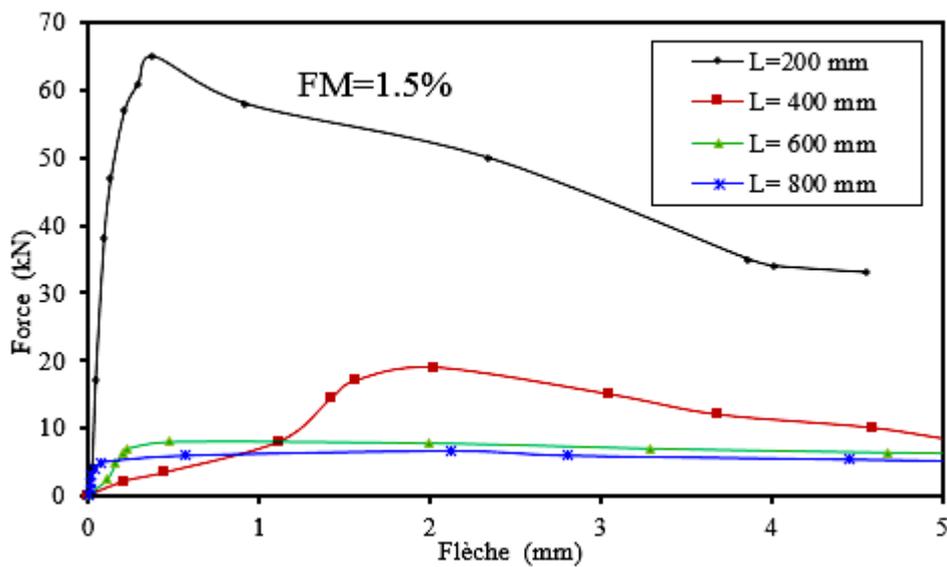


Figure 5.12 : Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton avec 0.5% de fibres métalliques.



**Figure 5.13 :** Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton avec 1% de fibres métalliques.



**Figure 5.14 :** Courbe charge-flèche des mini-poutres ayant plusieurs longueurs et en béton avec 1.5% de fibres métalliques.

Il a été montré [127] que l'introduction d'une variation statistique sur la résistance fait en sorte que la magnitude du domaine écrouissant ne varie pas linéairement avec l'augmentation de la longueur de l'éprouvette. De ce fait, il est tout à fait compréhensible que plus la longueur d'un élément devient grande plus la probabilité d'avoir une zone fragile augmente.

Des résultats trouvés sur l'effet des longueurs des travées sur la résistance à la flexion, les valeurs maximales des forces appliquées sont sélectionnées et les résistances à la flexion correspondantes en utilisant les lois de la RDM. La figure 5.15, présente leurs variations selon le taux des fibres et leurs dimensions. Il s'avère que la résistance à la flexion diminue avec l'élançement de la poutre et s'améliore avec le pourcentage des fibres. L'effet de la longueur des poutres favorise l'apparition des défauts et les microfissures lors du chargement ce qui diminue la résistance totale. Par contre, la présence des fibres contribue à la couture des fissures et à la résistance à la flexion.

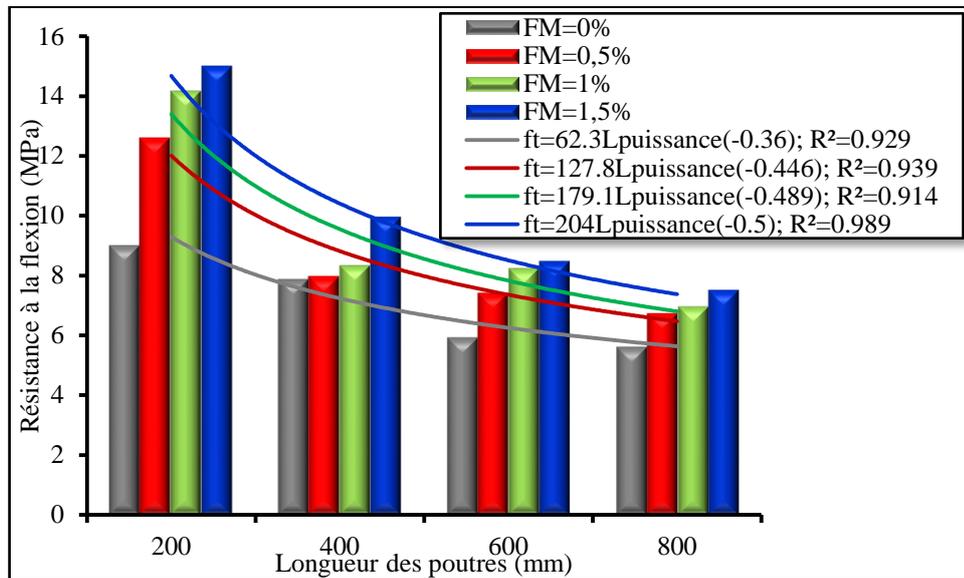


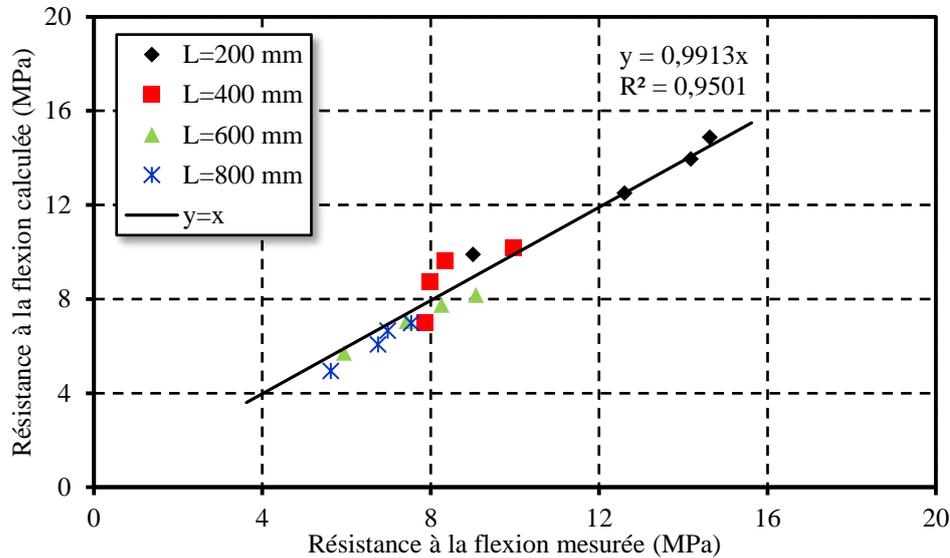
Figure 5.15 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la longueur des poutres des bétons fibrés.

