

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département de Génie civil et d'hydraulique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية و الري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de :
Doctorat en sciences : GÉNIE CIVIL

Option : MATÉRIAUX

THEME

**Caractérisation expérimentale d'un matériau composite
Cas d'une matrice cimentaire et des renforts hybrides**

Présentée par :

YAGOUB Mohamed

Soutenue publiquement le 10/11/2022

Devant le jury composé de :

Dr MEZGHICHE Bouzidi	Maitre de Conférences A	Président	Université de Biskra
Dr. MELLAS Mekki	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. BELACHIA Mouloud	Professeur	Examineur	Université de Guelma
Dr. CHABIL Hocine	Professeur	Examineur	Université de Constantine
Dr. BENCHABANE Adel	Professeur	Invité	Université de Biskra

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, je souhaite exprimer mes vifs remerciements à Monsieur MELLAS Mekki. Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'être l'encadreur de mon travail, J'ai pu apprécier ses qualités pédagogiques et scientifiques, comme il a su me faire profiter de son expérience, de ses judicieux conseils ainsi que ses fructueuses directives. je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à Monsieur BENCHABANE Adel Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'être co-encadreur de mon travail et pour sa totale disponibilité. Je voudrais vivement remercier Messieurs ZATAR Abdallah et CHIBILI Rachid Professeur à l'Université de Biskra

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de l'examiner. Monsieur MEZGHICHE Bouzidi professeur de l'université de Biskra Monsieur CHABIL Hocine professeur de l'université de Constantine Monsieur Blachia Mouloud professeur de l'université de Guelma

Je tiens à présenter mes plus chaleureux remerciements à mes parents qu'ils trouvent ici tout mon amour, toute ma reconnaissance et toute ma gratitude.

Je remercie ma femme pour ses encouragements et son soutien permanent, mes enfants (Anis, Ines, Ilyes et Assil.) ainsi que mes frères et mes sœurs.

Je voudrais remercier tous les membres du Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement LAHE et à tous mes collègues du département, je dirai merci pour les encouragements et le soutien dont ils n'ont cessé de me donner.



ملخص

ركزت العديد من الصناعات مؤخرًا على مواد فعالة من حيث التكلفة ذات خصائص ميكانيكية جيدة. أثبتت المركبات الإسمنتية المقواة بالألياف الفولاذية أداءً ميكانيكياً في المكونات الصناعية والهيكلية. يتم استخدام مفهوم المادة المتدرجة وظيفيا والمعزز بالألياف المعاد تدويرها كمادة بديلة للبناء، والتي يمكن أن تكون أحد الحلول الفعالة من حيث التكلفة المقترحة لتحقيق هذا الهدف. قدمنا البرنامج التجريبي التالي. تم تعزيز المركب الإسمنتي المصنوع من المواد المحلية في نمطين، أحدهما مقوى في المقطع العرضي بأكمله والآخر مقوى فقط في منطقة الشد لتصبح مادة متدرجة وظيفيا و معززة بألياف معاد تدويرها مع مراعاة للنسب التالية: 0 و 0.5 و 1 و 1.5%. ومقارنة المركبات المقواة بـ 1% من الألياف الصناعية أو المعاد تدويرها وحدها أو الهجينة.

يبحث هذا العمل في جدوى استخدام الألياف المعاد تدويرها من النفايات الصناعية من صناعة لصوف الفولاذي كتعزيز وكذلك تهجين واستبدال الألياف الصناعية بالألياف المعاد تدويرها. كما قمنا بقياس خواصها الميكانيكية باستخدام قياس سرعة الموجات فوق الصوتية وقوة الضغط وقوة الشد وقوة الشد الانحناء وقوة القص.

أظهرت النتائج أن الألياف المموجة المعاد تدويرها هي الخيار الأمثل لزيادة الأداء الميكانيكي للمركب المقوى، ويمكنها استبدال الألياف الصناعية جزئياً أو كلياً، بما في ذلك تحسين سلوك الانحناء والقص. لذلك يمكن أن تكون FGCs المدروسة أداة قيمة لتحسين عملية التصميم في مختلف التطبيقات الهيكلية وإتاحة إنتاج مركبات اقتصادية و جيداً ميكانيكياً و صديقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية: ألياف فولاذية معاد تدويرها؛ مركبات اسمنتية مقواة؛ الأداء الميكانيكي؛ مادة متدرجة

وظيفية؛ ألياف هجينة.

Résumé

De nombreuses industries se sont récemment concentrées sur des matériaux rentables présentant de bonnes propriétés mécaniques. Les composites cimentaires renforcés de fibres d'acier ont prouvé leurs performances mécaniques dans les composants industriels et structurels. Le concept de FGM renforcé par des fibres recyclées est utilisé comme un matériau de construction alternatif, qui peut être une des solutions rentables proposées. Pour atteindre cet objectif, nous avons présenté le programme expérimental suivant : Un composite cimentaire à base de matériaux locaux a été renforcé selon deux modèles, l'un renforcé sur la section entière et l'autre renforcé uniquement dans la zone de traction (un matériau à gradient fonctionnel renforcé par des fibres recyclées) en considérant les fractions volumiques suivantes : 0.00, 0.50, 1.00 et 1,50 %, et nous avons comparé les composites renforcés de $V_f = 1\%$ des fibres industrielles ou recyclées seule ou hybride.

Ce travail étudie la faisabilité de l'utilisation de fibres recyclées provenant de déchets industriels de la fabrication de la laine d'acier comme renforcement. Ainsi que l'hybridation et le remplacement des fibres industrielles par les fibres recyclées. Nous avons également caractérisé leurs propriétés mécaniques en utilisant la vitesse d'impulsion ultrasonique, la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion et la résistance au cisaillement.

Les résultats montrent que les fibres recyclées ondulées sont le choix idéal pour augmenter la performance mécanique du composite renforcé qui peut remplacer partiellement ou entièrement les fibres industrielles et améliorer les comportements de flexion et de cisaillement. Par conséquent, les FGC étudiées pourraient être un outil précieux pour optimiser le processus de conception dans diverses applications structurelles et rendre possible la production de composites mécaniquement et écologiquement économiques.

Mots clés : *Fibres d'acier recyclées ; composites cimentaires renforcés ; performance mécanique ; gradation fonctionnelle ; fibres hybrides.*

Abstract

Many industries have recently focused on cost-effective materials with good mechanical properties. Steel fiber-reinforced cementitious composites have proven their mechanical performance in industrial and structural components. The concept of recycled fiber-reinforced FGM is used as an alternative construction material, which can be one of the proposed cost-effective solutions. To achieve this goal, we presented the following experimental program. A cementitious composite based on local materials was reinforced in two designs, one reinforced over the entire section and the other reinforced only in the tensile zone. We also substituted a functional gradient material reinforced with recycled fibers considering the following volume fractions: 0, 0.5, 1, and 1.5%. And compared the composites reinforced with $V_f=1\%$ of industrial or recycled fibers alone or hybrid

This work investigates the feasibility of using recycled fibers from industrial waste from steel wool manufacturing as reinforcement. As well as the hybridization and replacement of industrial fibers with recycled fibers. We also characterized their mechanical properties using ultrasonic pulse velocity, compressive strength, flexural tensile strength, and shear strength

The results show that corrugated recycled fibers are the ideal choice to increase the mechanical performance of the reinforced composite; they can partially or fully replace industrial fibers, including the improvement of bending and shear behaviors. Therefore, the investigated CGFs could be a valuable tool to optimize the design process in various structural applications and make the production of mechanically and environmentally economical composites possible.

Keywords: *Recycled Steel Fibers; Reinforced Cementitious Composites; Mechanical Performance; Functionally Graded; hybrid Fibers.*

Liste des Notations

CFM	Composites de fibres métalliques
DRX	Diffraction des rayons X
CRA	Composite renforce fibre type A
CRB	Composite renforce fibre type B
CRGFA	Composite gradation fonctionnelle renforce fibre type A.
CRGFB	Composite gradation fonctionnelle renforce fibre type B
E/C	Eau / Ciment
τ	La résistance au cisaillement
Fc	Résistance en Compression
ff	Résistance à la traction par flexion
ft	Résistance à la traction par fondage
Lc	Longueur critique
Lf	Longueur de fibre
Vf	Fraction volumique
Vc	Volume critique
FGM	Matériaux Gradation fonctionnelle
END	Essais non destructifs
UPV	Ultrasonique pulse velocity
Ma	Masse de l'échantillon imbibée ;
Ms	Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.
V	Vitesse de son
t	Le temps de propagation
CO	Composite ordinaire
BFHP	Bétonde fibre haute performance
d_{eq}	Diamètre équivalent .
L_d	longueur développée de la fibre
λ	Longueur d'onde de la fibre
Rt	La résistance à la traction de la fibre
CV%	Coefficient de variation
Δl	L'allongement de la fibre



Liste des tableaux

Tableau I-1 _Valeurs de la résistance mécanique et du module d'élasticité pour différents types de fibres et de matrice cimentaire (adapté de Bentur et Mindess (2007) et ACI 544.1R-96).	17
Tableau I-2 _Types et classes de fibres d'acier produites spécifiquement pour être utilisées dans le béton (NBR 15530 (2007))......	21
Tableau I-3 Résumé des principales considérations obtenues dans le cadre théorique sur la teneur en fibres.....	24
Tableau I-4 Résumé des principales considérations obtenues dans le cadre théorique	28
Tableau I-5 Ténacité des matériaux à base de ciment renforcé de fibres	29
Tableau I-6 Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés.....	33
Tableau II -1 Normes des essais sur les granulats.	55
Tableau II -2 Nonnes pour les tests sur les éprouvettes en béton.....	56
Tableau II -3 Propriétés physiques du ciment	57
Tableau II-4 _Composition chimique du ciment.....	57
Tableau II -5 _Les caractéristiques du superplastifiant.....	58
Tableau II -6 _Equivalent de sable avant et après lavage.....	59
Tableau II -7 Les propriétés des fibres A et B.....	61
Tableau II -8 Détails des mélanges du groupe 01 avec différentes fibres	63
Tableau II -9 Détails des mélanges du groupe 02 avec différentes fibres	63
Tableau II -10 Classes de consistance des composites en fonction de l'affaissement.....	68
Tableau III-1 La composition chimique des fibres recyclées.....	81
Tableau III-2 _Les dimensions géométriques des fibres recyclées.	83
Tableau III-3 Les résultats des tests de la résistance à la traction.....	84
Tableau IV-1 Résultats des tests UPV des différents composites	93
Tableau IV-2 Résultats des essais de compression des différents composites	98
Tableau IV-3 Résultats des essais de traction par fendage des différents composites	104
Tableau IV-4 Résultats des essais de cisaillement des différents composites.....	110
Tableau IV- 5 Résultats des essais de flexion des différents composites	116



Liste des figures

Figure I-1 Représentation schématique d'un matériau composite [S. Drapier (2019)].....	4
Figure I-2 Types de matrice.....	4
Figure I-3 Types de renfort.....	6
Figure I-4 Classification schématique des différents types de composites.....	6
Figure I-5 Matériau composite monocouche	7
Figure I-6 Matériau composite stratifié [Berthelot, J. M. (2010).].....	7
Figure I-7 Matériau composite sandwich [Craig A. Steeves, Norman A. Fleck (2004)]	8
Figure I-8 Schéma de concentration des contraintes pour un composite sans renforcement par fibres (BARROS, 2009).....	12
Figure I-9 Schéma de concentration des contraintes pour un composite avec renforcement par fibres (BARROS, 2009).	12
Figure I-10 La surface de la bauge renforcée par les fibres et sans fibre à l'état sec (Addison Greer, 1996).....	14
Figure I-11 Modèle de composite à base de fibres	15
Figure I-12 Différents types de fibres métalliques	18
Figure I-13 Caractéristiques principales des fibres.....	19
Figure I-14 Conceptualisation du facteur de forme des fibres (NUNES ; AGOPYAN, 1998).	20
Figure I-15 Effet du facteur de forme des fibres sur la maniabilité du béton (HANNANT et al., 1974 apud CHANH, 2005).	20
Figure I-16 Distributions possibles des contraintes le long d'une fibre en fonction de la longueur critique (BENTUR ; MINDESS, 2007).....	22
Figure I-17 Béton de fibres avec compatibilité dimensionnelle entre les fibres et les granulats grossiers (FIGUEIREDO, 2000).	23
Figure I-18 Béton renforcé par des fibres où il n'y a pas de compatibilité dimensionnelle entre les fibres et les granulats grossiers (FIGUEIREDO, 2000).	23
Figure I-19 Différence de comportement entre les fibres ductiles et fragiles lorsqu'elles sont inclinées par rapport à la surface de rupture (FIGUEIREDO, 2000).	24
Figure I-20 Courbes typiques de contrainte-déformation en traction pour l'absence, le faible et le fort volume de fibres (BENTUR ; MINDESS, 2007).....	25
Figure I-21 Composites renforcés avec des fibres à des niveaux inférieurs (A), supérieurs (B) et égaux (C) au volume critique de fibres pendant l'essai de traction par flexion (FIGUEIREDO, 2000).	27

Figure I-22 Influence des fibres sur le comportement en compression d'un béton à résistance normale avec des fibres d'acier (Balaguru et Shah, 1992).	31
Figure I-23 Courbes de charge en fonction du déplacement pour le béton avec fibres (Balaguru et Shah, 1992).	35
Figure I-24 Courbes de charge en fonction de la déflexion avec différentes teneurs	35
Figure I-25 Montage de cisaillement, a) Mirsayah et Banthia (2002), b) JSCE-SF6	36
Figure I-26 Essais de caractérisation du comportement en cisaillement	37
Figure I-27 Procédé de production de fibres métalliques	38
Figure I-28 Schéma de la méthode fraisage.....	39
Figure I-29 Méthode de la trempe d'un jet de métal sur une roue en rotation.....	40
Figure I-30 Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macros-fissures. [Youcef Fritih,(2009)]	41
Figure I-31 Structure d'une paroi à gradient de propriétés, source: ILEK	46
Figure I-32 MGF, matériaux à gradient fonctionnel (Goli et Kazemi 2014).....	46
Figure I-33 Présentation schématique du béton à gradient fonctionnel et stratifié.....	47
Figure I-34 Couches horizontales Han A, Gan BS, Pratama MMA	48
Figure I-35 Couches verticales Bajaj K, Shrivastava Y, Dhoke P.....	49
Figure I-36 schématique par (Roussel).....	51
Figure I-37 schématique par Roussel.....	51
Figure II-1 Analyse DRX du ciment.	57
Figure II-2 lavage des granulats	59
Figure II -3 Courbes granulométriques des matériaux utilisés	60
Figure II -4 Géométrie (a) et (b) schématique (c) fibres d'acier industriel de type A	61
Figure II -5 Géométrie schématique des fibres d'acier recyclées de type B	61
Figure II- 6 Les deux fibres d'acier utilisées.....	62
Figure II -7 (a, b et c) les types d'éprouvettes utilisées –(d) Conservation des éprouvettes	65
Figure II -8 Programme expérimental (01).....	66
Figure II -9 Programme expérimental (02).....	67
Figure II -10 L'essai de vitesse de propagation d'ondes sonores	70
Figure II -11 Mise en place des éprouvettes sur presse hydraulique (La résistance en compression).....	71
Figure II -12 Mise en place des éprouvettes sur presse hydraulique (Essai de traction par fendage).	72
Figure II -13 Essai de flexion 3 points.....	73

Figure II -14 Essais de caractérisation du comportement en cisaillement (Cuenca, E.,et al., 2020	74
Figure II -15 Essai de cisaillement (JSCE-SF6).....	75
Figure II -16 Montage de cisaillement, JSCE-SF6.....	75
Figure III-1 Fibre recyclée avant et après fabrication	79
Figure III -2 Processus de fabrication de la fibre recyclée	80
Figure III -3 Géométrie schématique de la fibre recyclée	82
Figure III -4 Dimension de la fibre recyclées de type B	
Figure III -5 Test de traction directe.	84
Figure III -6 Courbe (charge-déplacement) des fibres d'acier recyclée de type B	85
Figure III -7 Géométrie schématique des fibres d'acier recyclées de type B.....	86
Figure 1 Influence de la fraction volumique de la fibre sur l'affaissement des composites. .	90
Figure 2 L'influence de la fraction volumique de la fibre sur l'absorption d'eau par immersion	92
Figure 3 Evolution de UPV du composite renforcé en fonction Vf%	94
Figure 4 Relation entre le rapport UPV_{CR}/UPV_{CCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et Vf (%).....	95
Figure 5 Relation entre la vitesse d'impulsion UPV_{CR} et la vitesse d'impulsion UPV_{CRGF} ...	97
Figure 6 Evolution de la résistance en compression des composites renforcés en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) Les composites renforcés sur toute la section, (b)les composites à gradient fonctionnel	99
Figure 7 Relation entre le rapport f_{CCR}/f_{CCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et Vf (%).....	100
Figure 8 Corrélation entre les valeurs de la résistance à la compression du béton	102
Figure 9 Modes de rupture des éprouvettes à la compression.	103
Figure 10 Evolution de la résistance à la traction par fendage des composites renforcées en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) les composites renforcés sur toute la section (b) les composites à gradient fonctionnel	105
Figure 11 Relation entre le rapport f_{tCR}/f_{tCCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et Vf (%).....	106
Figure 12 Corrélation entre les valeurs de la résistance à la traction par fendage f_{tCR} et f_{tCRGF}	107



Figure 13 Modes de rupture des éprouvettes à la traction par fendage.....	109
Figure 14 Evolution de la résistance au cisaillement des composites renforcés en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) les composites renforcés sur toute la section	111
Figure 15 Relation entre le rapport τ_{CR}/τ_{CCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et Vf (%).....	112
Figure 16 Relation entre la résistance au cisaillement τ_{CR} et τ_{CRGF}	113
Figure 17 Modes de rupture des éprouvettes au cisaillement	115
Figure 18 Evolution de la résistance en traction par flexion des composites renforcé sur en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) les composites renforcés sur toute la section (b) les composites à gradient fonctionnel	117
Figure 19 Relation entre le rapport ff_{CR}/ff_{CCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et Vf (%).....	118
Figure 20 Relation entre la résistance à la résistance en flexion ff_{CR} et ff_{CRGF}	120
Figure 21 Modes de rupture des éprouvettes en flexion	121
Figure 22 Observation visuelle des composites à gradient fonctionnel	123
Figure 23 Relation entre la résistance à la compression en fonction de type de renfort	125
Figure 24 Relation entre la résistance à la traction par fendage en fonction de type de renfort	126
Figure 25 Relation entre la résistance à la flexion en fonction de type de renfort	127
Figure 26 Relation entre la résistance au cisaillement en fonction de type de renfort.....	129

Introduction générale

Introduction générale

L'un des matériaux les plus utilisés en génie civil est le composite à base de ciment en raison de sa haute qualité et de son rapport coût-durabilité favorable. Néanmoins, c'est un matériau qui présente des inconvénients tels que la fragilité et la faible résistance à la traction [Nili, M., & Afroughsabet, V. (2010), Nili, M., & Afroughsabet, V. (2012)]. Il est devenu ainsi largement utilisé dans des structures telles que les chaussées rigides et les éléments préfabriqués. La résistance à la traction du composite cimentaire est relativement plus faible que sa résistance à la compression [Choi, Y., & Yuan, R. L. (2005)]. Pour faire face à ce type de problème, des fibres sont utilisées comme renfort dans la matrice. Pour surmonter cette faiblesse, la méthode consiste à l'ajout de différents types et quantités de fibres dans la formulation du composite.

Le composite cimentaire renforcé par des fibres (FRCC) a été l'un des premiers matériaux contemporains utilisés dans les structures [Havlikova, I. (2015)]. Les premières fibres conçues pour renforcer le composite cimentaire sont apparues au début du vingtième siècle. L'incorporation de fibres d'acier dans l'industrie a commencé il y a plus de 50 ans, et le composite cimentaire renforcé de fibres métalliques (MFC) est un composite qui s'est avéré être un matériau compétitif pour de nombreux types de structures. Au cours des deux dernières décennies, un grand nombre de recherches a été mené sur le CCRFM [Abbass, W. et al (2018), Kazemi, M. T., et al (2017) et Vogel, F et al (2014)]. Plusieurs études ont conclu que les fibres métalliques améliorent la réponse mécanique et peuvent remplacer partiellement ou entièrement le renforcement traditionnel dans certains cas.

De nombreux avantages peuvent être obtenus en incorporant des fibres d'acier dans la matrice cimentaire [Jansson, A. (2011), Døssland, Å. L. (2008)]. Il s'agit notamment, d'une part, de la prévention des défaillances inattendues, de l'amélioration de l'énergie de rupture et de la réduction du retrait, et d'autre part, certains chercheurs affirment que l'ajout de fibres métalliques au composite cimentaire n'affecte pas sa résistance à la compression ou son module d'élasticité. En revanche, d'autres chercheurs [Khayat et al. (2014) and Zeyad (2019)], affirment que les fibres ont un

impact significatif sur la puissance de la matrice cimentaire. Selon l'étude de [Pająk and Ponikiewski (2013)] , le marché mondial des fibres d'acier est estimé à plus de 25 000 tonnes vendues chaque mois et il augmente mensuellement d'environ de 1,6 %. Les fibres d'acier avec des extrémités déformées, des surfaces traitées, des torsions, des rainures et des crochets, constituent la majeure partie de l'offre du marché [Mohammadi, Y. et al (2008)]. De nombreux grands fabricants de fibres d'acier techniques sont actuellement présents dans le monde entier [Katzer, J., & Domski, J. (2012)]. Ils proposent différentes fibres d'acier, chacune ayant une forme géométrique, un diamètre et un traitement de surface distincts [Naaman, A. E. (2003)].

Selon certaines études, les qualités fraîches et durcies du mélange de béton peuvent être affectées directement par la longueur, la masse, le rapport longueur/diamètre, la forme et la rugosité de la surface. Elles peuvent également être influencées par les propriétés des matériaux fibreux, notamment le type, le volume et la dispersion dans la matrice. Les fibres d'acier les plus utilisées sont celles qui ont une section ronde et une longueur comprise entre 25 et 60 millimètres. En général, le rapport d'aspect est inférieur à 100. Les fibres sont façonnées de manière spécifique [Domski, J. (2011), Wang, J. et al (2020)], c'est ainsi que des fibres d'acier torsadées, ondulées, aplaties, en pointes, effilées et en crochets ont été fabriquées au cours des 50 dernières années. Les fibres d'acier ont aussi une variété de formes en coupe transversale, des carrés, des rectangles et des sections irrégulières [Maidl, B. (1995)]. Des fibres de différents diamètres et longueurs ont été produites récemment. Au fil des années, certaines formes géométriques de fibres se sont avérées simples à fabriquer et pratiques à utiliser [Spinella, N. (2013)]. Aujourd'hui, un large choix de fibres de tailles et de formes diverses peut être utilisé à des fins multiples. Les cinq formes de fibres d'acier les plus courantes sont les fibres droites traditionnelles, les fibres avec des crochets aux extrémités, les fibres ondulées (effilées, en forme de palette ou de bouton), et les fibres métalliques déformées (indentées, gravées ou à surface rugueuse).

La fibre métallique en question a une géométrie schématisée ondulée ; les autres types de fibres peu courants sont généralement fabriqués sur commande pour des

clients spécifiques. Sur la base de la variété offerte par les principaux producteurs de fibres, les statistiques montrent que les fibres avec des crochets aux extrémités sont en tête des ventes totales et sont utilisées dans des études publiées récemment [Hussain, H. K., et al (2022)]. Les fibres ondulées concurrentes, viennent en deuxième position, puis les fibres droites sont les autres formes de fibres les plus populaires [Katzner, J. (2006)]. Lorsqu'il s'agit de performances mécaniques, les qualités géométriques de la fibre (définies par sa surface extérieure et l'efficacité de son crochet) sont essentielles. Par exemple, les fibres métalliques fabriquées à partir de fil d'acier sont généralement obtenues par étirage ou laminage. D'un point de vue économique et technique, les fibres métalliques démontrent leur applicabilité et leur popularité dans les pratiques d'ingénierie. Le volume de fibres dans la composition a un impact significatif sur le coût du composite cimentaire renforcé. La forte augmentation des prix de l'acier, ces dernières années, a gonflé les prix de la fibre. L'une des solutions pour réduire les coûts consiste à utiliser des fibres de renforcement et des fibres recyclées moins chères et plus économiques. La fibre d'acier de pneus recyclés (RSF) peut être utilisée comme une fibre de renforcement potentielle pour améliorer la ductilité du béton à haute performance [Ali, B.(2022)]. D'autre part, les copeaux résultant de l'usinage de pièces en acier, sont utilisés comme renfort [Djebali, S., et al. (2011)]. En même temps, l'inclusion de fibres de canettes de déchets d'aluminium dans le béton améliore les propriétés mécaniques du composite [Channa, I. A., & Saand, A. (2021)]. Les fibres d'acier fabriquées à partir de matériaux recyclés peuvent protéger l'environnement et diminuer la pollution, en revanche, les fibres d'acier industrielles peuvent participer à la destruction des ressources naturelles en dégageant du CO₂ [Lourenço, L. et al (2018)].

L'efficacité et l'économie ont été inextricablement liées à la méthode de conceptualisation. Dans ce travail nous avons développé un procédé combiné pour la fabrication du composite cimentaire fibré caractérisé par des facteurs assurant l'économie. Ce fait est principalement basé sur deux principes :

- Le premier principe, qui garantit l'utilisation de moins de fibre et contribue ainsi à l'économie, est le concept (FGC).

- Le second principe, qui joue également un rôle important, est le remplacement partiel ou entier des fibres industrielles par des fibres recyclées afin de réduire le facteur d'importation et de valoriser surtout les résidus des déchets de la fabrication de la laine d'acier qui n'étaient pas destinés à cet usage.

Ces facteurs contribuent à la réduction de la consommation des matières premières et à la réduction des coûts, par la revalorisation et la réutilisation des déchets de la fabrication de la laine d'acier comme renfort.