La variation des résistances à la flexion obtenues prend des formes hyperboliques en fonction de la longueur des mini-poutres comme c'est illustré sur la figure 5.15. En faisant une régression linéaire de l'ensemble des résultats avec la méthode des moindres carrés, on a sélectionné une expression qui donne le plus petit écart quadratique moyen. Cette expression s'écrit sous la forme suivante :

$$S_f = \frac{140 + 140 \ln(1 + FM)}{L^{0.5 + 0.05 \ln(1 + FM)}} \quad (5.5)$$

Où  $L$  est la longueur totale de la poutre en mm,  $FM$  est le pourcentage de fibres dans le béton et les coefficients de l'équation sont obtenus par régression en ajustant les résultats trouvés. Une erreur moyenne de 0.63 MPa est obtenue pour l'ensemble des données traitées.

La figure 5.16 illustre une comparaison entre les résistances expérimentales et les résistances obtenues par l'équation 5.5. Un coefficient de corrélation  $R^2$  atteint une valeur de 0.95 ce qui justifie le choix de l'expression et conforte la précision du modèle.



**Figure 5.16 :** Comparaison entre les résistances à la flexion mesurées et calculées pour différentes longueurs des poutres.

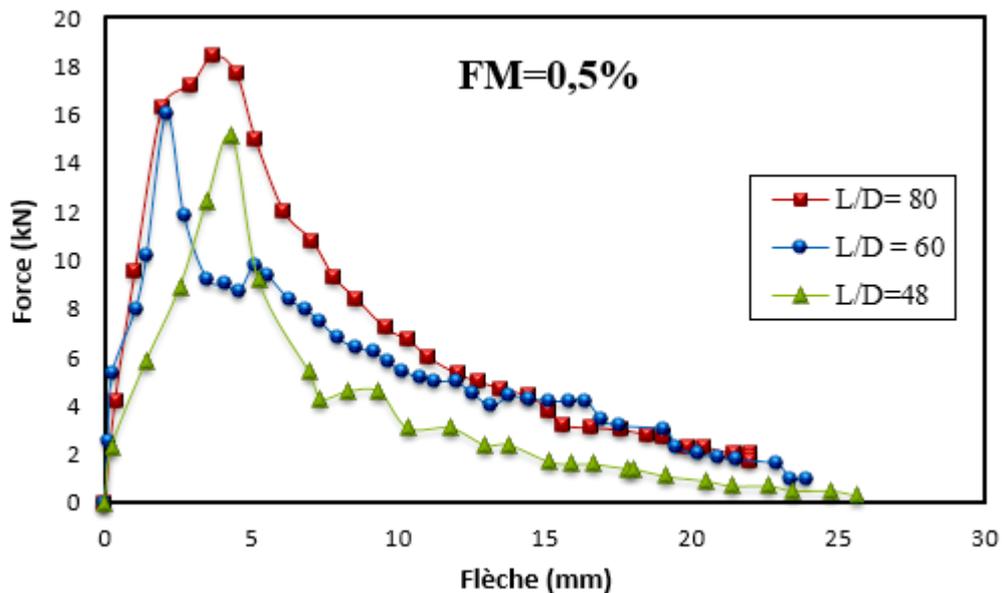
#### 5.4. Effet de l'élanement de fibre ( $L/D$ )

À ce jour, de nombreuses études ont évalué l'effet des propriétés des fibres et des matrices sur les comportements en traction et en flexion de BRFM [36, 69, 96]. Entre autres, l'augmentation de l'élanement des fibres (ou le rapport entre la longueur et le diamètre de fibre) a été l'une des méthodes les plus convaincantes pour améliorer les performances en flexion. Ces performances comprennent et la résistance et la capacité d'énergie de rupture en augmentant la surface de liaison efficace entre la fibre et la matrice aux surfaces des fissures. Cependant, une mauvaise dispersion des fibres et leur condensation peuvent se produire lorsque l'élanement et la longueur des fibres augmentent [56], ce qui peut entraîner une détérioration des performances en flexion. Pour cette raison, la performance en flexion de béton de fibres doit être étudiée en fonction de la longueur de fibre.

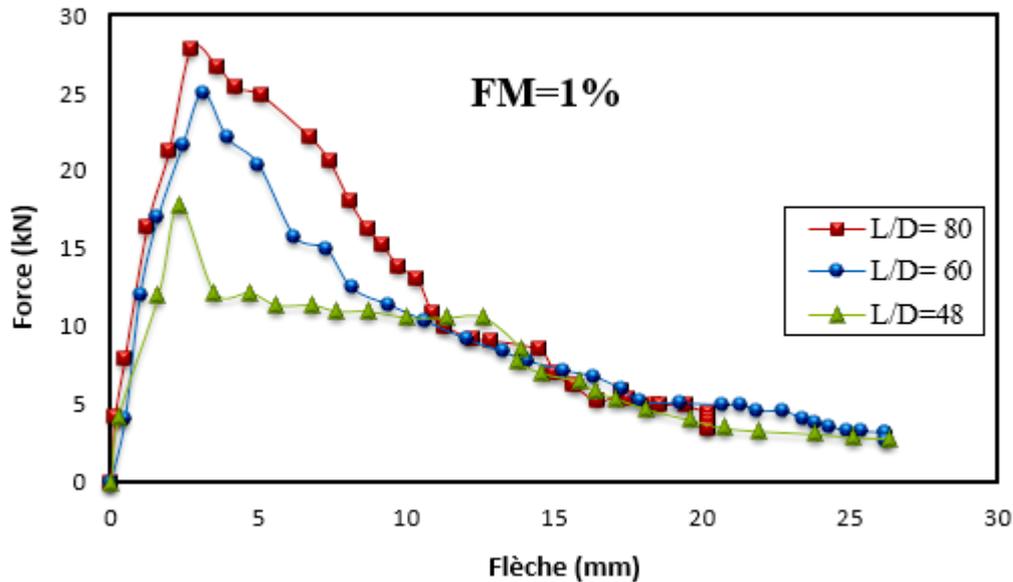
Plusieurs recherches [100, 128, 129, 130, 131, 132] ont étudié l'effet des fibres sur le comportement en flexion de poutres en béton armé avec différents types de fibres. Yoo et al. [100] ont rapporté que l'utilisation de fibres métalliques (FM) longues améliore le comportement en flexion et l'énergie de fracture en augmentant la zone de liaison entre la matrice et la fibre, par rapport à celle de fibres courtes. De plus, Wille et al. [131] ont mentionné que les FM torsadées avec un élanement plus élevé conduisent à une

amélioration des performances de traction telles que la résistance et les capacités de déformation, même si une faible quantité de fibres a été utilisée par rapport aux FM lisses avec un élanement faible. De plus, Yoo et Yoon [132] ont étudié expérimentalement et numériquement la réponse structurale de séries de BRFM avec différentes fibres et ont conclu qu'une augmentation de la longueur des fibres lisses et l'utilisation de fibres torsadées peuvent entraîner une amélioration de la réponse et de la ductilité post-pic. A partir de ces observations, on peut conclure que la quantité de fibres nécessaire pour fournir un certain niveau de performance en traction ou en flexion pourrait être réduite en augmentant la longueur des FM lisses ou en utilisant des FM torsadés.

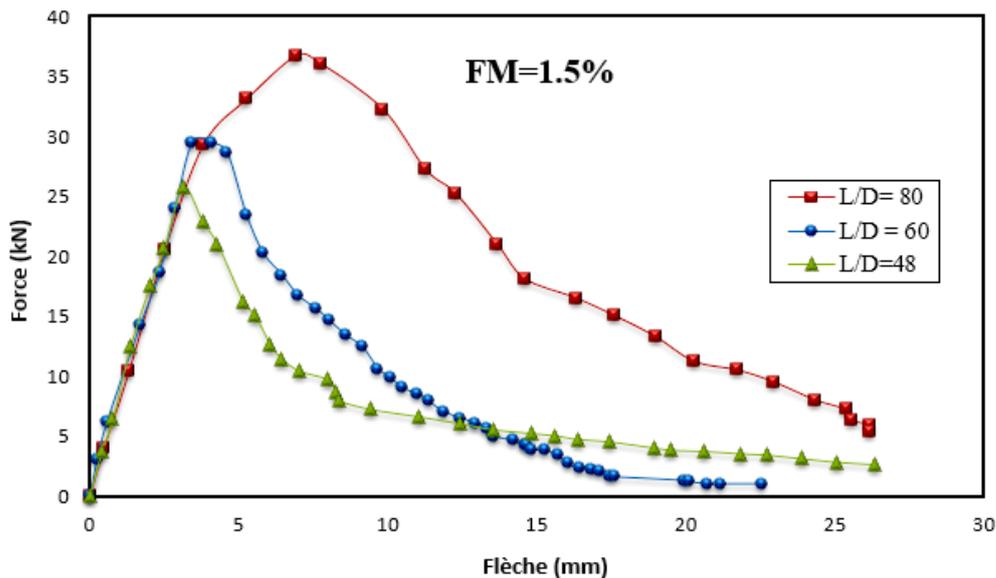
L'objectif est de déterminer l'effet des dimensions de la fibre sur le comportement écouissant de l'élément. L'effet du diamètre des fibres sera examiné en le faisant varier de 0.625 et 0.83 à 1.04 mm tout en conservant les autres paramètres constants. Comme il s'agit uniquement de déterminer l'effet du diamètre, il est donc nécessaire de bloquer les autres variables. Il est intéressant de constater que le diamètre des fibres joue un rôle important sur le comportement écouissant de l'élément pour une longueur de fibre donnée ( $L_f=50$  mm). Les résultats de l'effet de diamètre des fibres pour différents dosages en fibres (0.5, 1 et 1.5%) sont représentés sur les figures 5.17, 5.18 et 5.19.



**Figure 5.17 :** Courbe force-flèche des mini-poutres en béton fibré de 0.5% de fibres ayant différents L/D.



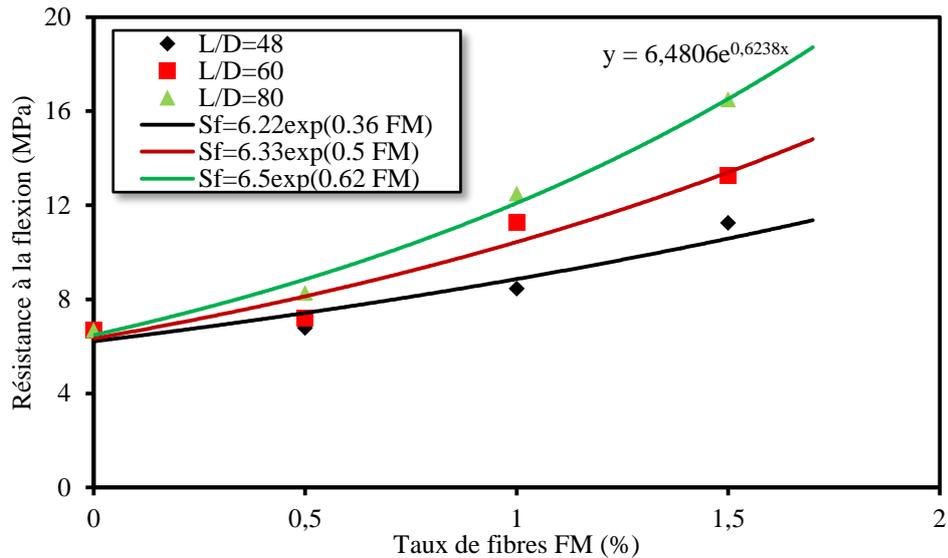
**Figure 5.18 :** Courbe force-flèche des mini-poutres en béton fibré de 1% de fibres ayant différents L/D.



**Figure 5.19 :** Courbe force-flèche des mini-poutres en béton fibré de 1.5% de fibres ayant différents L/D.

D'après les résultats ci-dessus, il est bien noté que l'élançement des fibres octroie aux mini-poutres une grande capacité à la déformation ainsi qu'une résistance à la flexion très élevée. Plus les fibres sont longues plus elles s'adhèrent à la pâte et plus elles s'opposent à la fissuration. Les résultats de l'effet d'échelle (L/D) des fibres en fonction des dosages (0,5, 1 et 1,5%) sont représentés sur la figure 5.20.

Suite à ces résultats, on peut dire que l'élançement 80 donne la meilleure compatibilité mécanique avec le BRFM vis-à-vis de la résistance à la flexion. L'influence des fibres métalliques sur le comportement à la flexion est analysée suivant la teneur et l'élançement de fibre, on peut dire que l'effet d'échelle des fibres a une influence appréciable sur la charge de rupture des poutres quelque soit le dosage utilisé. L'augmentation de l'élançement de 48 à 80 donne une augmentation de la charge de rupture.