C'est dans ce contexte que cette étude vise à explorer un nouveau concept de composite cimentaire à gradient fonctionnel (FGCC), inspiré d'un matériau à gradient fonctionnel (FGM) [Bever, M. B., & Duwez, P. E. (1972)] qui est généralement appliqué à des matériaux, tels que les métaux et les céramiques [Roesler, (2007)]. Dans la présente étude, une combinaison de deux matériaux a été proposée : un composite cimentaire ordinaire (OCC) et un composite cimentaire renforcé de fibres d'acier (SFRCC), en incluant les renforts uniquement dans les zones les plus sollicitées en traction, dans la couche inférieure, où ils sont plus efficaces en termes de résistance aux forces de flexion introduites par les charges. Par conséquent, la partie de l'OCC reste située au-dessus de l'axe neutre, cela permet d'obtenir les mêmes performances à un coût moindre. Ce concept vise à combiner les avantages de ces deux composites et à créer un matériau composite plus efficace [Río, O., Nguyen, V. D., & Nguyen, K. (2015)], offrant de bonnes propriétés par rapport au composite cimentaire ordinaire en pleine profondeur [Jirawattanasomkul, T. et al (2018)]. L'intérêt de cette approche innovante est d'assurer une performance optimale tout en réduisant les dépenses. Le concept (FGC) permet d'optimiser l'utilisation des fibres d'acier dans le composite et d'en réduire le coût, puisque les fibres d'acier peuvent représenter jusqu'à 90 % de ce prix [Chan, R., Liu, X., & Galobardes, I. (2020)]. (Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates)

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer expérimentalement la performance mécanique de mélanges composites de résistance standard avec l'incorporation des fibres d'acier (fibres industrielles avec crochets aux extrémités ou

fibres recyclées provenant de déchets de la fabrication de la laine d'acier), avec les différentes fractions volumiques suivantes : 0 % ; 0.5 % ; 1 % et 1.5 %, et d'étudier ainsi l'effet de l'hybridation sur les performances de ces mélanges. À cette fin, divers tests, telle que la vitesse de propagation, la compression, la traction par flexion et les contraintes de cisaillement ont été réalisés. En outre, l'utilisation des fibres de renforcement dans deux conceptions, l'une pour l'ensemble de la section et l'autre uniquement dans la zone de tension, est fonctionnellement graduée (FG). Pour tous les mélanges, les composants sont identiques, à l'exception de la fraction volumique, le type de fibre et la section renforcée.

Le contenu de cette thèse est formé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous nous intéressons à l'étude bibliographique. Ce chapitre sera basé sur trois parties :

-La première partie tiendra sur les matériaux composites et leur composants élémentaires ainsi que les différentes conceptions des matériaux composites.

-La deuxième partie sera consacrée à l'état de l'art et aux généralités sur le béton renforcé de fibres, la nature et l'utilisation de ces dernières.

-La troisième partie comporte des généralités sur les matériaux à gradient fonctionnel "FGM", leur concept ainsi que leur domaine d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons particulièrement à la méthode de fabrication et à la caractérisation des fibres recyclées provenant de déchets de la fabrication de la laine d'acier.

Le troisième chapitre expose une étude expérimentale étalée. Nous présentons les matériaux, le matériel et le programme des essais et nous définissons les solutions des divers tests relatifs aux propriétés des composites non fibrés, les composites renforcés avec des fibres ainsi que les composites cimentaires à gradient fonctionnel renforcé (FGCR) avec les fibres industrielles en crochets aux extrémités ou les fibres recyclées seules et hybrides, avec les différentes fractions volumiques suivantes : 0 % ; 0.5 % ; 1 % et 1.5 %.

Le quatrième chapitre a permis de faire une analyse des résultats obtenus concernant l'influence des fibres industrielles ou des fibres recyclées. Pour cela, divers tests ont été réalisés, telles que la vitesse de propagation, la compression, la traction par

fendage, la traction par flexion et le cisaillement, et nous avons comparé aussi les composites renforcés de $V_f=1\%$ des fibres industrielles ou recyclées seule ou hybride.

Enfin, nous avons achevé notre travail de recherche par une conclusion générale ainsi que des perspectives à prévoir pour des travaux futurs.

Chapitre I

Analyse bibliographique

I.1 Introduction

Ce premier chapitre consiste en une synthèse bibliographique qui présenter brièvement l’historique et les résultats de quelques travaux de recherches réalisés dans le contexte de notre étude. La référence documentaire disponible, a fourni la base théorique pour le choix des paramètres de base qui seraient variés pour la génération de composite renforcé par des fibres d'acier. Ce chapitre est structuré en trois parties; Dans la première partie nous présentons des généralités sur les matériaux composites

La deuxième partie est consacrée à des généralités sur le béton renforcé de fibres (la matrice cimentaire et les granulats) et le mélange de l’une des deux fibres utilisées sur l’évolution des propriétés physiques et mécaniques du composite, actuellement utilisés dans la construction,

La dernière partie consiste à donner un aperçu sur les matériaux à gradient fonctionnel. Ce point d’étude est essentiel actuellement pour le développement de ces matériaux. Les méthodes proposées dans la bibliographie en vue d’améliorer leur comportement en se référant à des résultats expérimentaux provenant d’autres études

I.2 Généralités sur les matériaux composites

I.2.1 Les composants élémentaires des matériaux composites

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de nature différente, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, celle-ci est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant [Berthelot, J. M. (1992)]. Pour cela, un agent de liaison, appelé interface, est nécessaire (Figure 1). Des charges et des additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou de liquide, afin de modifier une propriété de la matière à laquelle ils sont ajoutés (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, la résistance au feu...) [Jérémy Aucher. (2009)].

Exemples de systèmes composites :

- Le béton armé : béton renforcé en acier
- Le Glare : aluminium et fibre de verre
- L'époxy renforcé de fibres de graphite, etc.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants
- De leur distribution géométrique
- De leurs interactions, etc.

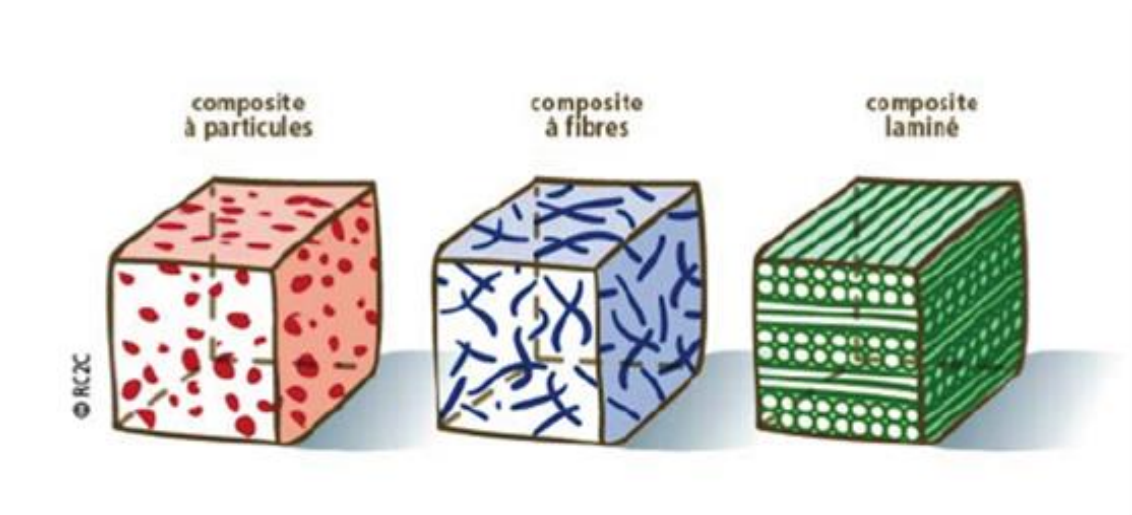


Figure I-1 Représentation schématique d'un matériau composite [S. Drapier (2019)]

I.2.1.1 Matrice

La matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final. Elle sert également à protéger les fibres contre l'abrasion, l'environnement agressif, et permet aussi de contrôler la surface finie du composite et assurer le transfert de charges entre les fibres. Le solide formant la matrice peut être d'origine organique ou minérale [Jérémie Aucher. (2009)].

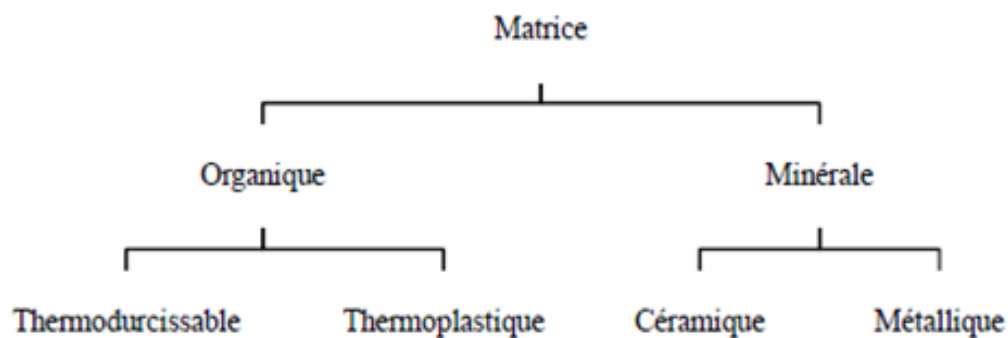


Figure I-2 Types de matrice

Des produits chimiques (charges et additifs) sont aussi incorporés à la matrice pour lui conférer certaines caractéristiques mécaniques et physiques :

I.2.1.2 Les charges

L'objet de la charge renfort est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou de diminuer son coût en conservant sa performance. En général ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre) (quelques dizaines de %). Les principales charges utilisées sont :

- Microbille en : verre, époxyde, phénolique, polystyrène, etc.
- Des poudres ou paillettes métalliques : cuivre, fer, aluminium, etc.
- Des particules de carbone (noir de carbone).

I.2.1.3 Les additifs

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et pour modifier l'aspect ou bien les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés. Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % ou moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage
- Pigments et colorants
- Agents anti-retraits
- Agents anti-ultraviolets
- Accélérateur
- Catalyseur

I.2.1.4 Renforts

Ce sont des particules d'environ 50 microns de diamètre. Il existe des renforts en fibres courtes (de l'ordre du mm), des renforts en fibres moyennes ou mi-longues (de l'ordre du cm) et des renforts en fibres longues (où les fibres font environ la taille de l'échantillon). Ils représentent, le squelette du matériau et assurent sa tenue mécanique (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) [Kaskas Saliha. (2010)]. Différents types de renforts sont présentés dans l'organigramme ci-dessous (Figure3).

- Les renforts à fibres se présentent sous diverses formes commerciales :
- Sous forme linéique (fils, mèches, fibres, etc.)
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, maillage, mats, etc.)
- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.)

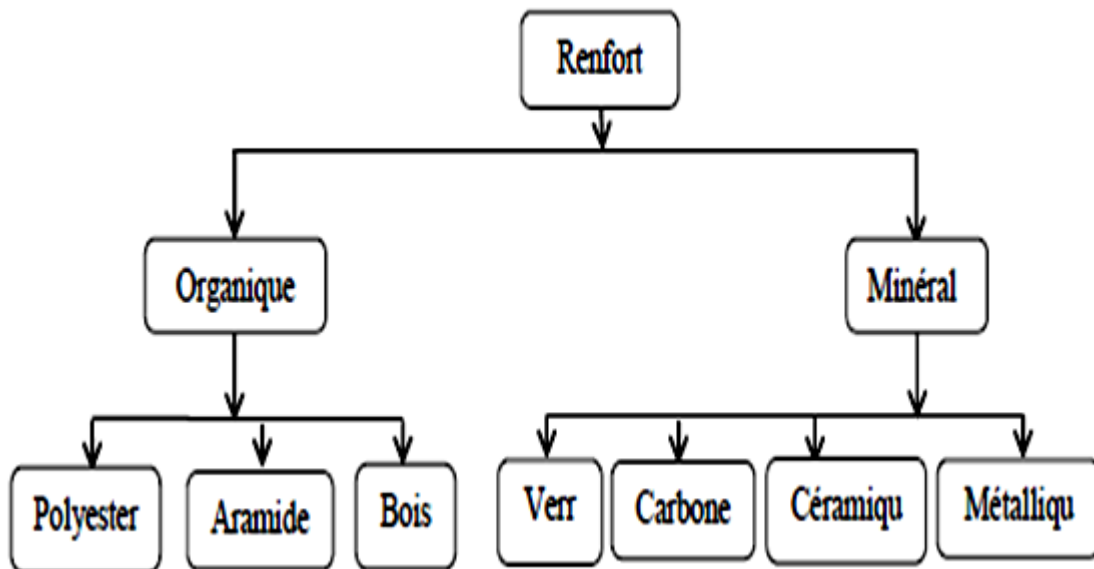


Figure I-3 Types de renfort

I.2.2 La conception des matériaux composites :

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites qui sont classés soit selon la forme des composants ou suivant la nature des composants.

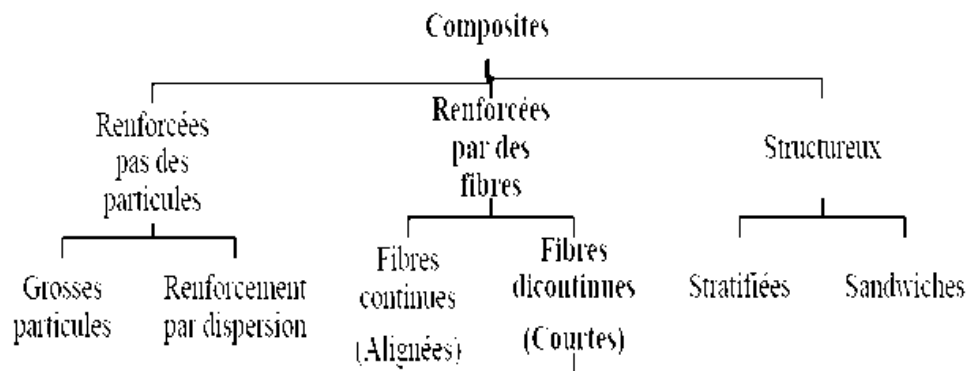


Figure I-4 Classification schématique des différents types de composites

I.2.2.1 Monocouche

Le monocouche représente l'élément de base de la structure composite (Figure 5). Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

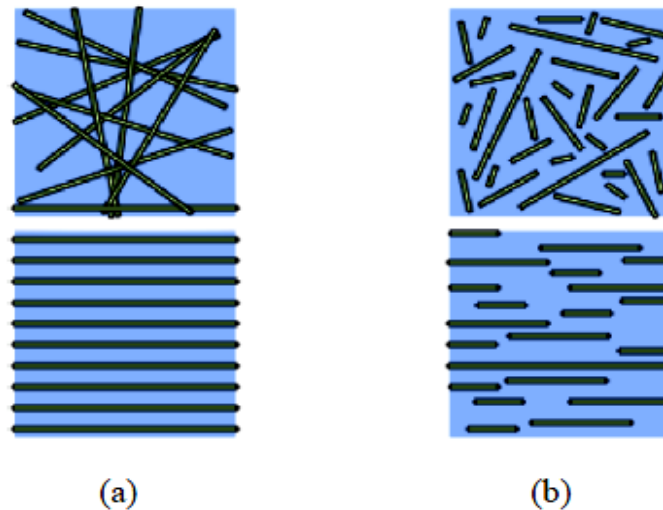


Figure I-5 Matériau composite monocouche
(a) fibres longues, (b) fibres courtes, (HAMI Brahim (2018))

I.2.2.2 Stratifié

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure 6)

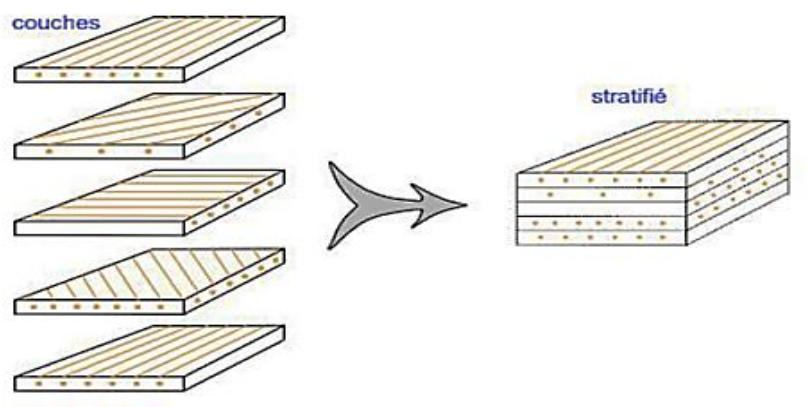


Figure I-6 Matériau composite stratifié [Berthelot, J. M. (2010).]

I.2.2.3 Sandwich

Lorsque deux peaux et un matériau central sont assemblés par collage ou soudage, on obtient un matériau sandwich. Les peaux sont fines et possèdent d'excellentes qualités mécaniques (haut module, haute résistance) [Allen H. G.(1961)]. Un noyau constitué d'un matériau de forte épaisseur et de faible densité est inséré entre les deux peaux. L'ajout de ce noyau permet d'augmenter le moment d'inertie de la structure et, par conséquent, sa rigidité en flexion tout en diminuant la masse globale en maintenant une distance constante entre les deux peaux. En changeant la nature des peaux (identiques ou non), de l'âme et l'épaisseur de chaque phase, on peut modifier les propriétés mécaniques des matériaux sandwichs en fonction de leur composition. (figure 1)

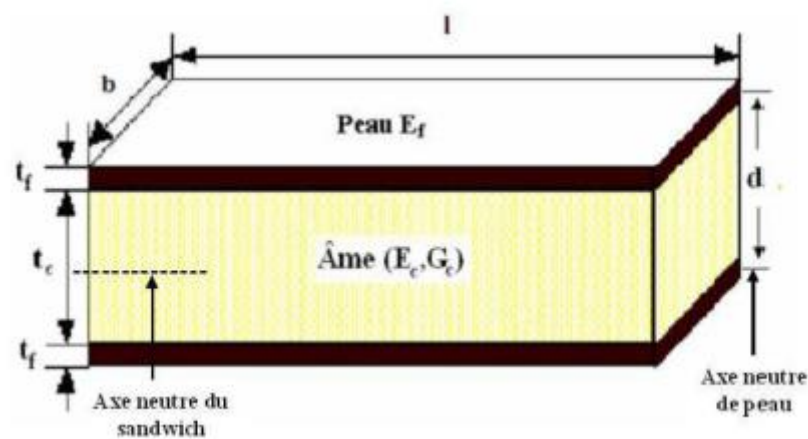


Figure I-7 Matériau composite sandwich [Craig A. Steeves, Norman A. Fleck (2004)]

I.2.3 Avantages du matériau composite :

- Il offre un gain énorme au niveau du poids de différentes structures réalisées dû à sa légèreté.
- Très bonne tenue à la pression hydrostatique.
- Très bonne durée de vie grâce à sa bonne tenue en fatigue.
- Résistant à la corrosion.
- Possibilité de mise en forme complexe et diverse, favorisant ainsi une meilleure esthétique.

- Confort accru : réduction des émissions sonores, anti-vibration, isolation électrique, insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.

I.2.4 Inconvénients du matériau composite :

- Faible tenue au feu et à la résistance aux températures (plus faible que les métaux).
- Coût plus élevé : fluctuation des prix des matières premières et des procédés de fabrication.
- Complexité et difficulté du recyclage des thermodurcissables.
- Rupture des fibres.
- Rupture transversale ou longitudinale des matrices.
- Rupture de l'interface fibre matrice.
- Délaminage inter plis dans le cas d'un stratifié.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées [Berthelot, J. M. (1992)]

I.3 Généralités sur le béton renforcé de fibres

Le composite cimentaire présente un certain nombre de caractéristiques qui font de lui le matériau de construction le plus utilisé au monde, notamment : un bon rapport entre le coût et la durabilité élevée, une bonne résistance à la compression et au feu, la préfabrication, la polyvalence architecturale et un bon contrôle acoustique, entre autres. Malgré cela, le composite cimentaire présente une série de limitations, telles que son comportement nettement fragile et sa faible capacité de déformation avant rupture. En raison de sa fragilité, sa résistance à la traction est très faible par rapport à sa résistance à la compression. La combinaison avec l'armature en acier confère aux éléments structurels en béton la résistance à la traction et la ductilité nécessaires. Cette combinaison peut également entraîner une augmentation de la résistance à la compression et la ductilité.

L'ajout de fibres permet d'augmenter la résistance à la compression et la ductilité du composite cimentaire soumis à la traction directe, à la traction par flexion et également à la compression, ce qui peut apporter d'autres avantages au béton, telles qu'une réduction du retrait, une amélioration du comportement après fissuration, l'érosion, la fatigue et une plus grande résistance aux impacts, entre autres.

Les composites cimentaires de fibres peuvent être définis comme des matériaux constitués d'au moins deux phases principales distinctes. Le béton durci lui-même, sans fibres, est déjà un composite dont les phases principales sont la pâte, les pores et les granulats. Cependant, on considère comme phases principales du béton avec fibres le béton lui-même, appelé matrice et les fibres, qui peuvent être produites à partir de différents matériaux.

Selon Mehta et Monteiro (2008), la résistance réduite du composite cimentaire à la traction peut être associée à sa grande difficulté à interrompre la propagation des fissures, lorsqu'il est soumis à ce type de contrainte. Cela se produit parce que la direction de la propagation des fissures est transversale à la direction principale de la contrainte. Dès que chaque nouvelle fissure commence, la surface disponible pour

résister à la charge effective est réduite, ce qui entraîne une augmentation des contraintes présentes aux extrémités des fissures. Ce compromis de résistance est beaucoup plus important lorsque la charge est en traction que lorsque le matériau est en compression. Par conséquent, la rupture en traction est causée par quelques fissures qui se rejoignent et non par de nombreuses fissures comme cela se produit lorsque le composite cimentaire est comprimé.

En présentant une surface totale de rupture plus petite, la dépense énergétique associée à la rupture par traction dans le composite cimentaire est également réduite. Par conséquent, le travail de pontage par transfert de contrainte, que les fibres peuvent effectuer à travers les fissures du composite cimentaire, est un mécanisme très intéressant pour augmenter l'énergie associée à la rupture du matériau et pour limiter la propagation des fissures.

Dans le cas d'un béton sans fibres, une fissure représente une barrière à la propagation des contraintes, représentée de manière simpliste par les lignes de contrainte aux extrémités de la fissure. Si cette contrainte dépasse la résistance de la matrice, il se produit une rupture brutale du matériau. À partir du moment où la fissure atteint une longueur critique dans le béton, la rupture brutale du matériau se produit, caractérisant un comportement typiquement cassant, où l'on ne peut compter sur aucune capacité de résistance du béton fissuré.

Le bon comportement de la matrice cimentaire est toutefois compromis par sa résistance limitée à la traction. Le béton contient généralement de nombreuses microfissures dans la zone de transition entre la matrice et les granulats grossiers, et peu d'énergie est nécessaire pour augmenter ces fissures. Lorsque le béton est soumis à une tension ou à une flexion, l'énergie est rapidement concentrée aux extrémités des microfissures existantes, provoquant leur croissance incontrôlée et fragilisant la ruine du matériau, comme le montre Figure 8.

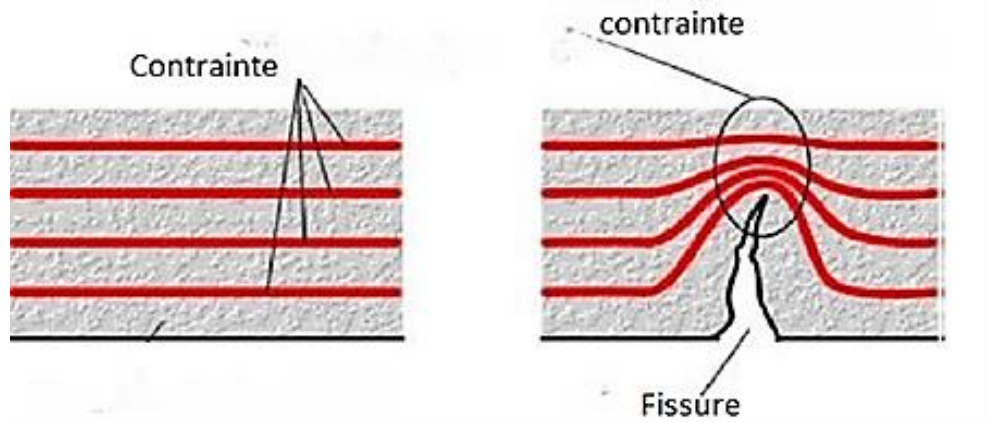


Figure I-8 Schéma de concentration des contraintes pour un composite sans renforcement par fibres (BARROS, 2009).

Dans le cas du béton avec ajout de fibres, on observe un retard dans l'agrandissement des fissures. Les fibres agissent comme des ponts de connexion, transférant les contraintes d'un côté à l'autre de la structure et en minimisant les contraintes aux extrémités des fissures, comme le montre Figure 9.

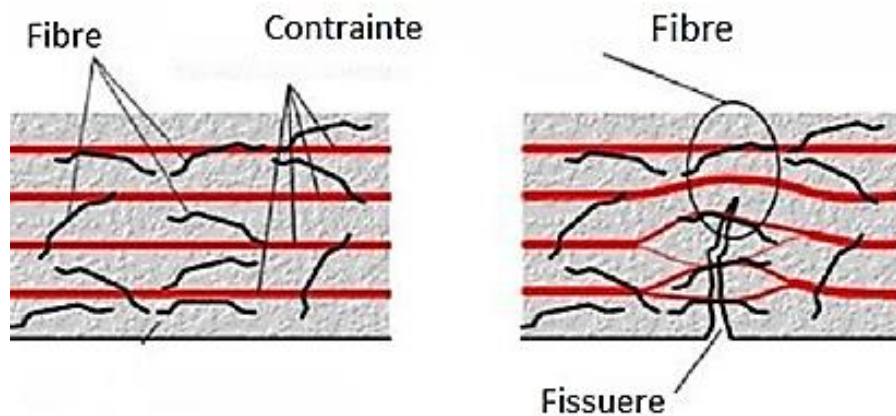


Figure I-9 Schéma de concentration des contraintes pour un composite avec renforcement par fibres (BARROS, 2009).