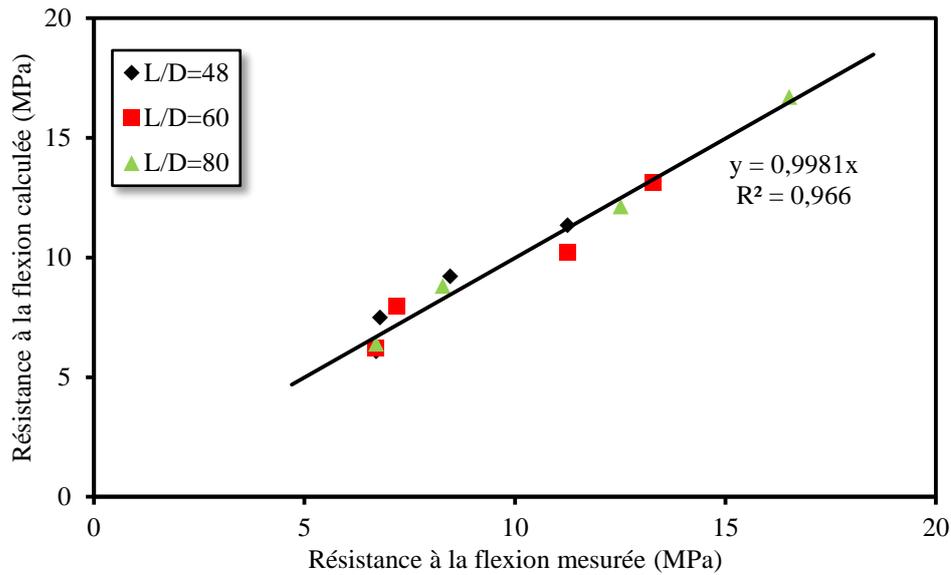


**Figure 5.20 :** Variation de la résistance la flexion en fonction de la teneur en fibre pour différents L/D utilisés.

Les résistances à la flexion pour des bétons fibrés de différentes fibres métalliques sont représentées sur la figure 5.20. Cette résistance varie d'une façon exponentielle avec la teneur en fibres. La méthode des moindres carrées appliquée à l'ensemble des résultats obtenus permet de trouver une forme généralisée exprimée par la relation ci-dessous :

$$S_f = \left(5.6 + 0.01 \frac{L}{D}\right) e^{\left(0.08 + 0.007 \frac{L}{D}\right) FM} \quad (5.6)$$

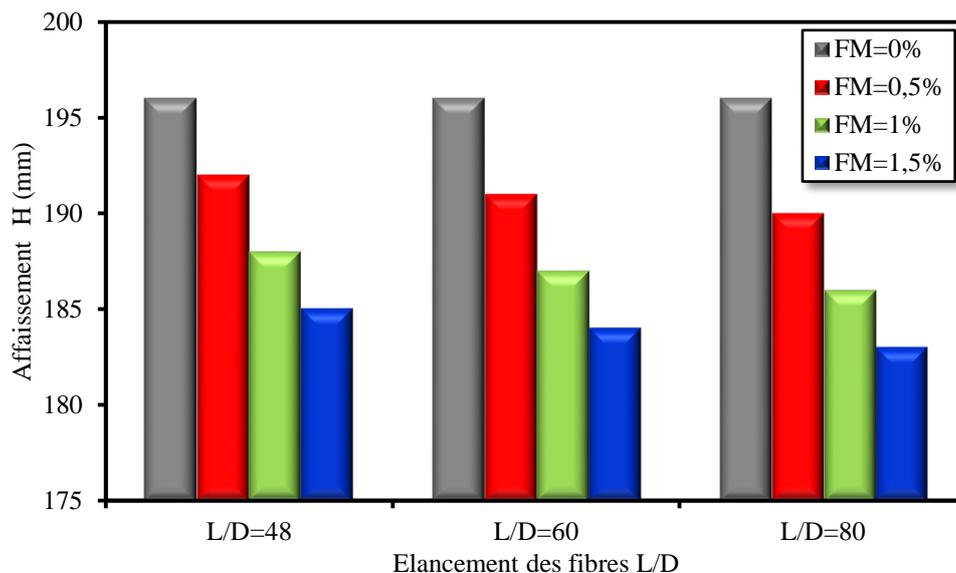
La figure 5.21 montre la corrélation entre les résistances mesurée et calculées par l'équation 5.6. Avec un coefficient de corrélation de  $R^2=0.96$  et un écart quadratique moyen de 0.6 MPa, l'expression de l'équation 5.6 témoigne de son bon choix et sa précision de calcul.



**Figure 5.21 :** Comparaison entre les résistances à la flexion mesurées et calculées par l'équation 5.6 pour différents élancement des fibres.

### 5.5. Affaissement du béton en fonction du L/D de fibre

Les résultats de l'ouvrabilité des bétons renforcés de fibres métalliques de différents élancements (L/D) sont représentés dans la figure 5.22. La comparaison entre les valeurs de l'ouvrabilité des bétons renforcés de fibres métalliques montre que l'ouvrabilité diminue légèrement avec l'augmentation de l'élancement de fibre pour une même longueur de fibre (50 mm). On remarque que l'ouvrabilité du béton pour les fibres d'élancement L/D de 80 est légèrement plus faible que celle de 48 et de 60.



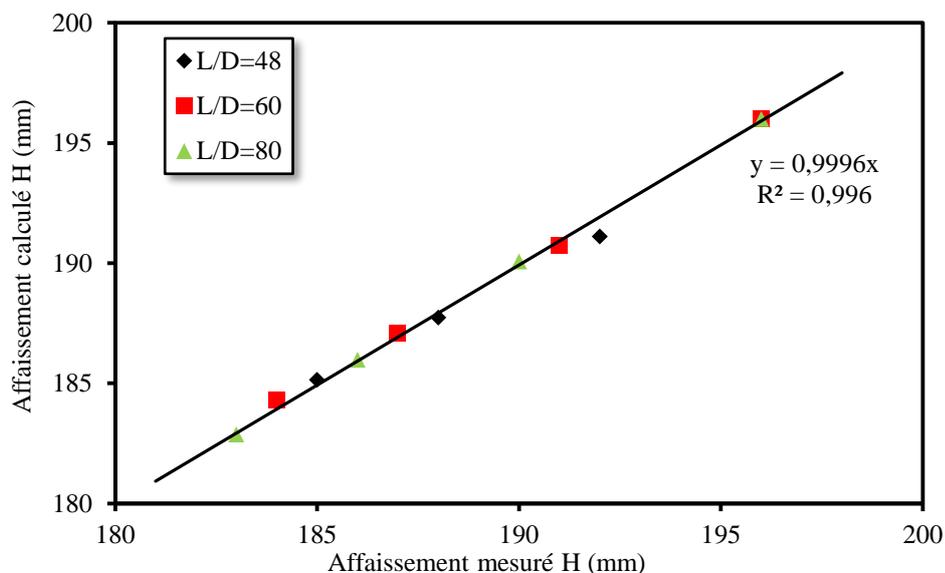
**Figure 5.22 :** Affaissement des bétons renforcés avec des fibres de différents élancements.