Lorsque des fibres de résistance et de module d'élasticité adéquats sont ajoutées au béton dans une proportion appropriée, ce matériau n'a plus l'avantage d'être un matériau de base.

Cela se produit parce que la fibre sert de pont de transfert des contraintes (Figure 9). Il en résulte une forte réduction de la vitesse de propagation des fissures dans le matériau qui commence à avoir un comportement pseudo ductile ou non cassant, présentant une certaine capacité de résistance après fissuration. L'utilisation de fibres

permet de réduire la fissuration du béton. Ce fait peut recommander son utilisation même pour le béton armé conventionnel, comme armature complémentaire pour réduire la fissuration du matériau. Les fibres dans le composite cimentaire peuvent agir sur les microfissures pendant le durcissement de la pâte de ciment, en contrôlant l'apparition de macro fissures, et sont également capable d'agir sur la pâte durcie, en faisant obstacle au développement de l'ouverture et de la longueur des fissures.

De nombreux facteurs interviennent dans les propriétés du composite cimentaire avec fibres. Les plus importantes sont les caractéristiques de la matrice du composite, les propriétés physiques et géométriques, les teneurs en fibres utilisées et l'interaction entre les fibres et la matrice. Les procédures de coulée et de compactage sont également des aspects pertinents, car elles affectent la distribution et la direction des fibres dans la matrice.

De grandes avancées dans la recherche et les applications du composite cimentaire avec fibres ont eu lieu au cours des dernières décennies. L'utilisation de ce matériau augmente dans le monde entier et il existe aujourd'hui plusieurs types de fibres disponibles sur le marché : acier (droites, ondulées, torsadées, déformées aux extrémités avec des crochets), polymères (polypropylène, polyester, nylon, aramide, etc.), verre, etc.

I.3.1 Histoire

L'utilisation de composites renforcés de fibres dans la construction civile est assez ancienne et intuitive, puisqu'elle a été décrite dans les Saintes Écritures, où le peuple égyptien utilisait de la paille et des racines dans la fabrication de briques et d'adobes, afin de créer des composites plus performants. La figure 10 montre la surface de la bauge renforcée par les fibres et la bauge sans fibre à l'état sec.

Le premier matériau utilisé dans la construction avec l'ajout de fibres produites à l'échelle industrielle a été l'amiante-ciment, obtenu à partir d'observations faites dans la pratique, sans une connaissance approfondie du comportement des fibres dans la pâte de ciment, mais il a présenté une résistance mécanique élevée si on le compare à d'autres composites utilisés dans la construction civile (AGOPYAN, 1993).



Figure I-10 La surface de la bauge renforcée par les fibres et sans fibre à l'état sec (Addison Greer, 1996)

(a) Surface de la bauge renforcée par les fibres ; (b) Surface de la bauge sans fibre

Le premier matériau utilisé dans la construction avec l'ajout de fibres produites à l'échelle industrielle a été l'amiante-ciment, obtenu à partir d'observations faites dans la pratique, sans une connaissance approfondie du comportement des fibres dans la pâte de ciment, mais il a présenté une résistance mécanique élevée si on le compare à d'autres composites utilisés dans la construction civile (AGOPYAN, 1993).

Dans les années 1910 et 1920, plusieurs brevets concernant le béton à base de ciment portland sont apparus, notamment des pièces d'acier discontinues et courtes pour le renforcement structurel du béton. Afin d'augmenter la résistance et la stabilité du béton armé, des fibres d'acier sont incluses dans l'armature conventionnelle. Le développement moderne du béton avec des fibres a eu lieu au début des années 1960, et une grande variété de fibres et de nouveaux matériaux sont apparus sur le marché, ce qui est toujours le cas aujourd'hui. Voici quelques exemples de ces fibres : métalliques (acier), minérales (verre), naturelles (sisal, jute, bambou et noix de coco) et synthétiques (polypropylène, nylon et polyester).

Selon Mehta et Monteiro (2008), la première utilisation structurelle du béton armé de fibres d'acier remonte à 1971, lors de la production de panneaux démontables pour un parking de l'aéroport d'Heathrow à Londres. Le béton contenait 3%, en poids, de fibres d'acier étirées à froid de 0,25 mm de diamètre par 25 mm de longueur. Au

moment de la dernière inspection rapportée, après cinq ans d'utilisation, les dalles ne présentaient aucun signe de fissure.

La distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice.

Par ailleurs, les fibres constituent une sorte de granulat filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectants très fortement le comportement global du matériau durci [Rossi 1989].

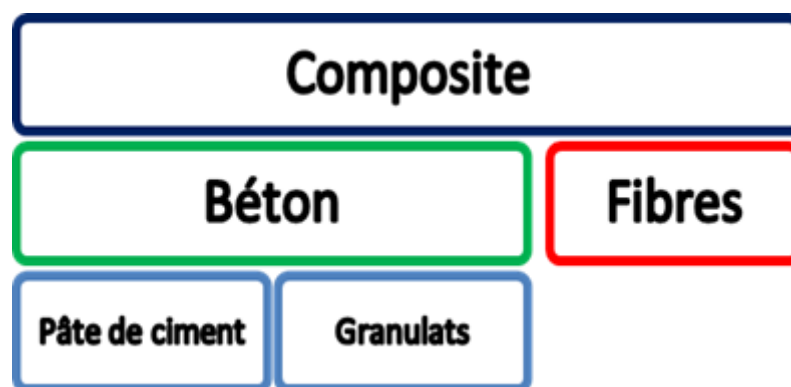


Figure I-11 Modèle de composite à base de fibres

Les fibres agissent sur les microfissures pendant le durcissement de la pâte de ciment, empêchant leur propagation et retardant l'apparition de microfissures. Elles agissent sur la pâte durcie en limitant l'ouverture et la longueur des fissures, augmentant ainsi sa durabilité.

Depuis lors, le béton avec des fibres d'acier a connu diverses applications : sols industriels, chaussées, revêtements de tunnels, blocs d'ancrage pour câbles de précontrainte et autres zones où les tensions sont concentrées, conduites d'eau de pluie, conduites d'eaux usées et ponceaux, coques, tuiles, éléments de confinement, palplanches, éléments de structures soumises à des tremblements de terre, éléments soumis à des chocs, traverses, éléments structurels préfabriqués en général, renforcement d'éléments structurels, entre autres.

Selon Serna (2007), les fibres peuvent être utilisées avec plus d'avantage dans les éléments où la distribution des contraintes est très variable (chaussées et revêtements de tunnels, par exemple), et/ou dans les trois dimensions ; dans les éléments fortement renforcés où les distances entre les armatures rendent le bétonnage difficile ; dans les éléments minces où le mauvais positionnement des armatures conventionnelles peut modifier substantiellement la hauteur utile ; dans les éléments faiblement renforcés.

I.3.2 Types et propriétés des fibres

Il existe de nombreux types de fibres disponibles pour un usage commercial. Selon la terminologie adoptée par l'American Concrete Institute (ACI), Committee 544 (Fiber Reinforced Concrete), il existe quatre catégories de béton renforcé par des fibres : les fibres d'acier, de verre, synthétiques et naturelles.

Le choix d'un certain type de fibre à utiliser dépend des caractéristiques que l'on veut obtenir dans le composite. Le module d'élasticité et la résistance mécanique sont les deux propriétés les plus importantes dans la définition de la capacité de renforcement que la fibre peut apporter au béton (FIGUEIREDO, 2005).

Les fibres à faible module d'élasticité et à allongement plus élevé que les matrices de ciment, telles que les fibres de polypropylène et de polyéthylène, sont capables d'absorber de grandes énergies, avec une ténacité et une résistance aux impacts élevées, mais ne contribuent pas beaucoup à l'augmentation de la résistance du composite (OLIVEIRA, 2005). Les fibres ayant un module d'élasticité et une résistance élevée, telles que les fibres d'acier, de verre et de carbone, produisent des composites ayant une résistance à la traction, une rigidité et une capacité à supporter des charges dynamiques élevées.

Dans le tableau 1, on peut observer certaines caractéristiques des différents types de fibres. Pour obtenir un produit final avec une durabilité et une qualité satisfaisante, la compatibilité entre la fibre et la matrice est fondamentale pour ce résultat. Une revue plus complète des types de fibres utilisées dans le béton peut être trouvée dans Bernadi (2003).

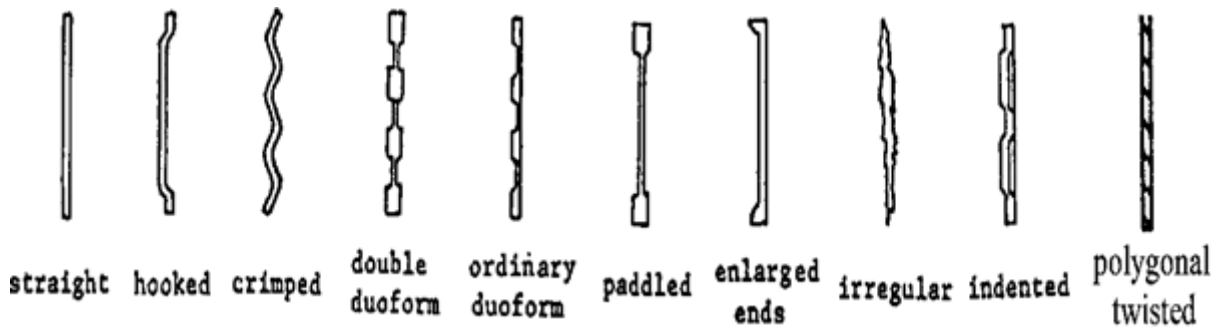
Tableau I-1 Valeurs de la résistance mécanique et du module d'élasticité pour différents types de fibres et de matrice cimentaire (adapté de Bentur et Mindess (2007) et ACI 544.1R-96).

Fibres	Masse spécifique (g/cm ³)	Diamètre μm	Résistance à la traction Mpa	Module d'élasticité Mpa	Déformation spécifique à la rupture (%)
Acier	7,8	100 - 1000	500 - 2600	210000	0,5 - 3,5
Verre					
E	2,54	8 - 15	2000 - 4000	72000	3 - 4,8
AR	2,7	12 - 20	1500 - 3700	80000	2,5 - 3,6
Synthétique					
Acrylique	1,18	5 - 17	200 - 1000	17000 - 19000	28 - 50
Aramide	1,44	10 - 12	2000 - 3100	62000 - 120000	2 - 3,5
Carbone	1,9	8 - 10	1800 - 2600	230000 - 380000	0,5 - 1,5
Nylon	1,14	23	1000	5200	20
Polyester	1,38	10 - 80	280 - 1200	10000 - 18000	10 - 50
Polyéthylène	0,96	25 - 1000	80 - 600	5000	12 - 100
Polypropylène	0,90	20 - 200	450 - 700	3500 - 5200	6 - 15
Naturels					
Cellulose	1,50	25 - 125	350 - 2000	10000 - 40000	3,5
Sisal	-	-100	280 - 600	13000 - 25000	3,0
Coco	1,12 - 1,15	- 400	120 - 200	19000 - 25000	-
Bambou	1,50	50 - 400	350 - 500	33000 - 40000	-
Jute	1,02 - 1,04	100 - 200	250 - 350	25000 - 32000	1,5 - 1,9
Herbe à éléphant	-	425	180	49000	3,6
Matrice en ciment (pour comparaison)	2,5	-	3 - 7	10000 - 45000	0,02

Une caractéristique importante des fibres est le rapport entre leur longueur et leur diamètre équivalent (diamètre du cercle dont l'aire est égale à l'aire de la section transversale de la fibre), qui est appelé rapport d'aspect ou facteur de forme (L_f / d_f). Plus le facteur de forme est élevé, meilleure sera l'adhésion entre la fibre et la matrice cimentaire.

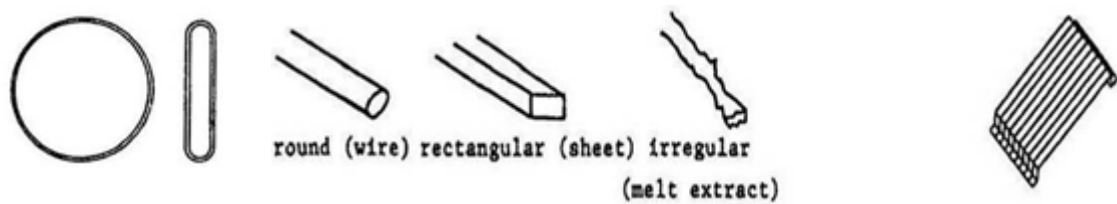
Quelques types de fibres métalliques sont présentés dans figure 12. Plusieurs formes sont utilisées, telles que droites, déformées ou irrégulières, toutes dépendant du

processus de fabrication. En général, les fibres métalliques droites et déformées sont obtenues en coupant de fils fins ou des feuilles d'acier. Les fibres peuvent également être produites à partir de fils étirés progressivement jusqu'à ce que le diamètre souhaité soit atteint. De ce fait, ils finissent par présenter une plus grande résistance mécanique (compte tenu de leur durcissement), qui peut être encore plus grande lorsque des aciers à plus haute teneur en carbone sont utilisés.



(a)

Formes des fibres métalliques



(b)Fibres en boucle

(c) Sections des fibres

(d) Fibres accolées

Figure I-12 Différents types de fibres métalliques

Dans la plupart des cas, les fibres métalliques sont libres, bien que celles dont les extrémités sont pliées soient également fournies dans des peignes et jointes aux extrémités par une colle soluble dans l'eau. Ainsi, lors du mélange, ces fibres se séparent et se dispersent individuellement dans la masse, ce qui facilite le processus de mélange avec le béton et évite l'agglutination et la mauvaise répartition.

Spécification, établit les paramètres pour la classification des fibres d'acier à faible teneur en carbone et fournit sur les exigences minimales de la forme géométrique,

les tolérances dimensionnelles, les défauts de fabrication, la résistance à la traction et à la flexion.

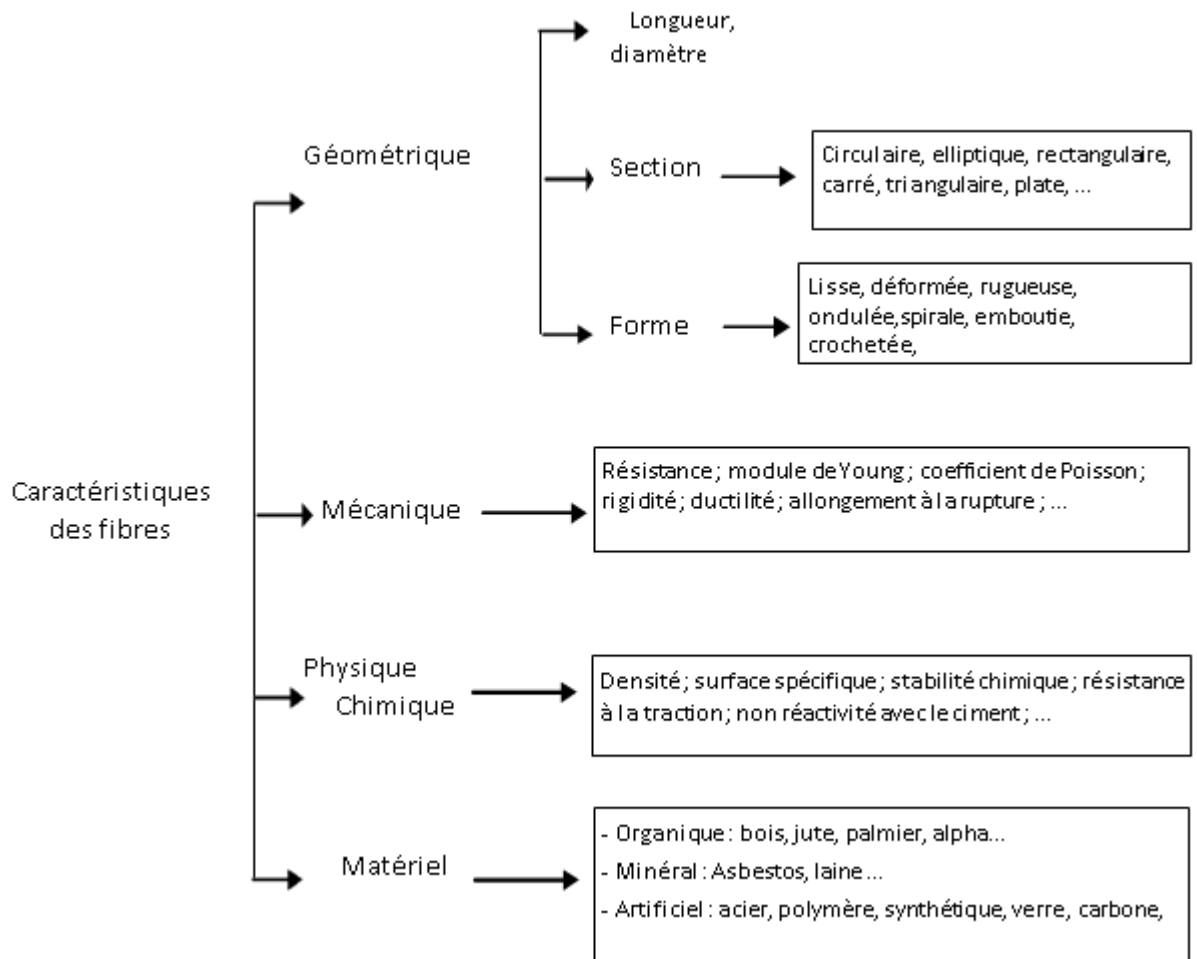


Figure I-13 Caractéristiques principales des fibres

I.3.2.1 Facteur de forme ou forme géométrique

Le facteur de forme, ou rapport d'aspect, est l'un des principaux paramètres permettant de caractériser une fibre. Il est défini comme le rapport entre la longueur de la fibre et le diamètre de la fibre. Une circonférence virtuelle, dont l'aire serait équivalente à la section transversale de la fibre, comme le montre sur la figure 14. Cet indice est capable d'indiquer l'efficacité de la fibre pour améliorer la ténacité du composite.



Figure I-14 Conceptualisation du facteur de forme des fibres (NUNES ; AGOPYAN, 1998).

Une augmentation du facteur de forme peut représenter une augmentation de la longueur de la fibre ou une diminution de son diamètre équivalent. Selon Mehta et Monteiro (2008), un rapport d'aspect plus élevé peut signifier à la fois une amélioration de la résistance à l'arrachement des fibres, en augmentant la longueur d'ancrage, et une augmentation du nombre de fibres qui peuvent intercepter une fissure, en raison de l'utilisation d'un plus grand nombre de fibres plus fines.

Selon Chanh (2005), la meilleure performance des fibres dans le béton à l'état durci est directement liée aux fibres ayant un facteur de forme plus élevé, car elles améliorent l'adhésion fibre-matrice. Par contre, ce facteur plus élevé affecte négativement la maniabilité du mélange frais comme le montre le figure 15. Chanh (2005) note également que, dans la pratique, il est très difficile d'obtenir un mélange uniforme si le facteur de forme des fibres est supérieur à 100.

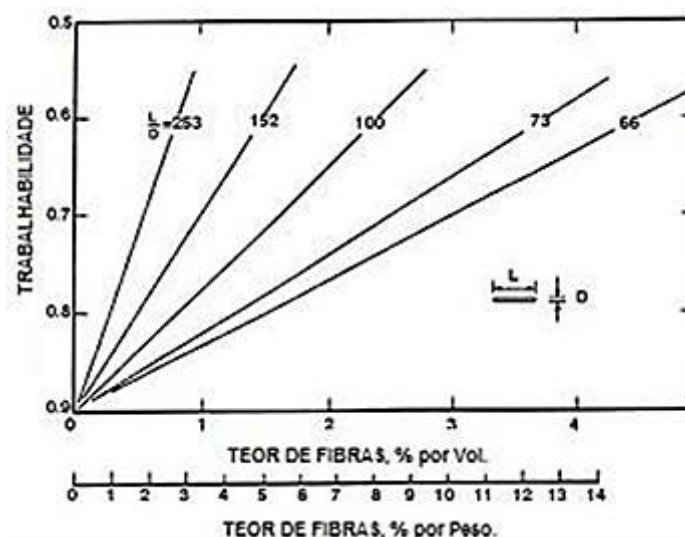


Figure I-15 Effet du facteur de forme des fibres sur la maniabilité du béton (HANNANT et al., 1974 apud CHANH, 2005).

Nunes et Agopyan (1998) ont analysé l'influence du facteur de forme des fibres ancrées dans la résistance à la flexion du béton renforcé de fibres d'acier et ont montré que pour les fibres de même longueur, la résistance à la flexion du SFRC augmente avec l'augmentation du facteur de forme des fibres. Ce fait est justifié par le nombre plus élevé de fibres présentes par unité de volume de la matrice. Cependant, les auteurs soulignent que l'influence du facteur de forme des fibres ancrées dans la résistance à la flexion du SFRC existe, mais cette incidence est moins significative que l'effet de la consommation de fibres dans la résistance.

Compte tenu de l'importance du facteur forme dans les performances du béton armé de fibres d'acier, le NBR 15530 (2007) a cherché à réglementer deux facteurs principaux : la géométrie de la fibre et la résistance de l'acier utilisé dans sa fabrication. Le niveau minimum de résistance de l'acier en fonction de la classe de fibre, ainsi que la spécification du facteur de forme minimum, pour chacune des situations, sont présentés dans le tableau 2. On peut observer que la norme établit différents niveaux de résistance en fonction du type et, principalement, de la classe de fibre évaluée.

Tableau I-2 Types et classes de fibres d'acier produites spécifiquement pour être utilisées dans le béton (NBR 15530 (2007)).

Classification des fibres	Facteur de forme minimum	Limite de résistance à la traction de l'acier (MPa)
A I	40	1000
A II	30	500
C I	40	800
C II	30	500
C III	30	800
R I	40	1000
R II	30	500

La longueur critique est un autre facteur qui influence le comportement du béton renforcé de fibres. Figueiredo (2000) affirme que la longueur critique d'une fibre peut être définie comme celle qui, lorsqu'une fissure se produit perpendiculairement à la fibre et positionnée dans la région médiane de sa longueur, fournit une contrainte en son centre égale à sa résistance à la traction.

Dans Figure 16, vous pouvez observer les distributions possibles des contraintes dans la fibre en fonction de la longueur critique basée par conséquent sur le modèle qui décrit le transfert de contrainte entre la matrice et la fibre augmentant linéairement des extrémités vers le centre de la fibre.

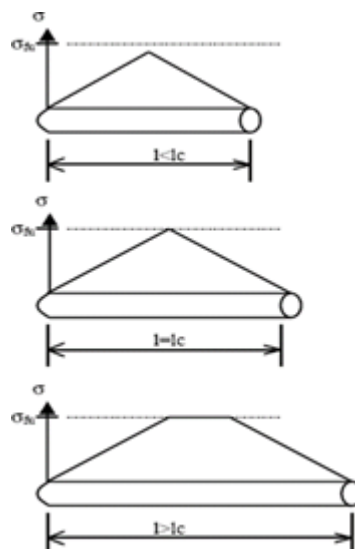


Figure I-16 Distributions possibles des contraintes le long d'une fibre en fonction de la longueur critique (BENTUR ; MINDESS, 2007).

Lorsque la fibre a une longueur inférieure à la longueur critique ($l_f < l_c$), la charge d'arrachement fournie par la longueur noyée dans la matrice n'est pas suffisante pour produire une contrainte qui dépasse la résistance de la fibre. Dans cette situation, avec l'augmentation de la déformation et par conséquent l'ouverture de la fissure, la fibre qui agit comme un pont de transfert de contrainte à travers la fissure sera tirée du côté qui a une longueur encastrée moindre. C'est le cas normalement rencontré pour les fibres d'acier dans les bétons à faible et moyenne résistance. Quand il y a un béton à haute résistance mécanique, la condition d'adhérence entre la fibre et la matrice est améliorée et, dans ce cas, il est possible de dépasser la valeur de la longueur critique en provoquant des ruptures de certaines fibres. Lorsque la longueur de la fibre est supérieure à la longueur critique ($l_f > l_c$), le blocage de la fibre se produit, empêchant son arrachement et provoquant ainsi l'augmentation de la contrainte agissant sur elle jusqu'à ce que la contrainte de rupture soit atteinte.

La ténacité maximale du composite est obtenue lorsque la longueur moyenne des fibres employées est égale à la longueur critique, c'est-à-dire $l_f = l_c$. De cette façon, la

contribution principale de ces fibres se situera dans le comportement post-fissuration de la matrice, car elles seront responsables de la réduction de la propagation des fissures et de l'augmentation de la ténacité.

Ainsi, plus les fibres sont orientées par rapport à la direction de la contrainte de traction principale, meilleures seront les performances du composite. Il est recommandé d'utiliser des fibres dont la longueur est égale ou supérieure au double de la dimension caractéristique maximale de l'agrégat utilisé dans le béton, c'est-à-dire qu'il doit y avoir une compatibilité dimensionnelle entre les agrégats et les fibres de manière à ce qu'elles interceptent plus fréquemment la fissure qui se produit dans le composite. Les figures 17 et 18 montrent respectivement les situations dans lesquelles il y a compatibilité dimensionnelle entre les fibres et les granulats grossiers et la situation dans laquelle il n'y a pas de compatibilité.

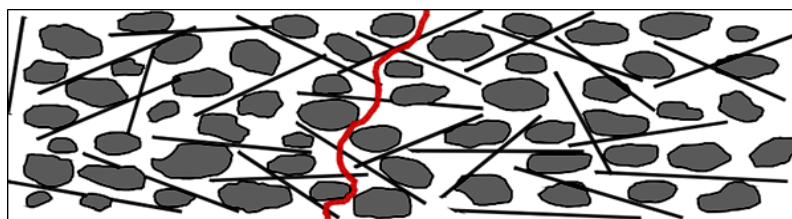


Figure I-17 Béton de fibres avec compatibilité dimensionnelle entre les fibres et les granulats grossiers (FIGUEIREDO, 2000).