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 [133, 134, 135], ont montré que le rapport L/D des fibres cylindriques joue un rôle principal dans la maniabilité du béton fabriqué. 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 L/D donné, la maniabilité diminue lorsque la longueur de la fibre augmente. Cette constatation est valable pour d'autres types de fibres (fibres de verre, fibres de carbone).

L'analyse des résultats obtenus a permis de déduire une relation simple qui prédit l'affaissement du béton en fonction de la teneur en fibres ainsi que de leurs élancements. La relation ci-dessous exprime cette variation comme suit :

$$H(mm) = \frac{196}{(1+FM)^{0.042+0.00042\frac{L}{D}}} \quad (5.7)$$

La valeur 196 représente l'affaissement du béton témoin en mm. L'erreur quadratique entre l'affaissement mesuré et calculé ne dépasse pas 0.3mm. La figure 5.23 est une illustration parfaite de la fiabilité de l'équation 5.7 qui donne un coefficient de corrélation voisin de l'unité.



**Figure 5.23 :** Comparaison entre l'affaissement mesuré et calculé par l'équation 5.7 pour différents élancement des fibres.

## ***5.6. Conclusion***

Ce travail nous a permis d'étudier l'effet d'échelle des éprouvettes en béton fibré sur la résistance à la flexion. L'échelle, des fibres caractérisées par leur élancement, a été aussi traité à l'état frais par l'essai d'affaissement et à l'état durci par l'essai de déflexion. Il a été prouvé par des mesures expérimentales que l'échelle des fibres joue un rôle primordial pour caractériser les propriétés d'un béton fibré. En plus, les dimensions des éléments de construction possèdent un effet supplémentaire caractérisant l'effet d'échelle sur les propriétés mécanique de ce type de béton.

## *Conclusions Générales*

## Conclusions Générales

L'objectif principal de ce travail est le renforcement du béton par les fibres métalliques, et plus particulièrement l'influence de l'effet d'échelle sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton. Pour cela, différents corps d'éprouvettes avec plusieurs dosages en fibres ont été réalisées. Il faut noter que les fibres utilisées sont des fibres a crochées à l'extrémité de 50 mm de longueur avec un élancement variable de 48, 60, 80.

D'après les résultats expérimentaux réalisés durant cette étude, on a pu établir des conclusions synthétisées somme suit :

- L'augmentation des fibres diminue la maniabilité du béton ; cette diminution nécessite l'utilisation d'un dosage approprié de superplastifiant pour obtenir la même consistance du béton. La présence de 1,5% de fibres a besoin de deux fois la dose de superplastifiant par rapport au béton ordinaire.

- La résistance à la compression est peu influencée par la teneur en fibres où une légère augmentation est constatée. A 28 jours, le gain de résistance est d'environ 5, 14 et 21%, pour une teneur en fibres de 0,5, 1 et 1,5%, respectivement.

- L'ajout de fibres conduit à une augmentation significative de la résistance à la flexion, par exemple l'addition de 1,5% de fibre produit une résistance à la flexion 2,2 fois plus grande par rapport à celle du béton non fibré. Cette augmentation est d'environ 45% en présence de 1% de fibre.

- L'ajout de fibre au béton améliore son comportement mécanique. Le béton ordinaire se caractérise par une rupture fragile sans déformation au-delà de la charge maximale. D'autre part, le BRFM continue à se déformer après le début de la fissuration par flexion mesurable et en gardant une résistance à la flexion acceptable.

- Une nouvelle relation de résistance à la flexion pour le BRFM est présentée et exprimée en fonction du contenu FM. Cette nouvelle relation s'avère plus performante à mettre en corrélation les résultats obtenus et de tenir en compte de la présence des fibres dans le béton.

- L'effet d'échelle sur la résistance à la flexion est exprimé en portant des modifications sur les relations présentées par Weibull et Bazant. Cette résistance est fonction

de la teneur en fibres et de la taille de la poutre. Les deux équations 5.3 et 5.4 présentées montrent une concordance avec les résultats expérimentaux obtenus avec un coefficient de corrélation proche de l'unité.

- Les relations proposées pour l'effet de taille restent valables dans le domaine des résultats obtenus. Ils doivent être testés pour d'autres résultats pour apporter quelques corrections.
- Il a été conclu que l'énergie de rupture est fortement liée à la teneur en fibres. Les résultats obtenus montrent que 1% de fibre métalliques offre au béton une énergie de rupture supplémentaire de  $610 \text{ J/m}^2$ .
- La résistance à l'abrasion des bétons contenant des fibres métalliques est remarquablement améliorée en fonction du volume de celle-ci; par rapport au béton non fibré
- L'ajout de fibres réduit le retrait total proportionnellement au dosage de fibres utilisées. A 28 jours, un dosage de fibres de 0.5, 1 et 1.5% engendre une baisse de retrait respectivement de 26, 40 et 46%.

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 du 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.
- Tester les relations obtenues de l'effet d'échelle sur des bétons aux granulats recyclés. De même, des essais sont indispensables sur les éléments pré-fissurés avec des entailles.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- 1 Aitcin, P. C., "Developments in the application of high-performance concretes", *Constr.Build. Mater.*, Vol. 9, No. 1, 1995, pp.13-17.
- 2 Béton – Définition – et Explications, Encyclopédie scientifique en ligne : [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net), 2020.
- 3 Hamelin, P., "bétons de fibres. Les composites fibres ciment", Journées de l'Association Française de Recherches et d'essais sur les matériaux de construction, Lyon 1991, 39p.
- 4 ACI committee 544, "State of the art report on fibre-reinforced concrete", *concrete International*, Report ACI N° 544.IR.82, Vol. 4, No.5, May 1982, pp.9-30.
- 5 Fattuhi, N.I., "Properties of steel fibre reinforced cement-based matrices", Thesis of Master of Eng. University of Sheffield, April 1974, 357pages.
- 6 Le béton fibré : types, avantages et utilisations, <https://www.toutsurlebeton.fr>, 2020.
- 7 ACI committee 544, "State of the art report on fibre-reinforced concrete", *ACI*, Vol. 70, No 11, November 1973, pp.729-744.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Mimouni, M., "Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de construction ", *Algérie équipement*, No. 15, Sept.1994.
- 12 Saidani, M., "Behaviour of different types of fiber reinforced concrete without admixture", *Eng. Struct.*, Vol. 113, 2016, pp. 328-334.
- 13 Beaudoin J. J. "Béton renforcé de fibres" Institut de recherche en construction (IRC), Conseil National de Recherche, Canada, 1982, 04 p.
- 14 Shah, S.P, Naaman,A.E., "Mechanical properties of glass and steel fiber reinforced mortar", *ACI, Journal*, U.S.A., Vol. 73, No.1, Jan 1976, pp. 50-53.
- 15 Ledru, Y., "Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009, 242 pages.
- 16 Andra, "Les matériaux cimentaires", *Référentiel matériaux*, tome 3, Rapport Andra, 2005.