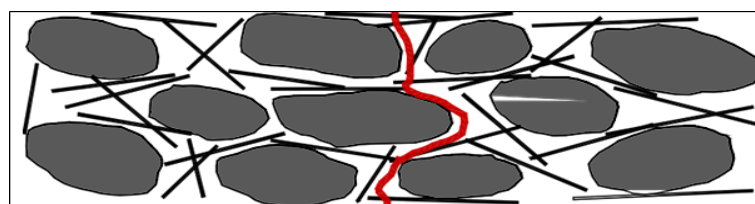


Figure I-18 Béton renforcé par des fibres où il n'y a pas de compatibilité dimensionnelle entre les fibres et les granulats grossiers (FIGUEIREDO, 2000).

On remarque que, lorsque cette compatibilité n'existe pas, quelques fibres fonctionnent comme un pont de transfert de contrainte dans la fissure. Deux alternatives sont normalement employées afin d'optimiser le mélange de béton avec des fibres : soit il réduit la taille caractéristique maximale de l'agrégat, soit il augmente la longueur de la fibre. Toujours selon Figueiredo (2000), la perte d'efficacité de la fibre inclinée par

rapport au plan de rupture peut être encore plus importante pour l'assemblage si celui-ci ne présente pas une ductilité suffisante.

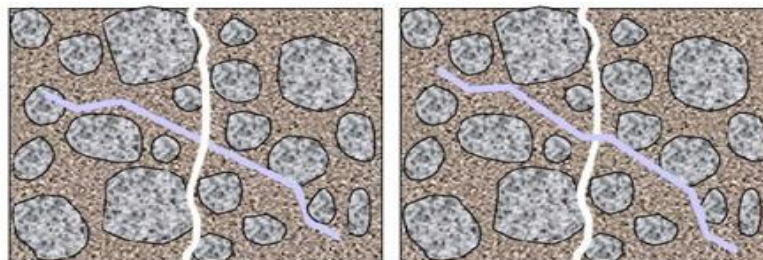


Figure I-19 Différence de comportement entre les fibres ductiles et fragiles lorsqu'elles sont inclinées par rapport à la surface de rupture (FIGUEIREDO, 2000).

Cela se produit en raison du niveau élevé de la contrainte de cisaillement auquel la fibre est soumise dans cette situation. S'il n'est pas capable de se déformer plastiquement, afin de s'aligner sur la contrainte principale, il finit par se rompre par cisaillement, comme le montre figure 19

Tableau I-3 Résumé des principales considérations obtenues dans le cadre théorique sur la teneur en fibres

Bentur et Mindess (2007)	<ul style="list-style-type: none"> - La présence de fibres modifie le comportement du matériau, et la valeur de la résistance à la traction peut dépasser celle trouvée dans la préfissuration de la matrice cimentaire. - Un volume de 5% de fibres d'acier plates et droites, orientées dans le sens de la tension, peut conduire à une augmentation dans cette résistance jusqu'à 130%.
Gopalaratnam et Shah (1987)	En fonction de la teneur en fibres, la résistance à la traction peut être supérieure de 40 %.
Mehta et Monteiro (2008)	La quantité maximale de fibres d'acier utilisée est d'environ 2 % en volume, avec un rapport d'aspect maximal de 100, car un volume élevé de fibres entraîne une perte de maniabilité.
Williamson (1974)	Une augmentation de 23% a été observée pour un béton avec 2% de fibres, pour la résistance à la compression.
ACI 544.4R-88	L'augmentation des teneurs ne contribue pas à l'amélioration de la résistance à la compression du béton.
Maccaferri (2008)	Le comportement à la traction est fortement influencé par l'augmentation du volume des fibres.
Cucchiara (2004)	Les résultats des essais de compression diamétrale montrent une augmentation considérable de la résistance à la corrosion.

Ramakrishnan (1989)	A des niveaux allant de 0,5 % à 2 %, il a été conclu que l'ajout de fibres entraîne une augmentation de la résistance à la fissuration de 15 % à 90 %, et une augmentation de la résistance à la flexion de 15 à 129 %.
Balaguru et Shah (1992)	Les bétons à résistance normale contenant des fibres ont des indices de ténacité beaucoup plus élevés que les bétons sans fibres.

I.3.2.2 Fraction volumétrique ou teneur en fibres

Par définition, les propriétés mécaniques du composite dépendent de la teneur en fibres qui sont incorporées dans le matériau, puisqu'elles constituent le composant structurel. En principe, plus la teneur en fibres est élevée, meilleures seront les performances du composite, car ces fibres intercepteront chaque microfissure en évitant ainsi leur propagation (GARCEZ, 2005).

Les fibres commencent à absorber une partie des contraintes internes, car la charge imposée à la matrice est transférée aux fibres, ce qui entraîne, dans la plupart des cas, l'augmentation du module d'élasticité et de la contrainte maximale du composite, en raison de l'augmentation de la contribution de la résistance mécanique des fibres aux propriétés mécaniques du matériau composite. C'est ainsi que les fibres améliorent l'efficacité du contrôle de la fissuration de la matrice.

Dans le figure 20, on peut observer l'influence de la teneur en fibres. Lorsqu'on utilise de faibles teneurs en fibres, on remarque principalement des changements dans le comportement plastique et dans la ténacité du composite, exprimés par l'allongement de la courbe Contrainte-Déformation, grâce à un meilleur contrôle de l'ouverture des fissures dans la phase de post-fissuration.

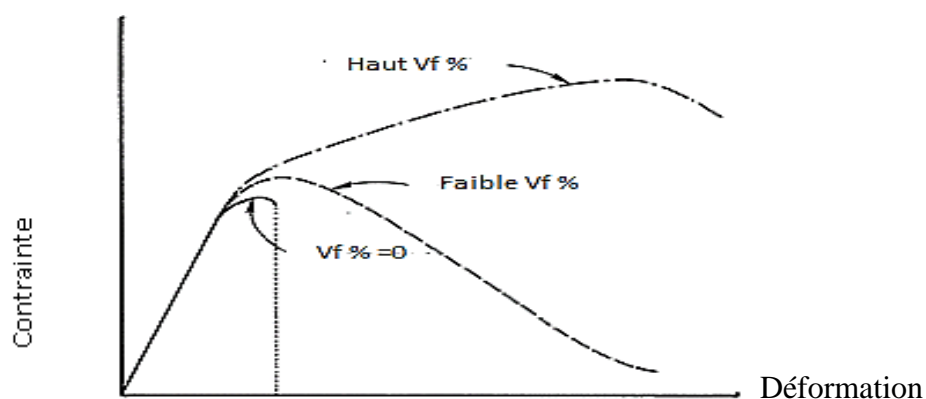


Figure I-20 Courbes typiques de contrainte-déformation en traction pour l'absence, le faible et le fort volume de fibres (BENTUR ; MINDESS, 2007).

Dans la phase de post-fissuration, la présence de fibres peut modifier le comportement du matériau, car la valeur de la résistance à la traction peut dépasser celle trouvée dans la pré-fissuration de la matrice cimentaire, comme le montre sur (figure 20), pour un volume élevé de fibres.

L'augmentation de la résistance à la traction présente des avantages en termes de structure, mais des volumes très élevés de fibres peuvent compromettre la maniabilité du mélange, ce qui entrave le processus d'exécution. Un faible volume de fibres augmente le niveau de tension transféré pour chaque fibre, entraînant plus rapidement la rupture de l'adhérence fibre-matrice et l'arrachement des fibres. Par conséquent, pour une bonne utilisation du matériau, il faut rechercher, dans la mesure du possible, une fraction volumétrique qui favorise une augmentation de la résistance à la traction et un bon niveau d'ouvrabilité du mélange.

Le type de fibre et sa fraction volumique ont un effet significatif sur les propriétés du béton renforcé par des fibres. Mehta et Monteiro (2008), ont classé les composites renforcés de fibres en fonction de la fraction volumique des fibres, comme suit :

a) Les fibres à faible fraction volumique, moins de 1 % de fibres incorporées dans le béton, sont utilisées pour réduire les fissures de retrait. Elles sont appliquées dans les dalles et les sols à grande surface exposés, qui sont des éléments structurels présentant des niveaux élevés de fissuration de retrait. Pour réduire les fissures de retrait dans les barres et les mailles d'acier, les fibres présentent plusieurs avantages, notamment :

- Elles offrent une répartition efficace de la charge lorsqu'elles sont uniformément réparties en trois dimensions ;
- Elles sont moins sensibles à la corrosion que les barres d'acier ;
- Elles peuvent réduire le coût de la main-d'œuvre pour couler les barres et les mailles d'acier.

b) Les fibres ayant une fraction volumique modérée, entre 1 et 2 %, augmentent le module de rupture, la ténacité à la rupture et la résistance au choc. Elles sont appliquées dans le béton projeté et dans les structures qui nécessitent une capacité d'absorption

d'énergie élevée, une plus grande résistance à la délamination, à l'écaillage et à la fatigue.

c) Les fibres à fraction volumique élevée, supérieure à 2 %, entraînent un durcissement par déformation des composites. Elles sont connues sous le nom de composites renforcés de fibres à haute performance en raison de leur meilleure performance.

Selon Figueiredo (2000), la définition conceptuelle du volume critique est qu'il correspond à la teneur en fibres qui maintient la même capacité de charge pour le composite à partir de la rupture de la matrice. C'est-à-dire qu'en dessous du volume critique au moment où la rupture de la matrice se produit, il y a nécessairement une baisse de la charge que le matériau peut supporter. Au-dessus du volume critique, le composite continue à accepter des niveaux de charge croissants même après la rupture de la matrice. Ce concept est illustré dans le figure 21, qui présente les courbes de charge par déviation dans des prismes de béton avec des fibres rompues par flexion. Il y a un étirement élastique linéaire initial correspondant au stade de pré-fissuration de la matrice du composite, semblable à un plateau d'élasticité, où il est permis de différencier le comportement du béton armé dont le contenu est inférieur, supérieur et égal au volume critique.

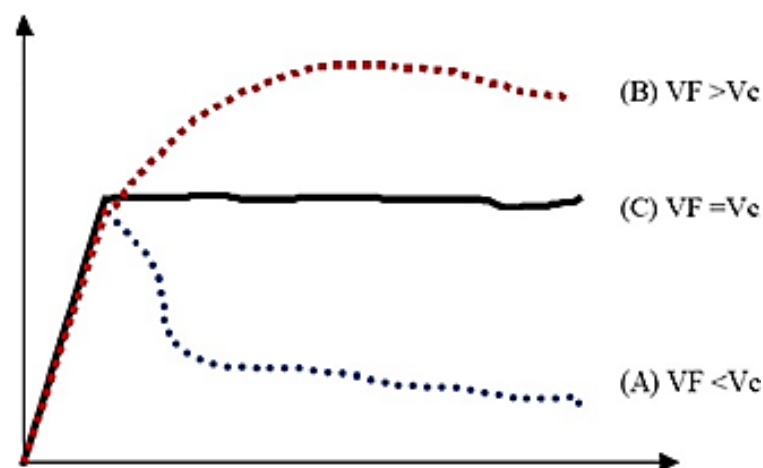


Figure I-21 Composites renforcés avec des fibres à des niveaux inférieurs (A), supérieurs (B) et égaux (C) au volume critique de fibres pendant l'essai de traction par flexion (FIGUEIREDO, 2000).

Tableau I-4 Résumé des principales considérations obtenues dans le cadre théorique

Weiler et Grosse (1996)	et	La géométrie des fibres contribue à l'énergie totale absorbée par le composite, c'est-à-dire qu'il peut supporter des charges plus importantes.
Mehta et Monteiro (2008)	et	Un facteur de forme plus élevé peut signifier soit une amélioration de la résistance à l'arrachement des fibres, par l'augmentation de la longueur d'ancrage, soit une augmentation de la quantité de fibres pouvant intercepter une fissure, résultant de l'augmentation de la longueur d'ancrage et de l'utilisation d'un plus grand nombre de fibres plus fines.
Ramakrishnan (1989)		Il s'avère que les fibres d'acier déformées aux extrémités contribuent, plus efficacement que les fibres simples, à l'amélioration des résistances à la traction et à la compression.

Weiler et Grosse (1996) La géométrie des fibres contribue à l'énergie totale absorbée par le composite, c'est-à-dire qu'il peut supporter des charges plus importantes.

Mehta et Monteiro (2008) Un facteur de forme plus élevé peut signifier soit une amélioration de la résistance à l'arrachement des fibres, par l'augmentation de la longueur d'ancrage, soit une augmentation de la quantité de fibres pouvant intercepter une fissure, résultant de l'augmentation de la longueur d'ancrage et de l'utilisation d'un plus grand nombre de fibres plus fines.

Ramakrishnan (1989) Il s'avère que les fibres d'acier déformées aux extrémités contribuent, plus efficacement que les fibres simples, à l'amélioration des résistances à la traction et à la compression.

I.3.3 Caractéristiques à l'état frais

La perte d'ouvrabilité du béton avec fibres est principalement influencée par la concentration volumétrique des fibres. Cependant, la finesse des fibres, le type de mélangeur utilisé pour la fabrication du mélange, de superplastifiant utilisé dans le mélange influencent également l'ouvrabilité du béton.

L'ajout de fibres modifie la consistance du béton et sa maniabilité. Cela se produit principalement parce qu'en ajoutant des fibres au béton, on ajoute également une grande

surface, ce qui nécessite de l'eau de mouillage. Plus la finesse des fibres est grande, plus l'impact sur la maniabilité du béton est important (Figueiredo, 2000).

Mehta et Monteiro (2008) commentent que malgré la perte substantielle de consistance du béton avec fibres, le lancement et le compactage sont bien meilleurs qu'un béton conventionnel sans fibres de faible consistance.

Les trois principales méthodes pour évaluer l'ouvrabilité du béton avec fibres à l'état frais sont les suivantes :

- L'affaissement du tronc du cône
- Tronc de cône inversé
- Essai de Vebe

I.3.4 Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton. De plus, les fibres peuvent améliorer la résistance à la flexion, à la traction, à la torsion, au cisaillement, aux chocs et à la fatigue. Par conséquent, le béton fibré continue de supporter les charges après la fissuration. Une capacité de flexion accrue est obtenue en raison de la résistance résiduelle accrue due à l'utilisation de fibres. Cette propriété est également fonction du type, de la quantité et de la forme des fibres utilisées. Il est important de rappeler qu'une répartition uniforme des fibres dans le mélange est une condition préalable à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton fibré.

Tableau I-5 Ténacité des matériaux à base de ciment renforcé de fibres

matériau composite	volume de fibres en pourcentage(%)	ténacité p/r aux produits non renforcés
béton		
acier	0,5	2,5-4,0
acier	1,0	4,0-5,5
acier	1,5	10-25
verre	1,0	1,7-2,0
polypropylène	0, 5	1,5-2,0

polypropylène	1,0	2,0-3,5
polypropylène	1,5	3,5-15,0
nylon	1,0	1,5-1,7
Mortier		
acier	1,3	15,0
amiante	3-10	1,0-1,5
pâte de ciment		
verre	4,5	2,0-3,0
particules de mica	2,0-3,0	3,0-3,5

I.3.4.1 Résistance à la compression

La microfissuration du béton commence vers 50% de sa charge maximale et progresse jusqu'à atteindre un pic (Paultre, 2011). Compte tenu du mode d'action des fibres sur les fissures, la résistance à la compression d'un BRF, à partir d'une charge égale à 50% de la charge maximale, devrait être légèrement supérieure à celle d'un béton ordinaire. Cependant, la réalité est tout autre. En fait, certains chercheurs ont découvert que la résistance maximale à la compression des BRF est légèrement inférieure à celle du béton ordinaire (Boulekbache et al., 2009 ; Mansur et al., 1999). ont constaté par exemple, que le béton avec des fibres subissait une réduction de 5% à 7% de la résistance ultime à la compression. Ces auteurs s'interrogent sur l'existence de défauts supplémentaires dans la matrice cimentaire provoqués par l'ajout de fibres afin d'étayer leurs résultats.

D'autre part, selon ces auteurs, le principal avantage de l'ajout de fibres est qu'il rend les matériaux plus ductiles en compression. L'impact des fibres sur le comportement en compression est illustré sur la figure 22.

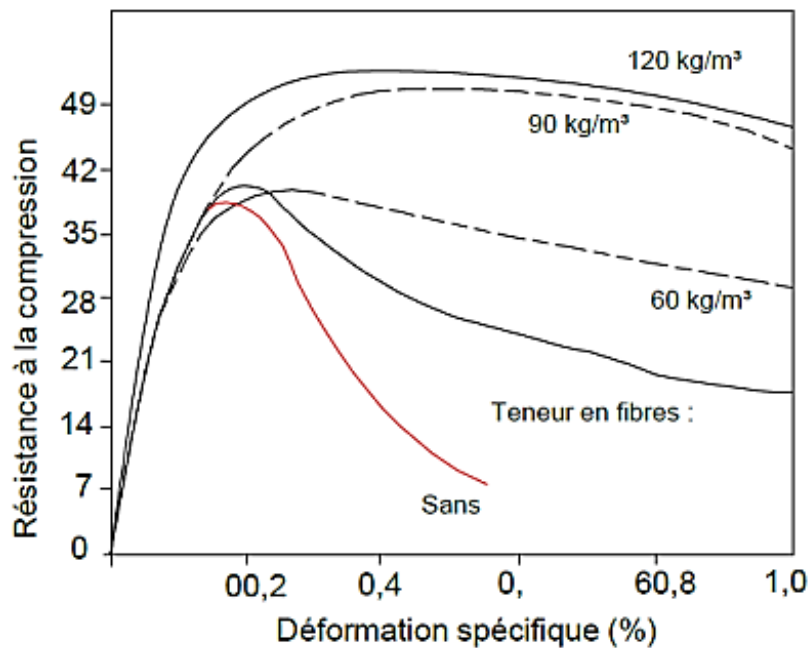


Figure I-22 Influence des fibres sur le comportement en compression d'un béton à résistance normale avec des fibres d'acier (Balaguru et Shah, 1992).

Des tendances similaires ont été observées par Mansur et al. (1999), qui ont noté une augmentation de la ductilité et une diminution de la résistance à la compression. Ils ont également souligné l'impact minime de l'orientation des fibres sur la résistance maximale à la compression. Entre les spécimens avec des orientations favorables et défavorables, une variation de cette résistance d'environ 4% a été trouvée.

I.3.4.2 Résistance à la traction

Les trois essais différents peuvent être utilisés pour déterminer la résistance à la traction du béton : l'essai de traction directe, l'essai de traction indirecte, également connu sous le nom d'essai brésilien, et l'essai de traction par flexion.

I.3.4.2.1 Résistance à la traction directe

Les essais de traction directe ne sont pas normalisés, et différents types d'éprouvettes et de conditions de support sont utilisés dans ces essais (Naaman, Fischer et Krstulovic-Opara, 2007).

Selon Bentur et Mindess (2007), l'augmentation de la résistance à la traction directe ne dépasse pas 20 % lorsque l'on utilise les teneurs en fibres employées dans la pratique (moins de 2 % en volume), et les augmentations les plus importantes sont observées lorsque l'on utilise des fibres plus fines. La norme ACI 544.1R-96 (2006) indique que l'ajout de 1,5 % de fibres par volume aux matrices à base de ciment augmente leur résistance à la traction directe de 30 à 40 %.

La résistance à la traction augmente plus rapidement dans les matrices avec une meilleure adhésion des fibres, comme les bétons à haute résistance avec des ajouts de cendres volantes (Balaguru et Shah, 1992). Les fibres alignées dans la direction des contraintes de traction produisent des augmentations plus importantes de la résistance à la traction directe que les fibres réparties au hasard dans la matrice du béton.

I.3.4..2.2 Résistance à la traction indirecte

La résistance à la traction indirecte par compression diamétrale du béton augmente de manière significative lorsque des fibres sont ajoutées. Les résultats des essais de traction par compression diamétrale du béton avec fibres sont difficiles à interpréter après l'apparition de la première fissure, car la distribution des contraintes après la fissuration n'est pas connue. L'identification précise que la première fissure dans cet essai est difficile sans l'utilisation de jauges de contrainte à résistance électrique.

L'augmentation de la résistance à la traction par compression diamétrale due aux fibres dépend de la compatibilité entre la longueur des fibres, la dimension maximale des agrégats (Figueiredo, 2000) et également de l'adhérence fibre-matrice, qui peut être considérablement augmentée par l'ajout de cendres volantes (Balaguru et Shah, 1992).

Araújo (2002) rapporte que des augmentations de 87 à 130% de la résistance à la traction directe ont lieu par l'ajout de 1,5% de fibres d'une longueur de 30 mm et d'un élanement de 45. Nunes (2006) a obtenu une augmentation de 67 à 104% en ajoutant 2,0% de fibres avec une longueur de 35 mm et un élanement de 65, et il a également vérifié que la résistance à la traction diminuait avec l'augmentation de la taille maximale des agrégats de 12,5 à 19 mm. En ajoutant 1,25% de fibres de 60 mm de long

et d'élanement 60, Oliveira (2007) a obtenu une augmentation de 83% de la résistance à la traction.

I.3.4..2.3 Résistance à la traction et à la flexion

Avant la fissuration et pendant la phase du comportement linéaire-élastique. Le comportement du béton n'est pas influencé par les fibres, ces dernières améliorent toutefois son comportement après fissuration. La courbe de la charge en fonction du déplacement vertical des poutres en béton avec fibres montre une capacité de déplacement vertical plus élevée avant la rupture et la branche descendante avec une perte moins abrupte de la capacité de résistance que les poutres en béton sans fibres.

Il n'existe pas encore d'essai normalisé pour obtenir la résistance à la traction par flexion ni les paramètres pour caractériser le comportement en flexion du béton avec fibres. Parmi les normes internationales les plus répandues figurent la norme RILEM TC 162 - TDF (2002), la norme ASTM C 1609/C (2005) et la norme UNE-EN 14651 (2007). Les différences entre ces normes résident dans la manière de charger les spécimens, avec une ou deux forces centrées - essai de flexion en trois ou quatre points -, dans l'exécution d'une entaille centrale et dans la façon d'obtenir les contraintes à partir du diagramme charge/déflexion ou charge/ouverture d'entaille. Phrase à revoir

Selon le type et la teneur en fibres, le comportement du béton avec fibres peut être du type des courbes 1 à 4 de la figure 23, étant entendu que les courbes 1 à 3 sont des bétons avec ramollissement du déplacement, et que celle de la courbe 1 c'est un béton avec peu de différence de comportement par rapport à celui sans fibres.

Tableau I-6 Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés

Matériau composite	Volume de fibres (en %)	Résistance en flexion p/r aux produits non renforcés
BÉTON		
Acier	1-2	2,0
Verre	1-2	2,5-3,5
MORTIER		
Acier	1,3	1,5-1,7
Verre	2	1,4-2,3

Amiante	3-10	2,0-4,0
PÂTE DE CIMENT		
Verre	4,5	1,7-2,0
Particules de mica	2-4	2-2,5
Polypropylène	1-2	1,0

En général, l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement flexionnel s'apparente à celui sur le comportement en traction. Ainsi, Ferrara et al. (2012) comparent les contraintes résiduelles obtenues à partir d'une analyse inverse simplifiée d'un essai de flexion 3 points à celles obtenues d'un essai de traction directe et d'un essai DEWS. Afin d'effectuer une comparaison adéquate, les contraintes résiduelles ont été déterminées pour des niveaux de déformations équivalentes. Cette comparaison a permis de constater, pour ces trois types d'essais, une augmentation des contraintes résiduelles en fonction de l'augmentation de l'orientation moyenne. Dans cette étude, l'orientation moyenne des fibres a été déterminée selon l'équation théorique proposée par Krenchel est donc fonction de la densité de fibres traversant le plan d'analyse.

Enfin, Zerbino et al. (2012) ont réalisé une série d'essais de flexion 3 points sur des éprouvettes prélevées dans différentes directions à l'intérieur d'une dalle de BRF avec 0,45% du volume de fibres accrochées. D'une part, cette étude a permis d'illustrer la variation de la densité des fibres en fonction de la direction de coupe de l'éprouvette. Puis, d'autre part, la dépendance des contraintes résiduelles par rapport à cette densité de fibres. Ferrara et al. (2012), ont indiqué que les tendances observées ont révélé que les contraintes résiduelles augmentaient avec la densité des fibres. Il convient de noter que la densité des fibres dans une section est fortement corrélée à l'orientation moyenne des fibres.

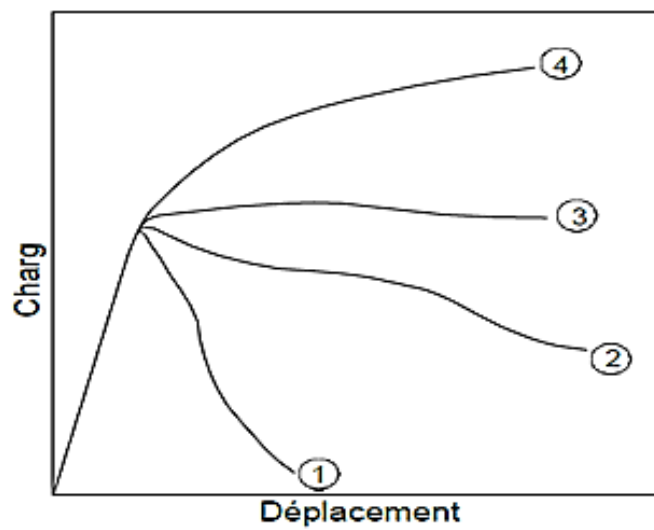


Figure I-23 Courbes de charge en fonction du déplacement pour le béton avec fibres (Balaguru et Shah, 1992).

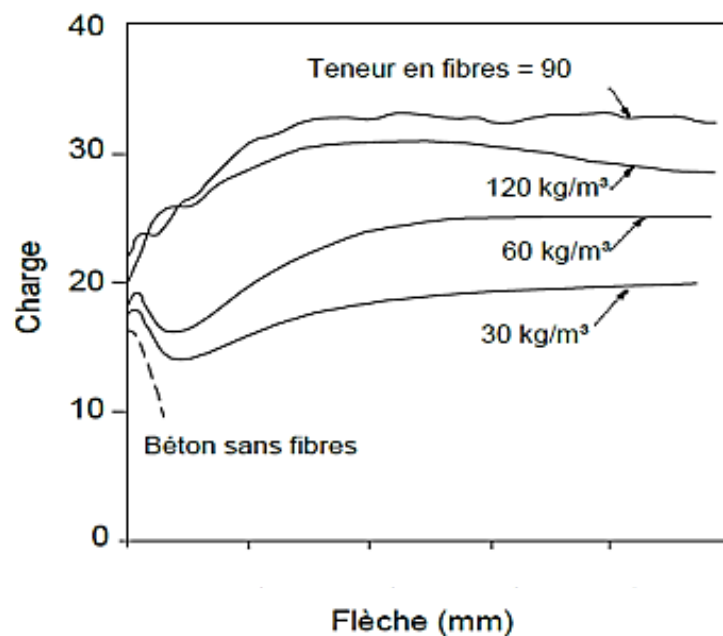


Figure I-24 Courbes de charge en fonction de la déflexion avec différentes teneurs

I.3.4.2.4 Résistance au cisaillement

Il existe peu d'informations dans la littérature sur la façon dont l'orientation des fibres affecte le comportement au cisaillement. En effet, les études sur ce sujet se concentrent fréquemment sur l'impact du type et de la quantité de fibres sur la résistance au cisaillement.

En revanche, Banthia et al (2014). Ont étudié la façon dont le type et la quantité de fibres affectent le comportement en cisaillement. Ces auteurs ont découvert que lorsque le volume de fibres augmentait, la ductilité et la résistance au cisaillement augmentaient également. De plus, il a été découvert que les crochets sont plus efficaces.

Dans une étude sur l'effet de l'orientation des fibres sur le comportement en cisaillement, Boulekbache et al. (2012) ont montré qu'il existe une corrélation entre l'indice de ductilité en cisaillement et l'orientation moyenne des fibres. Le montage utilisé dans cette étude a été proposé par Mirsayah et Banthia (2002), suite à une modification à partir de celui proposé par la norme japonaise JSCE SF-6.

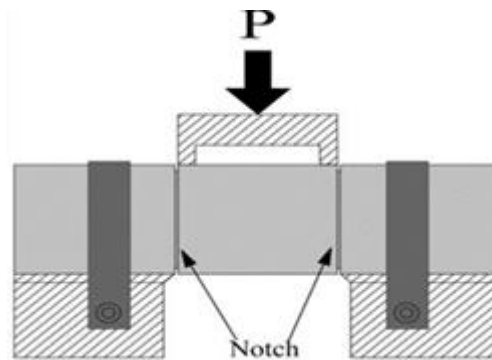
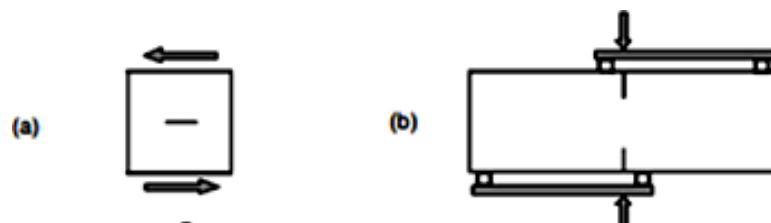


Figure I-25 Montage de cisaillement, a) Mirsayah et Banthia (2002), b) JSCE-SF6

Shilang et Hans (2005) présentent un résumé de ces différents essais qui sont illustrés sur la Figure 26. Selon ces auteurs, le seul essai qui présente un mode de rupture en cisaillement pure est celui présenté sur la Figure 26-a. En effet, l'excentricité des charges dans les autres essais induit des contraintes de traction résultant ainsi en un mode de rupture mixte.



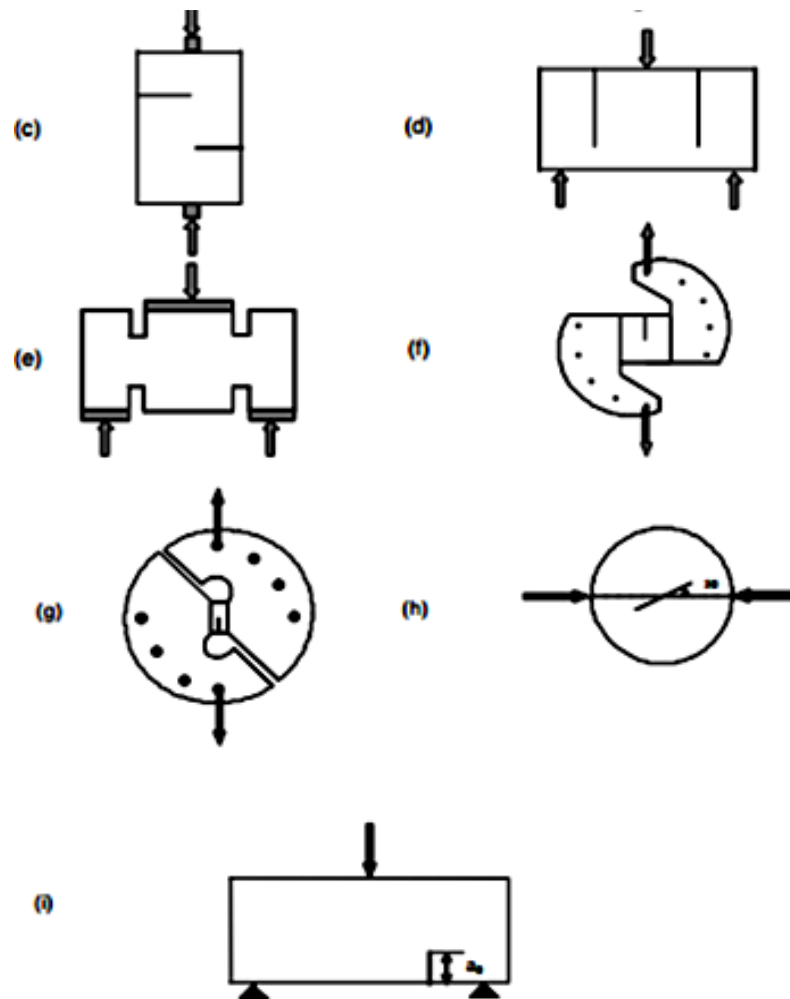


Figure I-26 Essais de caractérisation du comportement en cisaillement

I.3.5 Fabrication des fibres : cas des fibres d'acier

La confection des fibres d'acier s'est développée largement pendant les dernières décennies, toutefois au démarrage, ces fibres d'acier sont venues des tôles coupées en métal. Le premier procédé, certifié en 1974 par Batelle corporation de l'Ohio, comporte l'extraction des fibres d'un bain liquide d'acier. Il s'agit d'une roue, qui conçoit une suite de disque parallèle en cuivre comprenant des entailles, immergée sur une petite surélévation dans un bain d'acier en fonte, elle envoie, par rotation dans l'air sous l'effet de la force centrifuge, des fractions de métal en fusion qui se refroidissent et octroient des fibres de petites tailles.

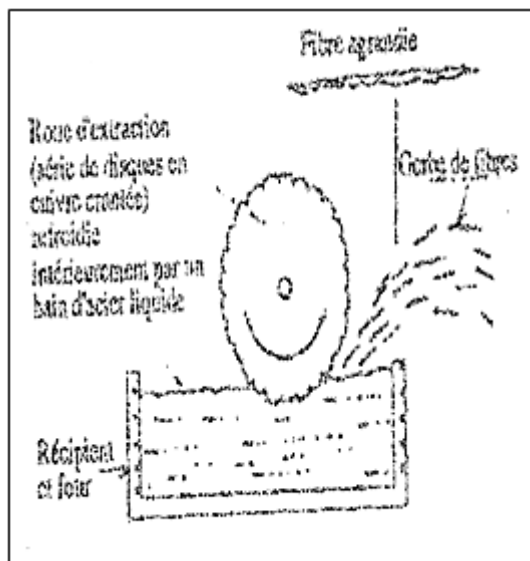


Figure I-27 Procédé de production de fibres métalliques

Les paramètres qui bornent les caractéristiques géométriques des fibres sont : Les entailles du disque, sa vitesse de rotation, ainsi que sa profondeur d'immersion. La Figure.27 évoque le procédé de fabrication des fibres d'acier.

Selon ce procédé, on peut disposer des fibres avec des surfaces discontinues, ce qui aide à la cohésion avec la matrice cimentaire. Leurs diamètres peuvent dégringoler jusqu'à 0.5 mm et leurs longueurs peuvent aboutir jusqu'à 50 mm. Ce précepte industriel consente à réaliser des fibres avec une plus grande quantité en carbone, des fibres en acier inoxydables, des fibres réfractaires et des fibres en ferrochrome.

Un autre procédé consiste à faire parvenir de l'acier dans une filière pour procurer des fibres d'acier. Les fils ininterrompus peuvent être découpés et pourvus de crochets. Les fibres sont assemblées en bûchettes ou en sacs de 10 à 20 fibres simples. Ces paquets de fibre peuvent être instantanément mis dans le malaxeur, au même moment que le mélange sec.

Les contraintes de malaxage, ont un effet sur les plaquettes qui se brisent en deux à chaque fois. Quand les paquets ne comprennent que 2 à 4 fibres, les contraintes d'adhérence des fibres sont donc plus grandes que les contraintes de malaxage. L'effet de l'humidité naturelle des agrégats où l'arrivée de l'eau décompose la colle, délivrant certainement les fibres qui saisissent leur élanement élémentaire.

La résistance à l'extraction de la fibre est élevée grâce à l'existence des crochets aux extrémités, ce qui offre un excellent attrouplement des fibres suite à la fissuration. Leur diamètre s'étale de 0.4 à 0.8 mm et leurs longueurs de 25 à 60 mm.

L'exploitation des matériaux de diverse nature ainsi que le développement de fibres spécifiques a été motivé par la recherche incessante d'exploits techniques associés aux nécessités économiques

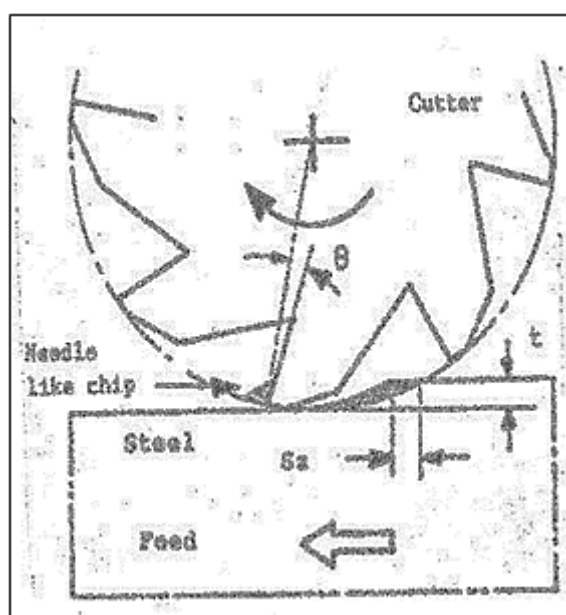


Figure I-28 Schéma de la méthode fraisage

En effet, des recherches élaborées en Belgique ont dévoilé que les fibres avec des crochets disposent d'une énorme cohésion et peuvent augmenter les résistances. D'autres fibres métalliques particulières, réalisées et exploitées sous le nom de Beki-shield, exposent des caractéristiques captivantes. Elles sont très fines et moins corrosives, au touché elles sont moins désagréables que les fibres de verre, et sont réalisées depuis un acier inoxydable. Une façon de confectionner des fibres en France a été authentifiée par le Groupe Saint-Gobain. Ces dernières sont exploitées sous le nom FIBRAFLEX, elles sont acquises par immersion à vitesse élevée d'un jet de métal liquide sur une roue en rotation puis rafraîchis à l'eau.

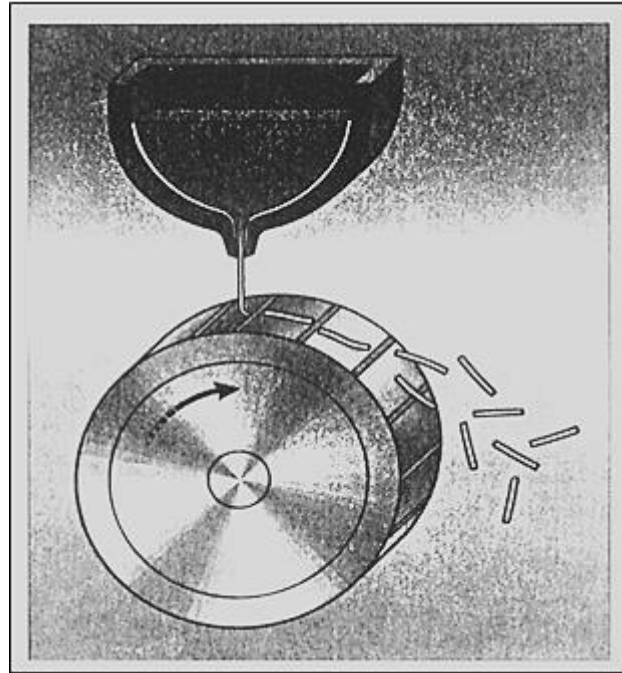


Figure I-29 Méthode de la trempe d'un jet de métal sur une roue en rotation

En faisant un résumé des principales approches trouvées dans la littérature, traitant spécifiquement du béton renforcé par des fibres d'acier, on constate que les études développées sur le sujet sont relativement récentes par rapport au béton habituel. La plupart des études présentent des résultats qualitatifs, de sorte qu'il n'existe pas encore de valeurs quantitatives consensuelles pour les différentes propriétés du matériau, notamment en ce qui concerne le béton fluide. Ainsi, il est justifié d'approfondir les études portant sur les paramètres qui collaborent non seulement à l'amélioration du matériau lui-même, mais aussi aux méthodes d'analyse et de conception des éléments structurels exécutés avec le nouveau composite permettant l'application de bétons fluides renforcés de fibres de manière optimale et sûre.

I.3.6 Utilisation et influence de l'hybridation des fibres :

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques différentes selon leur nature. Chaque type de fibre peut présenter une influence particulière sur le comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications spécifiques.

Le choix du type de fibres utilisées est donc fonction du domaine d'utilisation et des performances souhaitées. S'agissant de la nature, la fibre métallique est la plus utilisée. Dans le cas de l'utilisation de deux types de fibres métalliques dans la même composition, les fibres courtes qui, au 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 augmenter au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les fibres peuvent longues continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité [Youcef Fritih,(2009), (voir Figure 30 a et b).

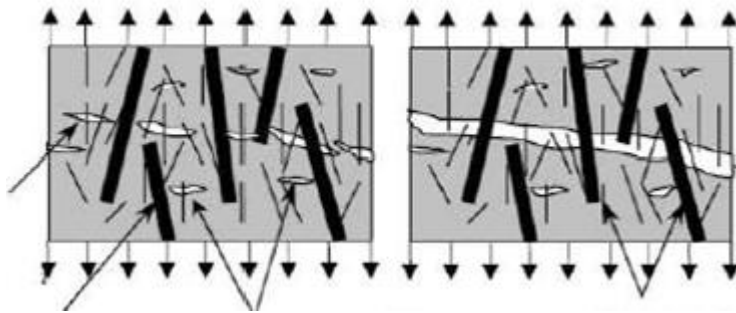


Figure I-30 Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macro-fissures. [Youcef Fritih,(2009)]

I.4 Généralités sur les matériaux à gradient fonctionnel

Les matériaux gradués (MGF), nouvelle classe de matériaux composites, ont fait l'objet d'une grande attention ces derniers temps. Attention un MGF typique est un composite non homogène créé à partir de diverses phases constitutives de matériaux (généralement de la céramique et du métal). Les différentes phases microstructurales d'un matériau MGF ont diverses fonctions, comme la modification progressive de la fraction volumique des matériaux constitutifs avec un changement doux et continu d'une surface à l'autre.

L'idée d'une gradation fonctionnelle des matériaux, qui a déjà été utilisée avec succès dans d'autres disciplines de l'ingénierie, fait actuellement l'objet d'une tentative de transfert au domaine de la construction par le biais d'études de recherche. Les éléments de construction dont les fonctions sont graduées présentent une modification continue de leurs propriétés en coupe transversale. La porosité, la concentration de fibres ou le rapport des matériaux (en termes d'alliage ou de mélange de substances) peuvent tous être considérés comme des propriétés qui varient. Selon la manière dont ils sont conçus, le développement de matériaux de construction plus légers et plus recyclables peut avoir un effet positif sur les objectifs économiques et environnementaux de la nation. Dans le domaine du génie civil, la gradation des propriétés des matériaux est une étape cruciale dans la création de nouvelles structures. L'application du béton comme exemple amplifie les possibilités et les potentiels offerts par la gradation.

La figure 31, montre l'idée de matériaux à gradient de propriété qui est appliquée dans une variété d'industries. Les MGF ont été initialement développés pour le secteur aérospatial, où ils combinaient deux caractéristiques opposées, comme la conductivité thermique et l'isolation thermique. Actuellement, ils permettent de produire des matériaux solides et légers qui sont utiles dans une variété d'industries, notamment le nucléaire, les semi-conducteurs, les matériaux de construction et les matériaux de conversion énergétique.

I.4.1 Historique

Actuellement, les structures fonctionnellement classées se trouvent en abondance dans la nature. Nous pouvons les rencontrer dans le bio tissu des plantes et des animaux et même dans notre corps en citant à titre d'exemple les os, les coquilles, les noix de coco et les feuilles de certaines graminées, comme les bambous. Ces derniers sont dotés de plusieurs caractéristiques de qualité supérieure, ils sont légers, solides et élastiques, celles-ci sont dues à leurs nœuds qui créent une hiérarchie et donnent naissance à l'activité de structure.

Dans la même perspective, les feuilles de noix de coco sont soufflées par le vent et transportées librement à n'importe quelle direction, alors qu'une partie très rigide reste en s'adoptant à son milieu de vie.

De même, une simple comparaison entre les plantes qui vivent sur une surface plane et celles poussant sur une pente, nous concluons que leur comportement varie en fonction des environnements dynamiques.

Tous ces exemples, ouvrent la porte vers la biométrie qui tente d'appliquer les caractéristiques de conception de la nature dans les sciences industrielles et médicales.

Les MGF ont connu une évolution importante dans le temps. D'abord, ils ont été proposés en 1984 par deux chercheurs dont l'un étudiait l'aéronautique et l'autre s'intéressait aux matériaux avancés. Ces deux chercheurs parlaient de leur rêve concernant un avion spatial exposé à un environnement à très haute température (1700° C).

Ils discutaient la problématique de la résistance à de graves écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur et ils se sont confrontés à la réalité suivante : Il n'existe pas de matériau unique supportable à une telle condition. A partir de cette réflexion, ces deux chercheurs ont mis au point ce qu'on appelle les MGF, ils les ont considérés comme des matériaux caractérisés par une résistance thermique améliorée et par des propriétés mécaniques spécifiques. Pour ce faire, ils ont opté pour l'utilisation de la céramique à la surface extérieure exposée à l'environnement à haute température,

cependant pour la surface intérieure, ils ont opté pour des matériaux conducteurs de chaleur.

En 1987, leur recherche a été acceptée par le ministère de l'éducation et des sciences qui a lancé un grand projet universitaire intitulé " la recherche sur la technologie de base pour le développement de matériaux à Gradient de propriétés et l'étude de la relaxation des contraintes thermiques" traitant ces MGF . A partir de cette mise en valeur du projet, plusieurs autres chercheurs, 17 laboratoires nationaux, des universités et des entreprises ont initié leur recherche en discutant les méthodes de développement des MGF , la conception des matériaux, leur production et leur évolution.

Enfin, une contrainte thermique relaxant le matériau MGF a vu le jour lors d'une première conférence internationale qui s'est tenue à Sendai en 1990, ceci a conduit à fonder toute une technologie, pour recueillir les attentions, non seulement au niveau des nations, mais aussi au niveau mondial.

Les matériaux constituant les parois des engins spatiaux sont appelés à travailler à des températures de surface de 1800°C ainsi qu'à un gradient de température de l'ordre de 1300°C. A cette année-là, aucun matériau industriel n'était connu pour supporter de telles sollicitations thermomécaniques [Reddy, 1997]. Trois caractéristiques sont à considérer pour la conception de tels matériaux :

- Résistance thermique et résistance à l'oxydation à haute température de la couche superficielle du matériau ;
- Ténacité du matériau côté basse température ;
- Relaxation effective de la contrainte thermique le long du matériau [Timoshenko., S.Woinowsky-Krieger,1959].

Pour répondre à un tel cahier des charges, l'idée originale des MGF a été proposée pour élaborer un nouveau composite profitant à la fois des propriétés des céramiques (côté haute température) et des métaux (côté basse température).

I.4.2 Application de la technologie du MGF en génie civil

Sous les auspices des projets de recherche effectués à l'université de Stuttgart, différentes classes de matériaux de construction (béton, textile, bois, métaux et polymères), des méthodes de production et des domaines d'application (structure porteuse, enveloppe du bâtiment, technique de mélange) ont été étudiés et évalués pour certains éléments du bâtiment basés sur le concept du MGF.

L'objectif de ces projets est d'évaluer les nouvelles possibilités de conception offertes par les matériaux gradués, en les voyant aussi sous l'angle architectural, et d'élaborer des propositions pour leur utilisation dans divers domaines. Ci-dessous, nous passons en revue, quelques études relatives à l'utilisation du concept des matériaux à gradient de propriétés en génie civil.

I.4.3 Le Béton à gradient fonctionnel

Werner Sobek a été le premier à formuler le concept des bétons à gradients fonctionnel, appelé aussi gradients de propriétés [sobek et al]. Les travaux de développement ont lieu à l'institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK, Institut de la conception et de la construction de structures légères) de l'Université allemande de Stuttgart, dans le cadre des projets de recherche « Matériaux à gradient dans le bâtiment et le génie civil » et « planchers préfabriqués à gradient de propriétés » [Heinz al., 2011]. La fabrication, l'automatisation, l'optimisation et la technologie du béton sont actuellement examinées à l'Université de Stuttgart.

L'optimisation des structures en béton suivant le concept du MGF est actuellement en étude et en développement dans plusieurs projets de recherche. Le but principal est de satisfaire un ajustement continu des propriétés du béton, telles que la densité, la porosité, la conductivité thermique et la résistance, à l'intérieur de l'élément conformément aux spécifications et aux profils des efforts déterminés pour l'élément (figure 31).



Figure I-31 Structure d'une paroi à gradient de propriétés, source: ILEK

Il est à noter que l'idée du béton à gradient de propriétés, a permis de réaliser des murs extérieurs moins épais par rapport aux systèmes composites d'isolation thermique comparable, avec une conductivité thermique bien inférieure à celle du polystyrène. Cette invention conduit à l'amélioration de la recyclabilité et la sauvegarde des ressources économiques.

Le béton stratifié non homogène avec une différenciation structurale en couches dans la configuration est présenté sur la Figure 32 et 33. De nombreuses expériences ont été menées sur les avantages fonctionnels du béton stratifié sur des éléments coulés horizontalement à double couche de la forme prismatique.

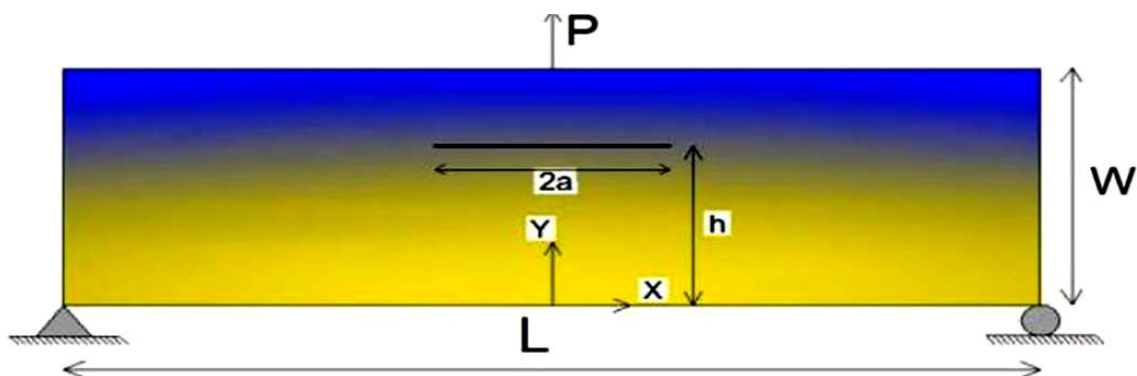


Figure I-32 MGF, matériaux à gradient fonctionnel (Goli et Kazemi 2014).

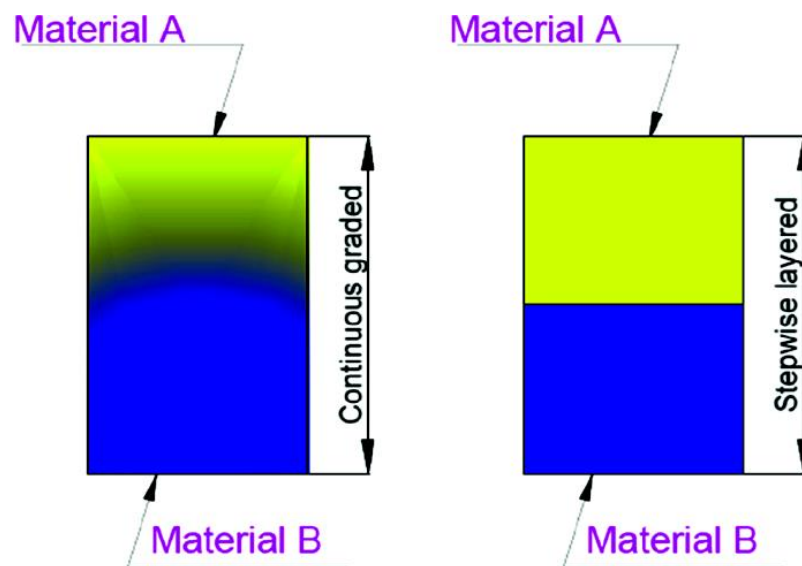


Figure I-33 Présentation schématique du béton à gradient fonctionnel et stratifié

I.4.4 Technologie de coulage des MGF

Les substances de béton stratifié sont classées en deux classes principales basées sur des méthodes de coulage telles que la méthode frais-durci et la méthode frais-frais.