- 17 Guillaume Camps, "Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton", thèse doctorat, Université paulsabatie toulouse 3, 2008, 286 pages.
- 18 Vanuat, M., "Les bétons armés de fibres", Le moniteur, No.3, Janvier 1976, pp.55-58.
- 19 SusheelKalia, B.S. Kaith, Inderjeetkaur, "Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in Polymer composites", A Review, Vol.49, No. 7, 2009, pp. 1253-1272.
- 20 Soroushiah, P.,Shashidhara, "Statistical Evaluation Of mechanical and Physical properties of Cellulose Fiber reinforced Cement Composites", ACI, materials journal, March-April 1985, pp. 172-179
- 21 Vinson, K.D., David, J.I., "Specialty Cellulose Fibers for cement reinforcement", SP- 124, ACI, Detroit, 1990, pp.1-18
- 22 Châtain, M., "Matériaux composites : présentation générale", Techniques de l'ingénieur, Plastiques et composites, AM5000-1.2001.
- 23 Gherdaoui, M., "renforcement des ouvrages en béton arme soumis aux actions gravitaires avec matériaux composites", thèse de doctorat Université de Guelma, 2018, 142 pages.
- 24 Balaguru, P., Nanni, A.,Giancaspro, J. "FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures", a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. Taylor & Francis, London, UK, 334 p, 2009.
- 25 Lawrence, C., Bank., "Composites for construction: structural design with FRP materials", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006, 560 pages.
- 26 Antar, K., "Etude et analyse des ouvrages d'art réhabilités parles matériaux composites", thèse de doctorat Université de Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2019, 127 pages.
- 27 Bentur, A., Mindess, S., "Fiber reinforced concrete", Elsevier Applied Science, London, 1990.
- 28 Paillere A.M., "Le béton de fibres métalliques, États actuels des connaissances", Annales de l'ITBTP, série béton, 302, No. 515, 1993, pp. 39-68.
- 29 Association béton Québec, "Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton", 2005, 38 pages.
- 30 Hugues B.P., Fattuch N.I., "The workability of steel fiber reinforced concrete", GB: Mag. Concr. Res., Vol. 28, No. 96, 1976, pp. 157-161.
- 31 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 Concr. Res., Vol. 31, 2001, pp. 1793-1798.
- 32 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.
- 33 Johnston, C.D., "Fiber-Reinforced Cements and Concretes", Gordon and Breach