I.4.4.1 Méthode coulage frais sur durci :

Dans les méthodes de durcissement frais, comme son nom l'indique, une nouvelle couche de béton n'est ajoutée que lorsque la couche précédente a durci. On le trouve généralement dans les usines de préfabrication en béton où la couche de béton non déplacée est ajoutée sur la partie préfabriquée pour obtenir des éléments structuraux complexes. Il est utilisé pour améliorer les propriétés des éléments spatiaux dans les zones exposées aux contraintes mécaniques. L'utilisation dans le béton renforcé de fibres ultra-hautes performances (BFUP) qui augmente la résistance et la longévité des tabliers de pont a été étudiée et rapportée par Silfwerbrand et Denarie et al. a rapporté que cette méthode est également utilisée pour obtenir une gradation fonctionnelle de l'interface entre deux éléments durcis. Pour raccorder les éléments préfabriqués, des mélanges de béton à hautes performances sont principalement utilisés in situ pour qualifier les exigences de base. Les techniques fraîchement durcies sur le béton aident à la surveillance exacte de chaque interface pendant la préparation. [Neville] a étudié qu'il rend plus simple par l'utilisation d'un seul mélange de béton pour produire des

composants stratifiés. Malgré cela, il a une limitation de consommation de tome plus importante car une nouvelle couche n'est coulée qu'après le durcissement de la couche précédente. Il possède également un inconvénient en termes de retrait de séchage qui peut atteindre une valeur jusqu'à 4×10^{-3} , avec l'évolution du volume dans les premiers mois de séchage. Il existe également un risque de mauvaise adhérence entre les couches. Phrase à revoir

I.4.4.2 Méthode coulage frais sur frais :

Dans la méthode de coulée frais sur frais, il existe une méthode de coulage et un durcissement simultané de plusieurs mélanges de béton. De nombreux chercheurs se sont aujourd'hui retenus sur les techniques de coulée frais sur frais. Ce coulage est en outre classé en deux classes : (i) Couches horizontales, (ii) Couches verticales.

I.4.4.3 Couches horizontales :

[Coussot ,Tattersall et Banfill] ont expérimenté que si le béton frais agit comme un fluide à limite d'élasticité dans lequel le seuil de contrainte de cisaillement est très faible et ne permet donc pas aux matériaux de bouger, remplissez plutôt le moule. Phrase à revoir Cela a aidé à la préparation d'éléments en béton non homogènes en versant horizontalement les couches. Les facteurs, tels que la compatibilité du mélange, la méthode de dépôt, la rhéologie, le processus de vibration, la séquence de coulée et le temps entre les coulées de chaque couche, affectent la stabilité du composant à la fois à l'état humide et durci.

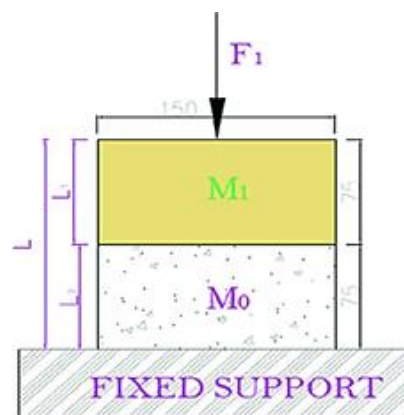


Figure I-34 Couches horizontales Han A, Gan BS, Pratama MMA

I.4.4.4 Couches verticales :

Il y a très peu de discussions sur l'utilisation de méthodes fraîches sur fraîches pour couler des couches verticales. Celles-ci reposent sur des panneaux provisoires entre deux couches verticales. Les facteurs tels que la hauteur, la densité du mélange et la rhéologie affectent la stabilité des éléments de mélange de la couche verticale. Les méthodes de versement frais sur frais ont l'avantage de prendre très peu de temps. Il existe également une bonne liaison entre les couches, cependant, le défi rencontré dans l'utilisation du béton frais sur frais est la façon de vérifier l'écoulement du béton local à l'interface entre les composants à l'état frais du béton. De nombreux analystes [Chan et al. Maalejet al.] ont trouvé une solution à ce problème en ayant un intervalle de temps de 20 à 60 mn entre le mélange et le développement de deux couches. [Maimouni et al] et [Torelli et al.] ont étudié qu'il existe un risque d'écoulement local du béton lorsque la rigidité des mélanges est assez faible pour résister aux contraintes de cisaillement. Un inconvénient vertical pour l'utilisation de la méthode de coulée frais sur frais est l'absence de techniques de calcul et d'analyse bien connues. De plus, dans les nappes verticales, il existe un problème vital de coulée des nappes, car leurs interfaces croisent les armatures. L'utilisation de plaques provisoires provoque des agencements horizontaux qui peuvent conduire à une interface après le dépôt du panneau. Par conséquent, d'autres expériences et analyses dans ces domaines sont nécessaires pour résoudre les inconvénients.

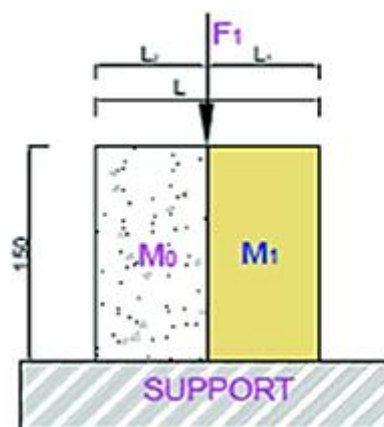


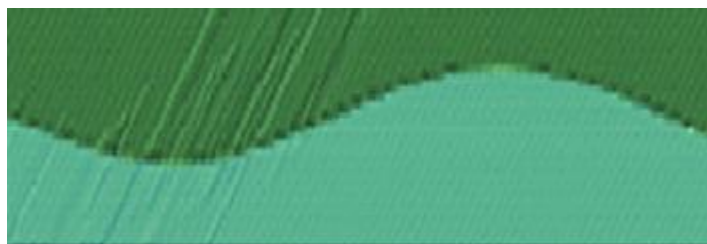
Figure I-35 Couches verticales Bajaj K, Shrivastava Y, Dhoke P

I.4.4.5 Comportement à l'état frais :

La croissance des contraintes de cisaillement dans les régions où les différences structurelles dans la composition du matériau sont liées à la densité du matériau, il existe un flux de matériaux plus lourds sous des matériaux plus légers, appelé instabilité globale à l'état frais, comme le montre la Figure.36. [Roussel] a traité de la connaissance exacte de l'association de la densité des matériaux, des propriétés rhéologiques, de l'instabilité globale et de la géométrie est importante pour vérifier le comportement au stade frais de la FGC et des méthodes de fabrication associées Phrase à revoir. Dans la production d'éléments en béton homogènes, les propriétés du mélange à l'état frais sont modifiées en fonction de la technique de coulée souhaitée. [Torelli et al.] ont expérimenté que les mélanges pour l'impression 3D sont suffisamment fluides pour être pompés et expulsés hors de la buse, mais suffisamment rigides pour supporter leur propre poids. [Torelli et Lees] ont analysé le processus de non-fiabilité universelle en couches de FGC. [Tattersall et al.] ont étudié que dans la coulée de béton ordinaire, le matériau s'écoule pour remplir un moule qui est gagné en appliquant des vibrations dans des bétons rigides. La vibration réduit provisoirement la limite d'élasticité du béton frais. Les vibrations excessives peuvent conduire à des instabilités locales telles que la ségrégation. Mais si le matériau est suffisamment lisse pour se déplacer sous son propre poids, les vibrations ne sont pas nécessaires. Ces substances sont connues sous le nom de béton auto-plaçant (SCC). En matière de projection de béton, le mélange choisi doit être assez lisse pour être pompé et projeté mais suffisamment rigide pour éviter les incertitudes locales. Dans le cas de l'impression 3D, les propriétés du matériau à l'état frais sont prudemment modifiées. Les scientifiques ont exploré le problème fondamental de la stabilité du prisme en béton à l'état frais composé de deux couches verticales comme le montre la Figure 37. Il a été constaté qu'il y a une amélioration de la stabilité à l'état frais de deux colonnes en béton avec la quantité croissante de contraintes dans la plastification de deux matériaux et la réduction de la variabilité de la densité. Elle a également montré que l'approche plastique peut s'appliquer à de nombreux physiographiques.



(a)



(b)

Figure I-36 schématique par (Roussel)
 -a) composite stratifié horizontal stable -b) composite stratifié horizontal instable



(a)



(b)

Figure I-37 schématique par Roussel
 -a) composite stratifié vertical stable -b) composite stratifié vertical instable.

I.5 Conclusion de l'étude bibliographique

Dans la première section de cette étude bibliographique, nous résumons les stratégies clés de la littérature, en nous concentrant sur les composites renforcés de fibres. Il est clair que les études menées sur le sujet sont plus récentes et plus développées sur le sujet par rapport au composite ordinaire.

Ensuite, nous avons procédé à une revue de l'état de l'art sur le béton de fibres. L'ajout de fibres à une matrice cimentaire a pour but d'améliorer la résistance du matériau à la fissuration et de lui donner un comportement mécanique plus ductile que cassant. Les propriétés du béton avec des fibres d'acier dépendent d'un certain nombre de facteurs différents, notamment la quantité de fibres ajoutées au béton et les propriétés géométriques des fibres.; l'orientation et la distribution des fibres dans le béton ; le facteur de forme des fibres ; la résistance de la matrice du béton et la contrainte de liaison entre les fibres et la matrice ; et le rapport entre la dimension maximale des agrégats et la longueur des fibres. En se concentrant sur la teneur en fibres et le facteur de forme.

La dernière section donne un aperçu des matériaux à gradient fonctionnel. Nous examinerons ensuite certaines généralisations, leurs parties et les domaines d'application. Nous avons également abordé les différents processus utilisés pour fabriquer des composants MGF .

Chapitre II

**Caractérisation des matériaux utilisés et
protocoles d'essais**

II.1 Introduction :

La connaissance des diverses propriétés , physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale. L'emploi judicieux de ces matériaux dans la construction exige cette connaissance permettant ainsi de faire un choix répondant à leur destination. Par ailleurs, il est essentiel aussi que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes.

Nous présentons dans ce chapitre, la campagne expérimentale de cette étude pour la caractérisation du comportement des composites de fibres métalliques (CFM). Ainsi, notre choix s'est porté sur la confection d'un composite ordinaire désigné par CO de résistance 35 Mpa.

Dans une première phase, nous présentons les caractéristiques des ingrédients du mélange composite, les différents paramètres étudiés et la formulation des composites utilisés, par la suite nous exposons aussi le comportement des composites par le biais d'essais mécaniques sur des éprouvettes concernant respectivement la mesure par essais non destructifs par vitesse de propagation des impulsions des ultrasons, et la mesure par essais destructifs par la compression simple, la traction par flexion et le cisaillement

II.2 Programme expérimental :

Le programme expérimental, réalisé dont le but d'examiner le comportement des composites cimentaires à base de matériaux locaux, a été renforcé selon deux types de conceptions, l'une renforcée sur la section entière et l'autre uniquement dans la zone de traction, c'est-à-dire que nous substituons un matériau à gradient fonctionnel renforcé avec des fibres recyclées ondulées ou par des fibres industrielles avec crochets aux extrémités en considérant les différentes fractions volumiques suivantes : 0 % ; 0,5 % ; 1 % et 1,5 %, en appliquant des essais destructifs et non destructifs. Ce programme comprend :

- Des mesures qui ont été réalisées pour mesurer les valeurs de la vitesse de propagation des impulsions ultrasonores par l'ultrason sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour déterminer la résistance à la compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour déterminer la résistance à la traction par fendage sur éprouvettes cylindrique 11x22 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour évaluer la résistance en traction par flexion sur éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm.
- Des mesures qui ont été réalisées pour évaluer la résistance au cisaillement sur éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm.

II.3 Normes :

Les caractéristiques et les propriétés physico-mécanique des matériaux utilisés déterminées au laboratoire, conformément aux normes en vigueur montrées sur les tableaux voir annexe.

II.4 Caractéristiques des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette expérimentation pour fabriquer les différents composites à partir d'un squelette granulaire issu d'un mélange tertiaire de gravier, sable, ciment et d'un superplastifiant, c'est ainsi que les deux types de fibres métalliques utilisées ont été confectionnées. La détermination des propriétés des matériaux utilisé est une étape inévitable, qui pour le but de déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques conformément aux normes recommandées. Ensuite, on étudie la formulation du composite pour déterminer les fractions massiques de ces constituants.

II.4.1 Ciment :

Le type de ciment, utilisé pour le composite ordinaire et le composite de fibres est fabriqué par la cimenterie de BISKRIA (Algérie), il est constitué de 95 % de clinker. Les résultats d'analyse chimique diffraction des rayons X sur un échantillon de ciment sera présenté sur la figure.1. Les caractéristiques de ce type de ciment sont présentées dans les tableaux 1

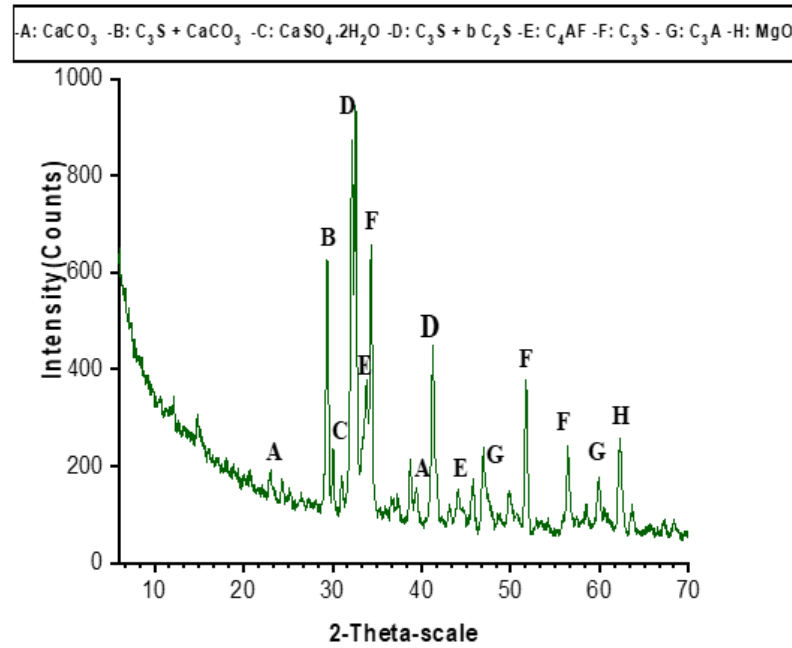


Figure II-1 Analyse DRX du ciment.

Tableau II-1 Propriétés physiques du ciment

Propriétés physiques	
Densité	3.150
Densité apparente	980
La finesse (cm ² /g)	3571.78

Tableau II-2 Composition chimique du ciment

Composition chimique (%)	
SiO ₂	20.83
Al ₂ O ₃	4.13
Fe ₂ O ₃	5.58
CaO	62.91
MgO	1.42
SO ₃	2.30
K ₂ O	0.38
Cl	0.028
Loss on ignition (L.O.I)	2.04
Insoluble Residue (I.R)	0.382

II.4.2 L'adjuvant

Le superplastifiant employé dans l'essai de type VISCOCRETE TEMPO 12, est compatible avec tous les types de ciment et haut réducteur d'eau. Cet adjuvant est ajouté lors du malaxage pour garder la maniabilité du composite. Un c'est produit de la Société Algérienne Sika El-DJAZAIR, qui est conforme à la norme NF EN 934-2. Les caractéristiques du superplastifiant sont données dans le tableau 5.

Tableau II-3 Les caractéristiques du superplastifiant

Les caractéristiques	
Couleur	marron
Densité	1.06
PH	611

II.4.3 L'eau

L'eau de mélange utilisée dans cette étude est de l'eau potable. En générale, l'eau potable est propre et ne nécessite pas d'essai d'analyse. L'eau utilisée pour la confection du composite est l'eau du robinet, elle est caractérisée par des propriétés physico-chimiques acceptables selon les conditions imposées de la norme NF EN 1008. Provenant de la ville de Biskra.

II.4.4 Les granulats

Les critères de propreté sont de plus en plus obligatoires pour les granulats. Il faut laver le sable et le gravier pour fabriquer un composite avec une bonne résistance et une bonne répartition granulaire. Ce lavage transforme le sable argileux brut en sable propre et permet ainsi d'améliorer les propriétés des graviers.

II.4.5 Les graviers

Dans cette étude, nous avons utilisé deux fractions du gravier concasse propres de la carrière d'Aïn-Touta (wilaya de Batna). Le diamètre des granulats varie du plus petit au plus gros, de tailles (3/8 mm) et (8/15 mm), avec une densité de 2.56 kg/dm³ et 2.72 kg/dm³, respectivement.

II.4.6 Le sable

Le sable que nous avons utilisé pour notre composition provient de l'oued de Biskra, avec un diamètre inférieur à 5.0 mm et une densité de 2.55kg/dm^3 et module de finesse de 2.59.



Figure II-2 lavage des granulats

Tableau II-4 Equivalent de sable avant et après lavage

		Sable brut	Sable lavé
Equivalent de sable (%)	ESV	59.15	81.12
	ESP	57.28	79.51

Les expérimentations, réalisées avec les granulats, ont fait l'objet d'une analyse granulométrique et les résultats sont consignés sur la figure.3.

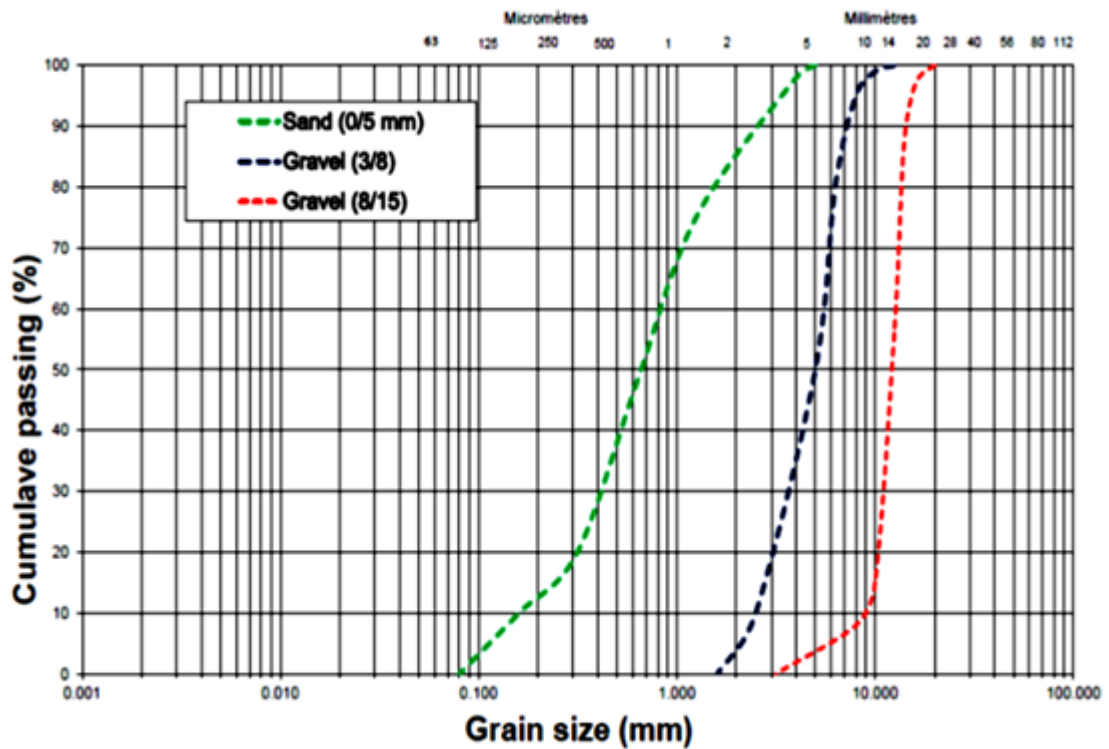


Figure II-3 Courbes granulométriques des matériaux utilisés

II.4.7 Les fibres

II.4.7.1 Fibres d'acier industrielles Type-A

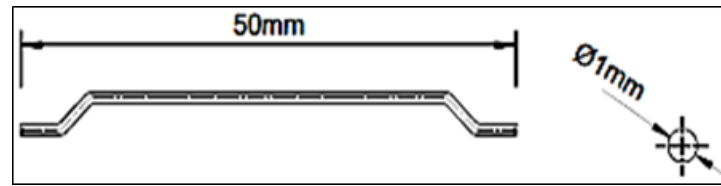
Les fibres utilisées sont des SIKA FIBRE RL-45/50-BN, fabriquées à partir de fils d'acier. Elles comportent un ancrage mécanique constitué d'extrémités crochues. D'une section transversale circulaire, voir la figure 4.



(a)



(b)



(c)

Figure II-4 Géométrie (a) et (b) schématique (c) fibres d'acier industriel de type A

II.4.7.2 Fibres d'acier recyclées Type-B

La géométrie schématique des fibres d'acier recyclées est présentée dans la figure 4. Ces fibres formées de fils métalliques en forme de bâtons, sont ondulés pour faciliter leur fixation à la matrice. La fibre est de section transversale demi sphérique, son diamètre équivalent est calculé selon la norme EN 14889-1.

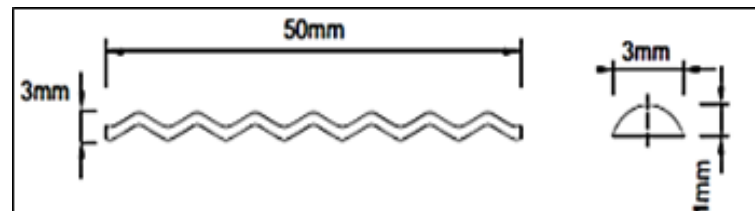


Figure II-5 Géométrie schématique des fibres d'acier recyclées de type B

Les caractéristiques des deux types de fibres utilisées sont présentées dans le tableau 7

Tableau II-5 Les propriétés des fibres A et B

	Fibre-A-	Fibre-B-
Diamètre d_f (mm)	1.00 ± 0.05	1.86 ± 0.05
Longueur l_f (mm)	50 ± 0.5	50 ± 2
Rapport d'aspect (l_f/d_f)	50	27.95
Nombre de fibres par kg	2800	820
Résistance à la traction (MPa)	1000	600



Figure II- 6 Les deux fibres d'acier utilisées

II.5 Formulations, fabrication et conservation des éprouvettes

La conception des mélanges de composite mono-fibre et hybride a été réalisée conformément aux normes. Les proportions du mélange de base étaient les mêmes pour tous les mélanges. La teneur en ciment était de 400 kg/m^3 , Les rapports matériaux/ciment ont été maintenus constant pour le granulat fin de 0.97, le granulat grossier de 1.72, le sable de 1.63 et le rapport eau/matériaux cimentaires a été maintenu à 0,47. Les mélanges sont conçus pour donner une résistance moyenne à la compression de 35 MPa à 28 jours. Les matrices ont été renforcées à des taux variables d'ajout de fibres pour produire des composites comme décrit dans le tableau 3. En outre, afin d'examiner l'effet des fibres hybrides industrielles -recyclées sur les propriétés du composite, les fibres hybrides ont été utilisées dans les éprouvettes avec une fraction volumique totale de 1,0 %.

Les mélanges sélectionnés pour cette étude ont été réalisés à partir de matières premières de base disponibles localement. Le mélange des composites en laboratoire a été effectué dans une bétonnière à cuve rotative verticale de 100 kg. Les matières premières de base sèches nécessaires à la fabrication du composite avec les proportions calculées ont été ajoutées et mélangées à sec pendant 2 min d'abord avant d'être mélangées à l'eau. Enfin, on a mélangé les deux tiers de l'eau et on a continué le

malaxage pendant deux minutes supplémentaires. Le superplastifiant a été ajouté après le mélange avec l'eau restante. Le tout a été mélangé jusqu'à ce que le CCO soit homogénéisé. Pour le mélange (CRFM), les fibres ont été dispersées de manière égale.

Les deux fibres de formes diverses avec une longueur égale à 50 mm et des sections transversales différentes sont utilisées avec l'CCO. Le composite est fabriqué avec quatre fractions volumiques de fibres d'acier, a ont été choisies : 0,0, 0,50, 1,00 et 1,5 %. Le pourcentage de superplastifiant a été ajusté pour maintenir l'ouvrabilité et la maniabilité du composite. La conception du mélange composite a été déterminée selon "Dreux". Deux groupes de chaque type de fibre ont été testés à des fractions volumiques (V_f) de 0,5, 1,0 et 1,5 % (figure 3, tableaux 8 et 9). Le troisième groupe avec hybridation de $V_f=0.5\%$ de chaque type de fibre. Le codage suivant a été utilisé pour identifier les mélanges :

Les deux premières lettres + la troisième lettre + le numéro. Par exemple, CRA0.5

Les deux premières lettres + GF+ la troisième lettre + le numéro. Par exemple, CRGFA1.5.

Les deux premières lettres représentent le composite renforcé, la troisième lettre représente le type de fibre utilisé, le nombre représente les fractions volumiques des fibres V_f et (GF) représente le concept de gradation fonctionnelle.

Tableau II-6 Détails des mélanges du groupe 01 avec différentes fibres

La section entière	CCO	CRA0.5	CRA1.0	CRA1.5	CRB0.5	CRB1.0	CRB1.5
Vf la fibre -A-(%)	0.00	0.50	1.00	1.50	0.00	0.00	0.00
Vf la fibre -B-(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	1.50

Tableau II-7 Détails des mélanges du groupe 02 avec différentes fibres

CGF	CRGFA0.5	CRGFA1.0	CRGFA1.5	CRGFB0.5	CRGFB1.0	CRGFB1.5
Vf la fibre -A-(%)	0.50	1.00	1.50	0.00	0.00	0.00
Vf la fibre -B-(%)	0.00	0.00	0.00	0.5	1.00	1.50

Le premier groupe est composé de sept types de composites à base de ciment renforcé dans tout leur volume total à partir des matériaux du tableau 8.

Le second groupe est composé de six types de composite cimentaire renforcé avec le concept FGC. La hauteur des spécimens est décomposée en deux couches d'épaisseur égale, la couche supérieure est faite d'CCO, et la couche de tension inférieure est faite de CRA ou CRB. Tous les spécimens ont été coulés dans des moules en acier. De l'huile a été appliquée sur les moules pour faciliter le démoulage. Les mélanges d'CCO et de CRA0.5 à CRA1.5 et de CRB0.5 à CRA1.5 ont été coulés en pleine profondeur, compactés et nivelés. Pour les mélanges CRGFA0.5 à CRGFA1.5 et CRGFB0.5 à CRGFA1.5, la couche inférieure a été réalisée en CRA ou CRB, compactée et nivelée jusqu'à mi-profondeur, puis la couche supérieure en CCO a été remplie, compactée et nivelée pour maintenir la hauteur de l'éprouvette. Le temps entre le début et la fin du coulage a été maintenu plus court que le temps de prise initiale du ciment utilisé afin de prendre en compte l'opérabilité expérimentale et de garantir la force d'adhérence. L'intervalle de temps entre les fabrications des couches a également été rapporté dans les travaux d'autres chercheurs [Cao et al., 2019 ; Liu et al., 2018 ; Prasad et Murali, 2021 ; Río et al., 2015].

Le troisième groupe est préparé avec un composite à base de ciment renforcé par $V_f=1\%$ de fibre hybride (0.5 % fibre recyclées et 0.5 % fibre industrielle)

Trois spécimens ont été coulés pour chaque cas afin de prendre la moyenne. Conformément à la norme NF EN 12390-2 [Standard, 2003], tous les moules ont été recouverts de feuilles de plastique et stockés 24 heures après le moulage. Après démoulage, les éprouvettes doivent être stockées à température ambiante dans un réservoir d'eau (environ 20° C) jusqu'au début des essais.



(a)

(b)

(c)



(d)

Figure II-7 (a, b et c) les types d'éprouvettes utilisées –(d) Conservation des éprouvettes

II.6 Essais réalisés à l'état frais

II.6.1 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams

Cet essai est réalisé suivant la recommandation de la norme EN 12350-2 (EN 12350-2,1999), c'est l'essai le plus couramment utilisé du fait de sa simplicité. Il s'agit de mesurer l'affaissement d'un cône de composite sous l'effet de son propre poids. Plus l'affaissement sera grand, plus le composite sera fluide. L'affaissement au cône d'Abrams a été mesuré deux fois pour chaque formulation. Les classes de consistance du composite déterminées en fonction de l'affaissement mesuré au sens de la norme NF EN 206 sont regroupées dans le Tableau 9

Tableau II-8 Classes de consistance des composites en fonction de l'affaissement.

N°	Classe	Affaissement (mm)
01	S1	10 – 40
02	S2	50 – 90
03	S3	100 – 150
04	S4	160 – 210
05	S5	≥ 220

II.7 Essais physiques

II.7.1 Essais d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau d'un composite, donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du composite durci : plus le composite est compact plus sa capacité d'absorption est faible, plus il est donc étanche.

II.7.2 Essais d'absorption d'eau par immersion

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, rappelons que l'essai consiste à mettre les éprouvettes du composite dans l'étuve et de les poser jusqu'à un poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 h (c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau) afin de calculer le volume des vides du composite [76].

Le coefficient d'absorption par immersion est donné par la relation suivante :

$$Ab = \frac{Ma - Ms}{Ms} \quad \text{II} \quad (1)$$

Ma : Masse de l'échantillon imbibée ;

Ms : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.

Les éprouvettes utilisées dans cette partie sont cubiques de dimensions (10x10x10) cm³ et ont été conservées à l'air libre de laboratoire (T = 20°C).

II.8 Essais mécaniques

Les différentes propriétés mécaniques étudiées sont la résistance en compression et la résistance en traction par flexion. Les essais permettent d'étudier le comportement mécanique du composite. Les essais de résistances sont réalisés sur trois éprouvettes au moins.

II.8.1 Mesure par essais non destructifs

II.8.1.1 Vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Le matériel utilisé est l'appareil à ultrasons « Pundit lab » (figure 10). Cet essai est réalisé suivant la norme EN 12504-4 (EN 12504-4, 2004). Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores). Après avoir parcouru une longueur de chemin connue dans l'éprouvette, l'impulsion de vibrations est convertie en un signal électrique par un deuxième transducteur et des circuits de synchronisation électroniques permettent de mesurer le temps de transit de l'impulsion. La vitesse des ondes, V, est calculée par la formule suivant :

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{II} \quad (2)$$



Figure II-8 L'essai de vitesse de propagation d'ondes sonores

Où : L : est la distance entre les transducteurs (m). La longueur de parcours de l'onde doit être supérieure ou égale à 10 cm.

t : est le temps de propagation (s).

Le chercheur Whitehurst, 1966, a donné une évaluation générale entre la qualité du composite et la vitesse de diffusion des impulsions :

- ✓ $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ composite de faible résistance,
- ✓ $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ composite de moyenne résistance,
- ✓ $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ composite à haute résistance,
- ✓ $V \geq 4200 \text{ m/s}$ composite à très haute résistance.

II.8.2 Mesure par essais destructifs

II.8.2.1 Essai de compression

L'essai de la résistance à la compression, exécuté sur des éprouvettes cubiques 10 x 10 x 10 cm, a pour but de déterminer la résistance à la compression du composite selon la norme [NF P. 18-406]. L'application d'une charge mécanique croissante jusqu'à la rupture est effectuée par une presse hydraulique, à un taux de chargement de 0.5 Mpa/s jusqu'à la rupture (Figure II.5). ; la résistance F_c , exprimée en MPa est obtenue par la formule suivante :

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad \text{II} \quad (3)$$



Figure II-9 Mise en place des éprouvettes sur presse hydraulique (La résistance en compression).

Soit

P : La charge maximale de rupture enregistrée au cours de l'essai en (Newton) ;
 A_c : la section de l'éprouvette (mm^2).

II.8.2.2 Essai de traction par fendage

L'essai de fendage est exécuté selon la norme NF EN 12390-6. L'éprouvette cylindrique est comprimée le long de deux génératrices diamétralement opposées, comme le montre la figure 7.6. Pour éviter une rupture locale en compression au niveau des génératrices de chargement et répartir la charge appliquée, deux bandes minces en contreplaqué neuf d'une largeur de 10 mm, d'une épaisseur de 4 mm et d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette, sont placées entre les plateaux de chargement et l'éprouvette. La mise en charge s'effectue avec une vitesse constante de 0,05 MPa/s.

La contrainte maximale de traction par fendage (f_t), perpendiculaire au diamètre sollicité, peut alors s'écrire selon l'équation suivante :

$$f_t = \frac{2P}{\pi L d} \quad \text{II} \quad (4)$$



Figure II-10 Mise en place des éprouvettes sur presse hydraulique (Essai de traction par fendage).

Soit

P : La charge maximale de rupture enregistrée au cours de l'essai en (Newton) ;

L : longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette en (mm) ;

d ; le diamètre d'éprouvette en (mm).

II.8.2.3 Essai de flexion 3 points

Les essais de flexion sont couramment utilisés dans la pratique afin de caractériser le comportement en traction et en flexion des composites. Plusieurs normes proposent l'utilisation de ces types d'essais, toutefois, chacune d'entre elles comporte ses propres particularités. Par exemple, la géométrie des spécimens, la présence ou non d'entaille ainsi que les conditions d'appuis sont des paramètres variables entre ces essais. Cette variabilité entre les conditions de réalisation des essais de flexion entraîne une difficulté supplémentaire lors de la comparaison des résultats entre les différents essais.

Dans cette thèse, l'essai de flexions 3 points selon la norme EN14651 (EN14651, 2005) est présenté sur la (Figure 13). Ce type d'essai a l'avantage d'être simple à réaliser ainsi que d'être couramment effectué dans de nombreux laboratoires, (Ff) est obtenue par l'équation ci-dessous :

$$ff = \frac{3PL}{2a^2} \quad \text{II} \quad (5)$$



Figure II-11 Essai de flexion 3 points

Soit

P : La charge maximale de rupture enregistrée au cours de l'essai en (Newton).

L : Longueur entre les deux appuis en (mm).

a : Côté de la section carrée en (mm).

II.8.2.4 Essai de cisaillement

Plusieurs essais de cisaillement sur des éprouvettes de dimensions réduites sans armature sont disponibles dans la littérature. Shilang et Hans (2005) ont présenté un résumé de ces différents essais, qui sont illustrés sur la Figure 14. Selon ces auteurs, le seul essai qui présente un mode de rupture en cisaillement pure est celui présenté sur la Figure 15. En effet, l'excentricité des charges dans les autres essais induit des contraintes de traction résultant ainsi en un mode de rupture mixte.

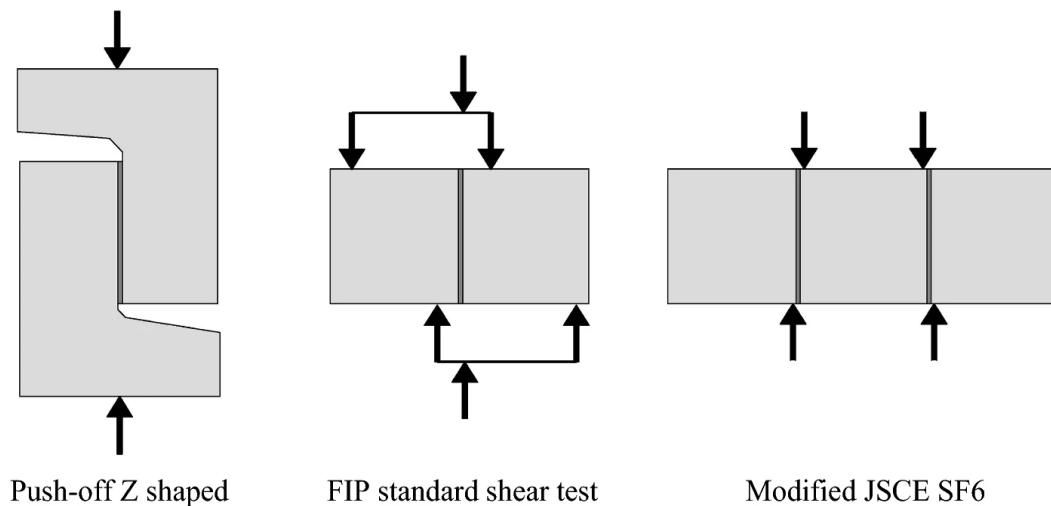


Figure II-12 Essais de caractérisation du comportement en cisaillement (Cuenca, E., et al., 2020).

Afin de pallier ce problème et de faciliter la réalisation des essais de cisaillement, la société japonaise en ingénierie civile (JSCE) propose un essai que permet de caractériser efficacement le comportement en cisaillement sur des spécimens réduits qui peuvent être fabriqués de façon individuelle selon les recommandations de la norme JSCE-SF6 ou bien ils sont sciés directement de la structure.

Dans notre travail une éprouvette de (100x100x400mm) est supportée par deux appuis rigides distants de 155 mm, solidarisés par deux fers plats pour empêcher toutes rotations de l'éprouvette. Des entailles périmétriques de 1 cm de profondeur et 2 mm d'épaisseur sont sciées tout autour de l'éprouvette pour permettre d'obtenir une rupture conjointe des deux plans de cisaillement. Une charge statique est appliquée avec

une vitesse de 0,10 MPa/s par un bloc de chargement avec deux tranchants espacés de 150 mm, voir la Figure 16

. τ est obtenue selon l'équation suivante :

$$\tau = \frac{P}{2b_p a_p} \quad \text{II} \quad (6)$$

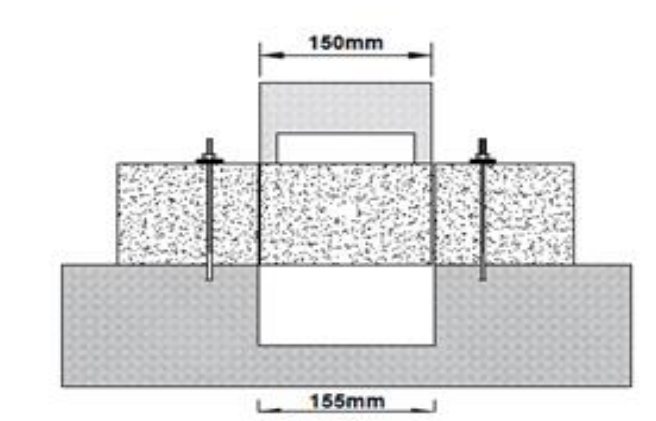


Figure II-13 Essai de cisaillement (JSCE-SF6).



Figure II-14 Montage de cisaillement, JSCE-SF6

Soit

P : La charge maximale de rupture enregistrée au cours de l'essai, en (Newton).

ae et be : sont la largeur et la profondeur effectives du spécimen, en (mm).

II.9 Conclusion

Dans un premier temps, nous avons présenté les matériaux utilisés dans notre étude puis nous avons exposé les programmes expérimentaux à réaliser, ainsi que les formulations des composites testés, les détails de confection et le conditionnement des éprouvettes.

Dans un deuxième temps, nous avons décrit les méthodes d'essais utilisées pour ces différentes formulations pour pouvoir caractériser les propriétés physiques et mécaniques des composites en fonction des fractions volumiques et le modèle de fibre utilisée ainsi que le type de conception. Les résultats de ces essais seront fournis dans les chapitres IV, où une interprétation des résultats a été faite et sera discutée et analysée dans le but d'assimiler les fruits de cette contribution, sur les comportements du composite à l'état frais et aussi à l'état durci.

Chapitre III

**Caractérisation et fabrication des fibres
recyclées**

III.1 Introduction

Les fibres utilisées, pour renforcer notre composite, sont des fibres recyclées provenant de déchets de la fabrication de la laine d'acier. Ils proviennent de la société Sarl TRANSFORMATION BERIA WAHAT (Algeria), de transformation industrielle de tout matériel destiné au nettoyage et à l'entretien. Ces déchets de la fabrication de la laine d'acier (Figure 1) sont en forme de fil de section demi sphérique. Le but de cette étape de l'étude est la caractérisation de la fibre recyclée provenant de déchets de la fabrication de la laine d'acier.

III.2 La méthode de fabrication des fibres d'acier recyclées

Les mécaniciens ont été les premiers à utiliser les copeaux d'acier pour le ponçage. Puis, les usines de fabrication de produits de nettoyage et d'hygiène ont rapidement pris le relais pour produire des éponges de nettoyage en laine d'acier à usage domestique et industriel. Le principe de la production en série a été inventé au début du 20^e siècle. Une tige d'acier torsadée est déroulée à travers des dispositifs de guidage en métal pour produire ce fil. Ce dispositif tire le fil à travers des filières de plus en plus petites pour le rendre uniforme, des bobines enroulent la tige après son passage dans la filière pour éviter les enchevêtrements. Les tirages sont répétés à chaque fois à travers les disques, remodelant la structure de base de l'acier et doublant sa résistance à la traction. La tige d'acier a un diamètre de 3,05 mm lorsqu'elle quitte la ligne de production, ce qui la rend plus fine, plus robuste et plus facile à travailler. Il passe dans un rouleau à chaîne où des lames rasant les deux tiers de la section. Quant à la partie restante du fil d'acier, celle-ci est ensuite formée, puis découpée pour obtenir des fibres sous une forme ondulée pour être utilisée ultérieurement comme fibre d'acier dans le composite.

Figure 0-1Fibre recyclée avant et après fabrication

III.3 Processus technologique :

III.4 Caractérisation des fibres recyclées

Les fibres utilisées pour renforcer notre composite, sont des fibres d'acier recyclées provenant des déchets de la fabrication de la laine d'acier. Ces fibres (Fig. 2-29) sont de forme ondulée, d'une section transversale demi sphérique et de longueur d'environ 50 mm. La forme déformée ondulée assure un très bon ancrage des fibres dans la matrice mais elle empêche l'incorporation des fibres en fractions volumiques importantes. Ces fibres peuvent être classées dans la catégorie des fibres à géométrie évoluée.

III.4.1 Caractérisation chimique

Tableau 0-1 La composition chimique des fibres recyclées

<i>La composition chimique</i>	<i>(%)</i>
Phosphore (P)	0.052
Soufre (S)	0.150
Carbone (C*)	0.119
Cuivre (Cu)	1.266
Chrome (Cr)	0.147
Manganèse (Jv/n*)	0.680
Molybdène (Mo)	0.058
Nickel (Ni)	0.114
Vanadium (V)	0.135
Tungstène (W)	0.596
Bore (B)	0.003
Fer (Fe)	95.915
Aluminium (Al)	0.091
Cobalt (Co)	0.024
Silicium (Si)	0.205
Niobium (Nb)	0.107
Zinc (Zn)	0.008
Plomb (Pb)	0.318
Antimoine (Sb)	0.027
Etain (Sn)	0.033
Zircone (Zr)	0.013
Titane (Ti)	0.041

III.4.2 Caractérisation géométrique

Les dimensions géométriques des fibres, sont déterminées selon la norme NF EN 14889- (2006). Le diamètre équivalent d_{eq} a été calculé selon la formule (01)

- Avec : d_{eq} : diamètre équivalent (mm) ;
- m , masse de la fibre par unité (g) ;
- L_d , longueur développée de la fibre (mm) ;
- γ , masse volumique de l'acier.

$$d_{eq} = \sqrt{4.m.10^6 / \pi.L.d.\gamma} \tag{01}$$

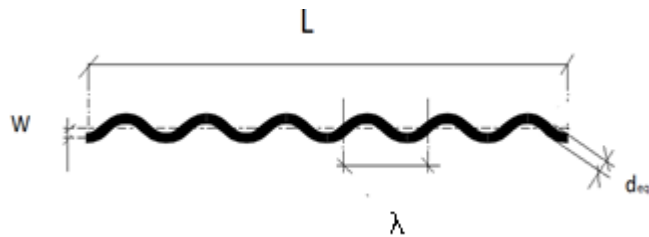


Figure 0-2 Géométrie schématique de la fibre recyclée

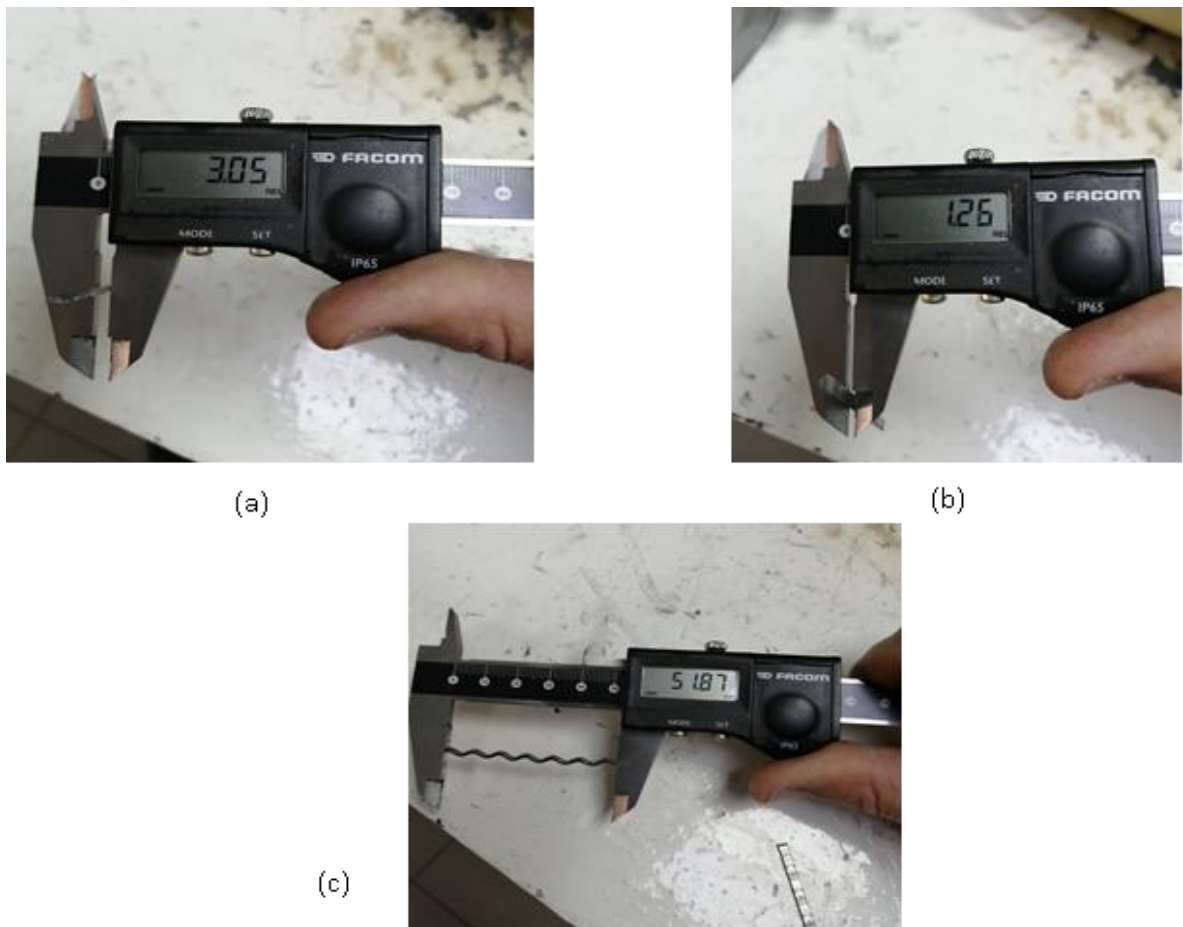


Figure 0-3 Dimension de la fibre recyclées de type B

(a)-Largeur (b)- Épaisseur et (c)-Longueur

Tableau 0-2 Les dimensions géométriques des fibres recyclées.

N°	Caractérisation géométrique	Dimensions
01	Diamètre de la fibre d_{eq}	1.96 mm
02	Longueur nominale de la fibre L	50 \pm 2 mm
03	Epaisseur	1.25 \pm 0.1 mm
04	Largueur	3.00 \pm 0.1 mm
05	Longueur développée de la fibre Ld	56 \pm 2 mm
06	Rapport L/ d_{eq}	25.50
07	Rapport Max L/ep	36.80
08	Rapport Min L/t	16.50
09	Amplitude w	1.42 mm
10	Longueur d'onde λ	7 mm
11	Nombre de fibres par kg	770 fibres

III.4.3 Caractérisation mécanique

III.4.3.1 Essai de traction

Les essais de traction, effectuée selon la procédure donnée par la norme EN 1002-1, sont couramment utilisés dans la pratique afin de caractériser le comportement en traction des fibres. Plusieurs normes proposent l'utilisation de ces types d'essais. Les corps d'éprouvettes testés sont des fils lisses utilisés pour la fabrication des fibres. Nos essais ont été réalisés sur une machine universelle de capacité maximale de 50 KN. La résistance à la traction a été déterminée sur des fils étirés à froid classés selon la norme NF EN 14889-1.

Les résultats de l'essai de caractérisation à la rupture par traction des fibres sont présentés sur la figure 5 ci-après. Lors des essais de caractérisation, nous observons un allongement de la fibre puis la rupture de cette dernière. La résistance à la rupture moyenne des fibres est égale à 600 MPa. Les résultats détaillés pour les cinq essais sont représentés sur le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 0-3 Les résultats des tests de la résistance à la traction

N°	Rt (Mpa)
01	586.30
02	617.26
03	605.13
04	595.10
05	600.01
Moyenne (Mpa)	600.8
Ecart-type (Mpa)	5.63
C-V%	0.93



Figure 0-4 Test de traction directe.

Rappelons qu'à partir de l'essai de traction on obtient la courbe de traction charge-déplacement, on applique une force normale de traction croissante sur l'éprouvette et on enregistre à chaque fois la valeur de la force (F) et l'allongement (Δl) correspondant et on construit point par point la courbe de traction $F(\Delta l)$ et on peut en déduire ainsi la courbe $\sigma(\epsilon)$.

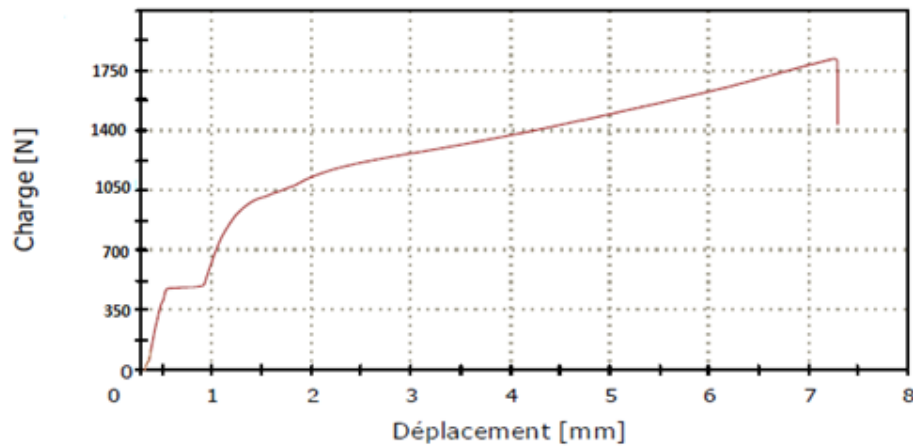


Figure 0-5 Courbe (charge-déplacement) des fibres d'acier recyclée de type B

$F = f(\Delta L)$ où $\Delta L = L - L_0$ étant l'allongement absolu de l'éprouvette suite à l'application de la charge.