- Science Publishers, Amsterdam, 2001, 368 pages.
- 34 Swamy, R.N., Mangat, P.S., "Influence of fiber geometry on the properties of steel fibre reinforced concrete", *Cement Concr. Res.*, Vol. 4, No. 3, 1974, pp. 307-313.
  - 35 Snyder, M.J., Lankard, D.R., "Factors affecting the flexural strength of steel fibrous concrete", *ACI Journal*, Vol. 69, No. 2, 1972, pp. 96-100.
  - 36 Chu, S.H., Li, L.G., Kwan, A.K.H., "Fibre factors governing the fresh and hardened properties of steel FRC", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 186, 2018, pp. 1228–1238.
  - 37 Rossi, P., "Les bétons de fibres métalliques", *Presse de l'ENPC*, Juin 1998, 309 pages.
  - 38 Abdul Ghaffar, Amit S. Chavhan, Dr.R.S.Tatwawadi, "Steel Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Vol. 9, No. 15, Mar2014, pp. 797
  - 39 Majumdar, A.J., Nurse, R.W., "Glass Fibre Reinforced Cement", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 15, 1974, pp 107-127.
  - 40 Marsh, H. N., Clarke, L. L., " Glass fiber reinforced cement base materials", *ACI, International Symposium, SP 44-14*, 1974, pp. 247-264.
  - 41 Zollo, R.F., "Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development", *Cem. Concr. Compos*, Vol. 19, No. 2, 1997, pp. 107–122.
  - 42 Rossi, P., Harrouche, N., Lemaou, F., "Comportement mécaniques des bétons armé de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", *Annales de L'ITBTP*, No. 479, 1989.
  - 43 Fritih, Y., "Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton Autoplaçant armé", thèse doctorat, Université Toulouse, 2009, 246 pages.
  - 44 Dreux, G., Festa, J., "Nouveau guide de béton et ses constituants", Edition Eyrolles, 8ème édition 1998, troisième tirage 2007, 418 pages.
  - 45 Makhoulf, N., "Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux", mémoire de magister université de Tizi Ouzou, 2010, 82 pages.
  - 46 Fibres d'acier Applications béton projeté, [www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com), 2011.
  - 47 Soufeiani, L., Raman, S.N., Jumaat, M.Z.B., Alengaram, U.J., Ghadyani, G., Mendis, P., "Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading", a review, *Eng. Struct.* Vol.124, 2016, pp. 405–417.
  - 48 Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., Raghavan, B., "Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes", *Compos. Part B: Eng.* Vol. 86, 2016, pp. 214– 220.
  - 49 Casanova, P., "bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à 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.
  - 50 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.
- 51 Odelberg, G., "Producing and Promoting of Swedish steel fibers to the market", Steel Fiber Concrete Seminar Stockholm, June 1985, pp. 185-197.
- 52 Pourbaba, M., Asefi, E., Sadaghian, H., Mirmiran, A., "Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 175, 2018, pp. 402–410.
- 53 Wu, Z., Khayat, K.H., Shi, C., "How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC", *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 90, 2018, pp. 193–201.
- 54 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 pages.
- 55 Serna Ros, "Procédé pour la fabrication de bétons de fibres métalliques", *Materials de Construction*, Vol. 34, No. 194, 1984.
- 56 Song, P. S., Hwang, S., "Mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 18, 2004, pp. 669-673.
- 57 Rui Ma, Liping Guo, Shaoxiong Ye, Wei Sun, Jiaping Liu, "Influence of hybrid fiber reinforcement on mechanical properties and autogenous shrinkage of an ecological UHPFRCC", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 31, No. 5, 2019, 04019032.
- 58 Wu, Z., Shi, C., He, W., Wu, L., "Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra-high performance concrete", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 103, 2016, pp. 8–14.
- 59 Dardare, J., " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène ", In : fibre reinforced cement and concrete, RILEM Symposium, Edited by A. NEVILLE, Lancaster, Construction Press., 1975, pp.227-235.
- 60 Abdou, K., "Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire", thèse doctorat, université Mentouri Constantine, 2007, 151 pages.
- 61 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.
- 62 Le Hoang, A., Fehling, E., "Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance concrete", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 153, 2017, pp. 790–806.
- 63 Park, J.J., Yoo, D.Y., Park, G.J., Kim, S.W., "Feasibility of reducing the fiber content in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under flexure", *Materials*, Vol. 10, No. 2, 118, 2017.
- 64 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.
- 65 Edington, J., "Steel fiber reinforced concrete", Thesis for the degree of PhD, University of Surrey, England, 1973, 352 pages.
- 66 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.
- 67 Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., "Concrete: microstructure, properties and materials", McGraw-Hill, Columbus, USA, 2006.
- 68 HU.XG., Momber, AW., Yin, YG., "Hydro-abrasive erosion of steel fibre reinforced hydraulique concrete", Wear, 2002, Vol. 253, pp. 848-54.
- 69 Nilica,R., Harmuth.H., "Mechanical and fracture mechanical characterization of building materials used for external insulation composite systems", Cement Concr Res., Vol. 35, 2007,pp. 1641-1645.
- 70 Nicholas, J. P., "Abrasion wear, abrasion resistance, and related strength characteristics in concrete, with special reference to concrete pavers", Thesis (PhD). University of the Witwatersrand, Johannesburg2002.
- 71 Dhir, "Near-surface characteristics of concrete: abrasion resistance", Mater. Struct., Vol. 24, 1991, pp. 122–128.
- 72 Alekrish, A.A., Alsayed, S.H., "Shrinkage of Fibre and Reinforced Fibre Concrete Beams in Hot-Dry Climate", Cement Concr. Comp., Vol. 16, 1994, pp.299-307.
- 73 Sounthararajan, V.M., Sivakumar, A., "Drying shrinkage properties of accelerated fly ash cement concrete reinforced with hooked steel fibres",J. Eng. Appl. Sci., Vol. 8,2013, pp.77-85.
- 74 Ahmad, Z., Ibrahim, A., Md., Tahir, P., "Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Reinforced With Oil Palm Trunk Fiber",Int. J. Eng. Sci. Technol., Vol. 2, No. 5, 2010, pp. 1441-1450.
- 75 Belferrag, A., "Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes", thèse Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016, 169 pages.
- 76 Abdou, K., Houari, H., "influence des fibres d'acier sur les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires", Sciences & Technologie B, No. 26, décembre 2007, pp. 43-48.
- 77 Chern, J.C., Young, C.H., "Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete", Int. J.Cem. Compos. Lightweight Concr., Vol. 11, No. 4, 1989, pp. 205-214.
- 78 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.
- 79 Weibull, W., "A statistical theory of the strength of materials", Book, 1939, 45 pages.
- 80 Miled, K., "Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé", thèse de

- docorat, école nationale des ponts et chaussées, 2005, 201pages.
- 81 Bazant, Z.P., "Size effect". *Int. J. Solids Struct.*, 37, 2000, pp. 69–80.
- 82 Kadlecěk V., Spetla Z. "Effect of size and shape of test specimen on the direct tensile strength of concrete", *Matls & Structures, Bulletin RILEM*, No. 36, 1967, pp. 175-184.
- 83 L'Hermite, R., "Influence de la dimension absolue sur la résistance à la flexion". *Annales de l'ITBTP*, Vol. 39, No. 41, 1973, pp. 309-310.
- 84 Bazant, Z. "Introduction aux effets d'échelle sur la résistance des matériaux". *Hermes Science Publications, Lavoisier, France*, 2004.
- 85 Bažant, Z.P., Yavari, A., "Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic–statistical" *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 72, No. 1, 2005, pp.1–31.
- 86 Bazant, Z., "Size effect aspects of measurement of fracture characteristics of quasibrittle material", *Adv. Cem. Based Mater.*, Vol. 4, 1996, pp. 128-137.
- 87 Carpinteri, A., "Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: Two different explanations based on fracture mechanics". *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 25, No. 4, 1989, pp.407–429.
- 88 Carpinteri, A., Chiaia, B., Ferro, G., "Multifractal scaling law for the nominal strength variation of concrete structures". In *Mihashi, H., Okamura, H., Bazant, Z. P., "Size Effect in Concrete Structures"*, London, 1994, pp. 193–206.
- 89 NF P 18-303, Normes Afnor, Bétons – eau de gâchage, aout. 1999, 16 pages.
- 90 NF P18-409, Normes Afnor, Béton avec fibres métalliques, Essai de flexion, avr. 1993, 8 pages.
- 91 NF P 18-404, Normes Afnor, Bétons – Essai d'Etude de Convenance et de Contrôle – Confection et conservation des éprouvettes, déc. 1981.
- 92 NF EN 12350-2. European specification, Testing Fresh Concrete – Part 2: Slump-test, AFNOR Edition, 2012, 18 pages.
- 93 NF EN 12390-3. European specification, Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens, AFNOR Edition. 2012, 18 pages.
- 94 NF EN 12390-5. European specification, testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens, AFNOR Edition. 2012, 18 pages.
- 95 Zhang, P., Li, Q.F., "Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume", *Compos. Part B.*, Vol. 45, No. 1, 2013, pp. 1587–1594.
- 96 Kang, S.T., Kim, J.K., "Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 28, 2012, pp. 57–65.
- 97 Ding, Y., Liu, S., Zhang, Y., Thomas, A., "The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 22, No. 7, 2008, pp. 1462–1470.
- 98 Hamad, A.J., "Size and shape effect of specimen on the compressive strength of

- HPLWFC reinforced with glass fibres". *J. King Saud Univ. Eng. Sci.*, Vol. 26, No. 4, 2015, pp. 373–380.
- 99 Setti, F., Ezziane, K., Setti, B., Negadi, K., "Dimensional variations of cement matrices in the presence of metal fibers", *Int. J. Mater. Metal. Eng.*, Vol. 7, 2013, pp. 742–746.
- 100 Yoo, D.Y., Kang, S.T., Yoon, Y.S., "Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC". *Constr. Build. Mater.*, Vol. 64, 2014, pp. 67–81.
- 101 Yoo, D.Y., Kim, S., Park, G.J., Park, J.-J., Kim, S.W., "Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites". *Compos. Struct.*, Vol. 174, 2017, pp. 375–388.
- 102 Kazemi, M.T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M.H.A, Gholamitabar, M., "Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 142, 2017, pp. 482–489.
- 103 Zhou, R., Chen, H.M., "Mesoscopic investigation of size effect in notched concrete beams : the role of fracture process zone", *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 212, 2019, pp. 136–152.
- 104 Tolêdo Filho, R.D., Sanjuán, M.A., "Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age", *Cement Concr. Res.*, Vol. 29, 1999, pp. 1597–1604.
- 105 Grabois, T.M., Cordeiro, G.C., Filho, R.D., "Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 104, 2016, pp. 284–292.
- 106 Rigaud, S., Chanvillard, G., Chen, J., "Characterization of Bending and Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete Containing Glass Fibers", *HPFRCC 6, RILEM 2012*, pp. 373–380.
- 107 Gillemot, F., Czoboly, E., Havas, I., "Fracture mechanics applications of absorbed specific fracture energy", *Theor. Appl. Fract. Mech.*, Vol. 4, No. 1, 1985, pp. 39–45.
- 108 Awinda, K., Chen, J., Barnett, S.J., "Investigating geometrical size effect on the flexural strength of the ultra-high performance fibre reinforced concrete using the cohesive crack model", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 105, 2016, pp. 123–131.
- 109 Zoran, J., Grdic, Gordana, A., Toplicic, Curcic, Nenad, S., Ristic, Iva, M., Despotovic, "Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 27, 2012, pp. 305–312.
- 110 Chern, J.C., Young, C.H., "Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete", *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.*, Vol. 11, No. 4, 1989, pp. 205–214.
- 111 Kayali, O., Haque, M.N., Zhu, B., "Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash", *Cement Concr. Res.*, Vol. 29, 1999, pp. 1835–1840.
- 112 ASTM C 1074-93, "Standards practice for estimating concrete strength by the maturity method", *ASTM Standards in ACI 301 and 318, Publication SP-71*, 1995,

- ACI, Farmington Hills, pp.297-303.
- 113 EN 1992-1-1. Eurocode 2: "design of concrete structures - part 1-1: general rules and rules for buildings", European Committee for Standardisation, 2004, 227 pages.
- 114 NF EN 1992-1-1. Eurocode 2, "calcul des structures en béton", Octobre 2005
- 115 ACI 209R-92, "Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Material and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan, 1994.
- 116 Bazant, Z.P., "Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal", J. Eng. Mech., Vol. 110, 1984, pp. 518–535.
- 117 Kirane, K., Bazant, Z.P., Asce PEHM, Goangseup, Zi., "Fracture and size effect on strength of plain concrete disks under biaxial flexure analyzed by microplane model M7". J. Eng. Mech., Vol. 140, No. 3, 2014, pp. 604–613.
- 118 Mahmud, G.H., Yang, Z., Hassan, A.M., "Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) beams", Constr. Build. Mater., Vol. 48, 2013, pp. 1027–1034.
- 119 Fladr, J., Bily, P., "Specimen size effect on compressive and flexural strength of high-strength fibre reinforced concrete containing coarse aggregate", Compos. Part B. Vol. 138, 2018, pp. 77–86.
- 120 Nguyen, D.L, Kim, D.J., Ryu, G.S., et al. "Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete", Compos. Part B. Vol. 45, No. 1, 2013, pp. 1104–1116.
- 121 Weibull, W., "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mech. Vol. 18, No. 3, 1951, pp. 293–297.
- 122 Quinn, G.D., "Weibull strength scaling for standardized rectangular flexure specimens", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 86, No. 3, 2003, pp. 508–510.
- 123 Torrent, R., "A general relation between tensile strength and specimen geometry for concrete-like materials", Mater. Constr., Vol. 10, No. 58, 1977, pp. 187–196.
- 124 Wu, X., "Modélisation numérique de la fissuration du béton à partir d'une approche probabiliste", thèse de doctorat, Paris, France ENPC, 1991.
- 125 Yoo, D.Y., Banthia, N., Kang, S.T., Yoon, Y.S., "Size effect in ultra-high-performance concrete beams", Eng. Fract. Mech., Vol. 157, 2016, pp.86–106.
- 126 Grégoire, D., Rojas-Solano, L.B., Pijaudier-Cabot, G., "Failure and size effect for notched and unnotched concrete beams", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 37, No. 10, 2013, pp. 1434–1452.
- 127 Sadouki, H., Denarié, E., "SAMARIS D26 Modelling of UHPFRC in composite structures", Deliverable D26, Project SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road infrastructures), Work package 14, 2006, 68 pages.
- 128 Singh, M., Sheikh, A.H., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Griffith, M.C., "Experimental and numerical study of the flexural behavior of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams", Constr. Build. Mater., Vol. 138, 2017, pp.12–25.
- 129 Lee, J.H., Cho, B., Choi, E., "Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a

- consideration of concrete strength and fiber content", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 138, 2017, pp. 222–231.
- 130 AydınBaradan, S.B., "The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars", *Compos. Part B.*, Vol. 45, No. 1, 2013, pp.63–69.
- 131 Wille, K., Kim, D.J., Naaman, A.E., "Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents", *Mater. Struct.*, Vol. 44, No. 3, 2011, pp. 583–598.
- 132 Yoo, D.Y, Yoon, Y.S. "Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers", *Eng.Struct.*, Vol. 102, 2015, pp. 409–423.
- 133 Kuder, K.G., Ozyurt, N., Mu, E.B., Shah, S.P., "Rheology of fiber-reinforced cementitious materials", *Cement Concr. Res.*, Vol. 37, No. 2, 2007, pp. 191–199.
- 134 Gencil, O., Brostow, W., Datashvili, T., Thedford, M., "Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash". *Compos. Interf.*, Vol. 18, No. 2, 2011, pp. 169–184.
- 135 Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I.O., "Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete", *Build. Environ.*, Vol. 40, No. 12, 2005, pp. 1672–1677.