D'après la figure précédente, la courbe se caractérise par une allure non stable due à l'adaptation de l'éprouvette avec les mâchoires de l'appareil d'essai et nous remarquons que la courbe de traction axiale est composée de trois phases différentes.

La première phase élastique, la courbe de traction est une droite, la pente de cette droite donne le module de Young E , et R_e représente la limite élastique, ainsi que la relation proportionnelle entre la contrainte et la déformation.

La deuxième phase de la courbe représentée par le segment horizontal, est appelé palier d'écoulement, ou nous enregistrons un petit allongement sous une charge constante.

Dans la troisième phase, la courbe monte de nouveau (une partie non linéaire), l'augmentation du chargement provoque une déformation hétérogène, un rétrécissement

appelé striction ou étranglement se forme sur l'éprouvette, ensuite, l'endommagement et la microfissuration mènent à la rupture du matériau.

La figure 7 montre les fibres recyclées de type-B utilisées dans les mélanges avant et après le processus de la fabrication. Ces fils métalliques en forme de bâtons, sont ondulés pour faciliter leur fixation à la matrice. La fibre est de section transversale demi sphérique, son diamètre équivalent est calculé selon la norme EN 14889-1.

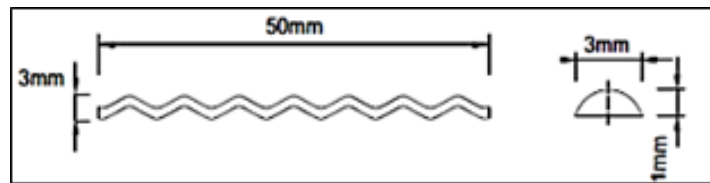


Figure 0-6 Géométrie schématique des fibres d'acier recyclées de type B

III.5 Conclusion

Cette étude expérimentale a été réalisée pour caractériser la fibre recyclée provenant de déchets de la fabrication de la laine d'acier. Les résultats de la présente étude indiquent que la fibre recyclée peut être utilisée comme les autres fibres d'acier. Les caractéristiques mécaniques intéressantes de la fibre recyclée provenant de déchets de la fabrication de la laine d'acier indiquent la possibilité de l'utiliser comme renfort dans les matériaux composites cimentaire pour diverses utilisations industrielles.

Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV.1 Introduction

Ce chapitre vise principalement à caractériser expérimentalement la réponse des composites avec différents pourcentages appropriés de la fibre qui répond aux exigences de résistance et de durabilité des composites sans fibres CCO et les composites avec des fibres métalliques CRF en deux types (fibre industrielle, fibre recyclée ou hybride) ainsi que de discuter la différence entre les deux concepts renforcés par des fibres d'acier en pleine profondeur et à gradation fonctionnelle. Les propriétés mécaniques des composites à 28 jours ont été déterminées par les méthodes destructives et non destructives.

Le travail développé a pour objectif de commenter les résultats qui sont structurés comme suit :

- Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les propriétés à l'état frais (essai d'affaîssement au cône d'Abrams)
- Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les propriétés mécanique des composites à l'état durci (absorption d'eau par immersion, la vitesse de propagation des impulsions par l'ultrason, résistance en compression, résistance à la traction par fendage, résistance au cisaillement direct et résistance en flexion).
- Influence de l'hybridation des fibres (industrielle/ recyclée) sur les propriétés mécaniques des composites à l'état durci.

IV.2 Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les propriétés à l'état frais des composites

IV.2.1 Test d'affaissement

Bien que la fibre joue un rôle important et contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques du composite, l'ouvrabilité est l'une des contraintes majeures qui ne doit pas être ignorée lors du processus de mélange pour une meilleure tenue du béton à l'état durci. Pour le développement du mélange de composite le plus approprié, la maniabilité du composite est le paramètre clé, et elle est considérablement influencée par le type et la teneur en fibres d'acier recyclées et en fibres d'acier industrielles. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est l'essai le plus couramment utilisé du fait de sa simplicité et il est reconnu aussi comme un contrôle standard pour quantifier l'ouvrabilité d'un mélange de composite, mais selon de nombreux chercheurs, le test d'affaissement ne fournit pas suffisamment d'informations sur l'analyse quantitative de l'ouvrabilité du composite fibré, mais peut être accepté comme une procédure de contrôle de la qualité pour gagner l'homogénéité d'ouvrabilité des différents mélanges.

La Figure 1 ci-dessous décrit la relation entre les tests d'affaissement et les différents types de composite fibré (le composite ordinaire, le composite de fibres d'acier industrielles, le composite de fibres d'acier recyclées et le composite de fibres d'acier hybrides).

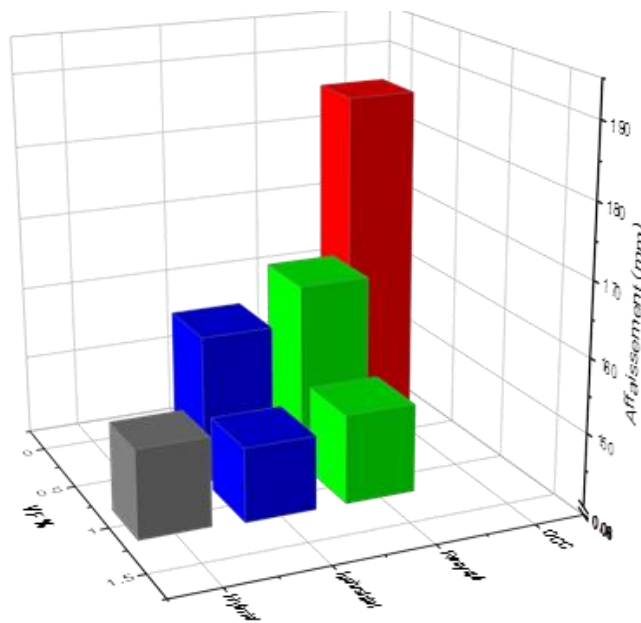


Figure IV- 1 Influence de la fraction volumique de la fibre sur l'affaissement des composites.

Dans tous les mélanges, il a été observé que l'inclusion de fibres d'acier a entraîné une diminution de l'ouvrabilité. Cependant, la fibre d'acier recyclée montre une moindre réduction de la maniabilité que les fibres d'acier industrielles. La raison possible de ce phénomène est due peut-être à l'augmentation du rapport volumique des fibres d'acier pour le même type de fibre ou que l'augmentation du nombre de fibres d'acier au même rapport de volume. Cela conduira à affecter la fluidité du composite, qui se traduira par la réduction de l'affaissement du composite à l'état frais. On rappelle que pour ces composites, la longueur des fibres a été fixée à 50 mm et le V_f de 0,5 % à 1,5 %. On remarque aussi que la plupart des composites sont de classe S3 et S4.

Les valeurs d'affaissement des composites fibrés montrent une tendance à la baisse pour un même rapport eau/ciment et un dosage en superplastifiant. La plupart des résultats présentés dans (la figure 1) sont rapportés déjà dans la littérature. Cette figure montre que le pourcentage de diminution de l'affaissement était d'environ 10,00 % pour les mélanges contenant 0,5 % de fibre industrielle. Pour la même fraction volumique dans les mélanges contenant de la fibre recyclée, la diminution de l'affaissement était d'environ 7,62 %, et pour une fraction volumique plus élevée de fibres pour 1 % et 1.5 %, la perte d'affaissement se situe entre 19,53 % et 30,47 % respectivement, pour les fibres industrielles, et la perte d'affaissement était comprise entre 18,57 % et 29,05 %, respectivement, pour les fibres recyclées. Cependant, dans la présente étude, l'affaissement moyen observé était de 185 mm pour le CCO. En outre, l'hybridation des deux types de fibres indique clairement que la perte d'affaissement a été compensée lorsque 50 % de la fibre industrielle a été remplacée par la fibre recyclée, le pourcentage de diminution de l'affaissement était d'environ 19,52 %.

IV.3 Influence de type, V_f % de fibre et le mode de conception sur la durabilité des composites

IV.3.1 Absorption d'eau par immersion

Ce test, réalisé sur 24 éprouvettes cubiques de 10 cm de côté, a été exécuté sur 3 échantillons de chaque conception de mélange. L'absorption de 72 heures des échantillons a été mesurée. Les résultats obtenus à partir du test d'absorption d'eau ont montré que les fibres amélioraient l'absorption d'eau en augmentant la quantité d'air

dans le composite, tandis que l'augmentation causée par les fibres d'acier recyclées était plus considérable.

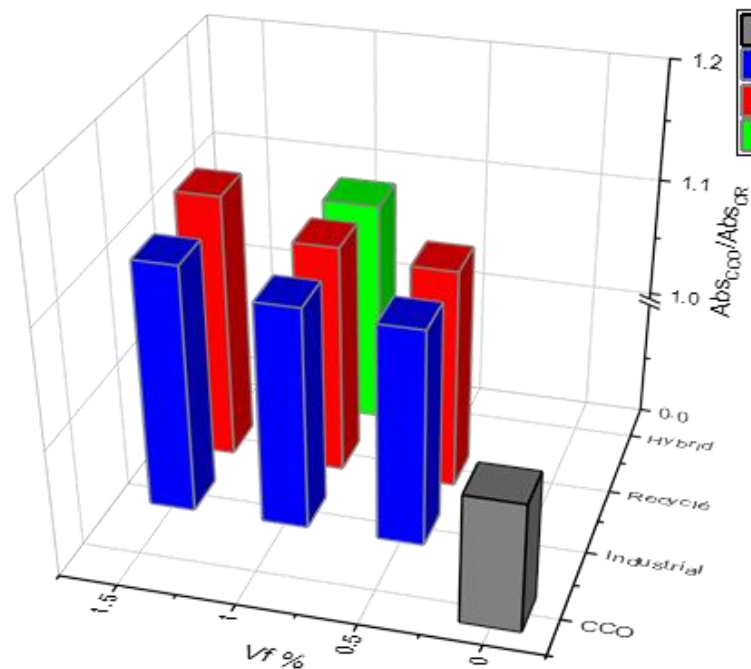


Figure IV- 2L l'influence de la fraction volumique de la fibre sur l'absorption d'eau par immersion

L'influence négative des fibres sur l'ouvrabilité augmente la porosité et l'absorption d'eau du composite fibré devient sensible. L'absorption d'eau de CCO était de 3,80 %, alors que ce paramètre augmentait à 7,6 % et 7,9 % de plus pour les mélanges contenant 0,5% de fibre industrielle, et pour la même fraction volumique dans les mélanges contenant de la fibre recyclée respectivement. Une fraction volumique plus élevée de fibres pour 1 % et 1,5%, provoque un rapport d'augmentation situé entre 8,1 % et 10,3 % respectivement, pour les fibres industrielles, et un rapport d'augmentation était compris entre 8,7 % et 11,8 %, respectivement, pour les fibres recyclées par rapport au CCO. D'après la figure IV.15 on remarque que le coefficient d'absorption d'eau par immersion est clairement plus faible pour le composite hybride, la combinaison de fibres industrielles et de fibres recyclées à une fraction volumique de 1 % hybride (0,5% fibres industrielles et 0,5 % fibres recyclées) a surpassé le CCO ordinaire qui devrait donner une augmentation nette d'environ 8,2 %.

IV.4 Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les essais non destructifs

IV.4.1 La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Cet essai est une méthode non destructive, car elle est basée sur des ondes ultrasoniques n'ayant aucun dommage pour l'élément examiné.

Le test UPV est bien connu pour être considéré comme une méthode d'inspection initiale prometteuse pour la matrice cimentaire. Il permet de déterminer certaines propriétés du composite et peut être évalué à l'aide de la mesure de la vitesse d'impulsion UPV, qui est utilisée pour détecter l'air et les fissures (Astm, 2009). Les résultats des tests UPV des différents composites sont reportés sur le tableau 1 ci-dessous :

Tableau VI-1 Résultats des tests UPV des différents composites

Type de composite	Type de fibres	FV % de fibres	UPV (Moyenne) (m/s)	Variation par rapport au témoin %	Ecart type (%)	C-V%
CCO	0	0.0	4516.13	0.00	1.28	0.028
CRA 0.5%	A	0.5	4320.98	-4.32	1.53	0.035
CRA 1%	A	1.0	4268.29	-5.49	1.21	0.028
CRA 1.5%	A	1.5	4112.02	-8.95	1.74	0.042
CRB 0.5%	B	0.5	4242.42	-6.06	0.9	0.021
CRB 1%	B	1.0	4191.62	-7.19	1.01	0.024
CRB1.5%	B	1.5	4017.64	-11.04	1.14	0.028
CRGFA 0.5%	A	0.5	4505.16	-0.24	1.27	0.028
CRGFA 1%	A	1.0	4427.18	-1.97	1.13	0.026
CRGFA 1.5%	A	1.5	4375.00	-3.13	1.42	0.032
CRGFB 0.5%	B	0.5	4487.18	-0.64	1.27	0.028
CRGFB 1%	B	1.0	4430.38	-1.90	1.13	0.026
CRGFB 1.5%	B	1.5	4320.98	-4.32	1.41	0.033

Les composites présentant une valeur UPV élevée sont généralement considérés comme d'excellente qualité. L'impulsion de 3,66 à 4,57 Km/s offre une bonne durabilité (Malhotra, 1976). Plusieurs scientifiques ont comparé la relation entre la vitesse des ultrasons et les propriétés mécaniques du composite (Demirboğa et al., 2004). La résistance à la compression du composite est classée selon les valeurs suivantes : Si la VUP est supérieure à 4,5 Km/s, elle est " excellente " ; de 3,5 à 4,5 Km/s, elle est " bonne " ; de 3,0 à 3,5 Km/s, elle est " douteuse " ; de 2,0 à 3,0 Km/s, elle est " mauvaise " ; et elle est " très mauvaise " en dessous de 2,0 Km/s (Whitehurst, 1951).

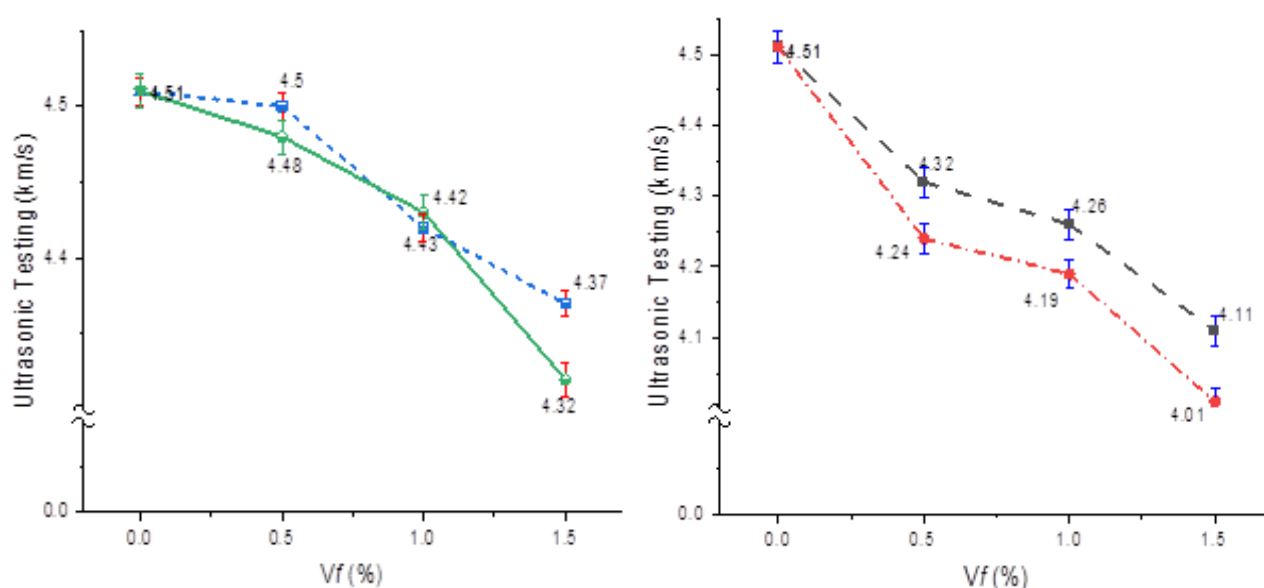


Figure IV- 3 Evolution de UPV du composite renforcé en fonction $V_f\%$
 (a) Les composites renforcés sur toute la section (b) les composites à gradient fonctionnel

La figure 3, illustre la représentation graphique de l'UPV de tous les mélanges et les effets de la fraction volumique des deux types de fibres (fibres industrielles ou fibres recyclées) dans les deux conceptions, l'une renforcée sur toute la section et l'autre seulement dans la zone de traction, nous substituons un gradient fonctionnel. L'CCO sans fibres d'acier a présenté une UPV_{CCO} moyenne = 4.51 Km/s à 28 jours. Cependant, lorsque la V_f atteint 1,5%, la tendance à la baisse légèrement différente avec les différentes formes de fibres d'acier était de 0,99% et 0,97% pour les spécimens entièrement renforcés à gradation fonctionnelle, respectivement.

La pente des fibres recyclées est légèrement inférieure. La diminution de UPV est limitée, et la valeur la plus basse de UPV_{CR} est de 4.32 Km/s et 4.01 Km/s pour CRGFB

et CRB, respectivement. La valeur la plus élevée de l'UPVCR est de 4.50 Km/s et 4.32 Km/s pour CRGFA et CRA, respectivement, avec $V_f = 0.5\%$

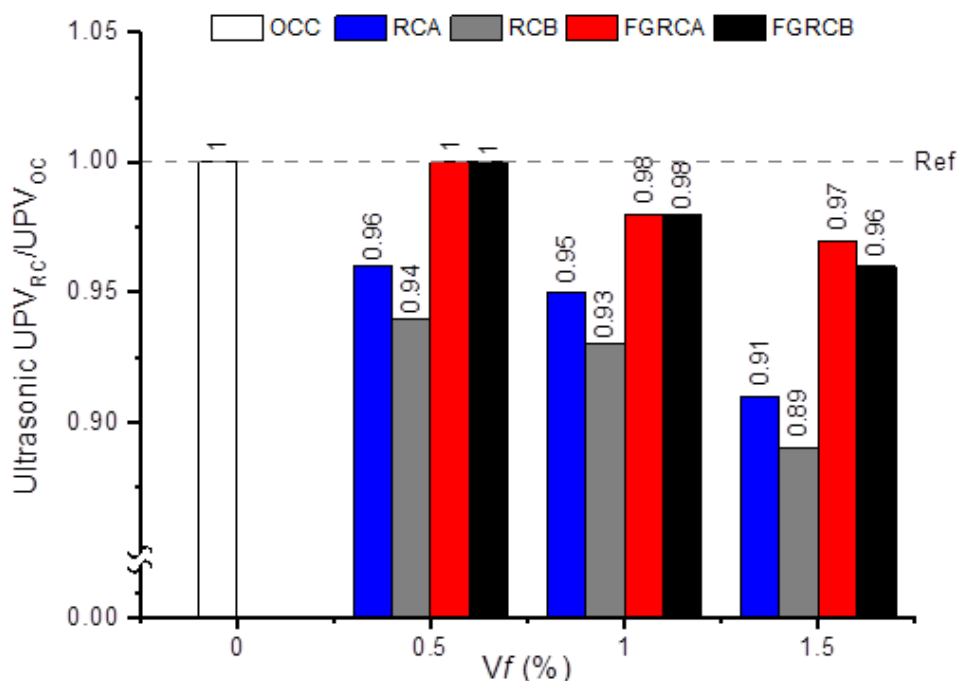


Figure IV- 4 Relation entre le rapport UPV_{CR}/UPV_{CCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et V_f (%)

La relation entre le rapport (UPV_{CR}/UPV_{CCO}) et le V_f des deux types de fibres d'acier est illustrée dans la Figure 4. Le rapport (UPV_{CR}/UPV_{CCO}) diminue continuellement tandis que le V_f augmente de 0% à 1.5%.

Une diminution du rapport (UPV_{CR}/UPV_{CCO}) qui a atteint sa valeur maximale lorsque $V_f = 1.5\%$, est observée à environ 11%, 09%, 04%, et 03% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. D'autre part, lorsque $V_f = 1\%$, la diminution enregistrée du rapport (UPV_{CR}/UPV_{CCO}) est d'environ 07%, 05%, 02%, et 02% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. En outre, l'incorporation des fibres avec $V_f = 0.5\%$ semble conduire à une diminution du rapport (UPV_{CR}/UPV_{CCO}) d'environ 06% et 04% pour les composites CRB et CRA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. Cependant, l'ajout de fibres d'acier ne semble pas changer l'UPV des CRGFB et CRGFA par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier lorsque $V_f = 0.5\%$.

Les résultats de cette étude soulignent la grande sensibilité de la valeur UPV du composite fibré et nous avons aussi remarqué d'après les résultats de cette campagne d'essais d'UPV, que leur valeur diminue continuellement lorsque V_f augmente de 0% à 1.5% pour les deux types de fibres métalliques industrielles ou recyclées. Ce fait a déjà été observé et discuté plusieurs fois dans la littérature (Omidinasab et al., 2022).

A travers tous les résultats, nous pouvons regrouper le comportement de la valeur UPV en fonction du type de conception. La première conception, la section entièrement renforcée, montre une diminution significative de l'UPV quel que soit le type de fibre. La deuxième conception est fonctionnellement graduée et caractérisée par une légère diminution de l'UPV. Cela signifie que l'augmentation du pourcentage de fibres d'acier a un effet négatif, en accord avec (Hassiba et al., 2018). Cependant, l'impact négatif des fibres industrielles est beaucoup plus faible que celui des fibres recyclées. L'UPV diminue de manière presque linéaire. Cette diminution est due à l'augmentation des volumes de pores et à la propagation des fissures (Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs). Ce résultat indique que l'ajout de fibres diminue la compression et augmente la quantité d'air dans le composite. Le même effet a été rapporté par (Mo et al., 2014). Ceci est probablement dû à la diminution de la compacité du béton résultant de l'augmentation de la porosité causée par l'ajout de la fibre métallique.

Selon les résultats obtenus, la vitesse d'impulsion de tous les mélanges de béton après 28 jours était dans la gamme de 4,01- 4,51 km/s, indiquant que la qualité du composite était bonne.

IV.4.2 Corrélation statistique

En utilisant l'ensemble des données expérimentales collectées, la relation entre la résistance à la compression CR et la résistance à la compression du CRFG a été obtenue en effectuant l'analyse statistique avec une régression linéaire, comme le montre la figure 5.

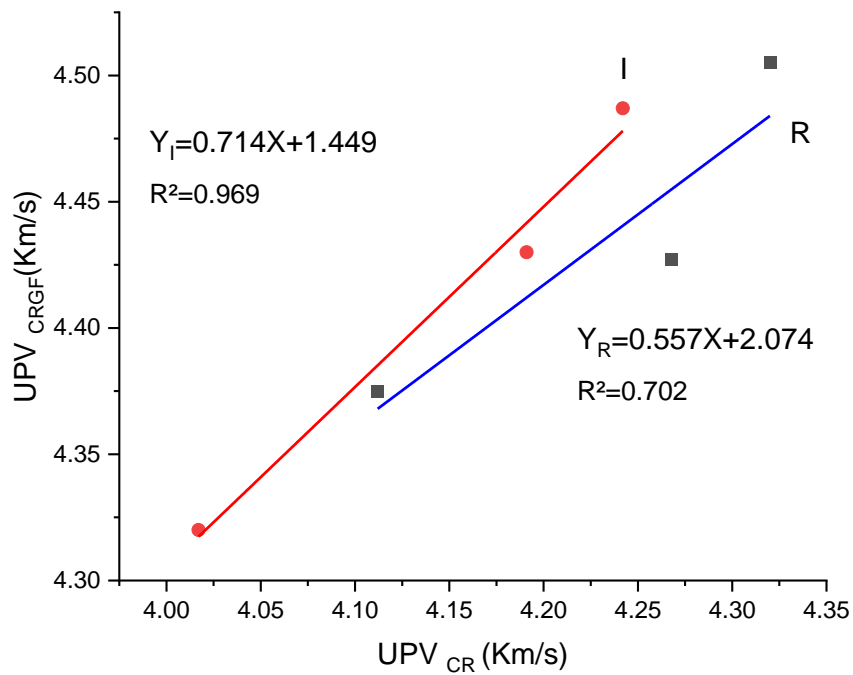


Figure IV- 5 Relation entre la vitesse d'impulsion UPV_{CR} et la vitesse d'impulsion UPV_{CRGF}

Lors de cette recherche une approche statistique a été élaborée et elle indique qu'il y avait une coordination entre les valeurs de la résistance mécanique à la compression. Les équations de corrélation sont données comme suit :

-Pour le composite renforcé par des fibres industrielles **$Y_I = 0.714X + 1.449$**

Le coefficient de corrélation égal **$R^2 = 0.989$** .

-Pour le composite renforcé par des fibres recyclées **$Y_R = 0.557X + 2.074$**

Le coefficient de corrélation égal **$R^2 = 0.702$** .

IV.5 Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les propriétés mécaniques à l'état durci (essais destructifs)

Pour décrire et caractériser le mode de comportement mécanique des composites, l'ensemble des éprouvettes réalisées ont été soumises aux différents essais mécaniques, un total de quatre tests mécaniques principaux a été effectué sur tous les types de composites à l'état durci, chaque valeur est la moyenne obtenue sur trois éprouvettes.

IV.5.1 Résistance en compression

Les essais de compression sont exécutés selon la norme NF EN 12390-3 sur trois éprouvettes provenant de chaque mélange du composite. Les résultats des écrasements sont présentés dans le tableau 2. La résistance maximale en compression ne semble pas influencée par l'introduction des fibres dans le composite.

Tableau IV- 2 Résultats des essais de compression des différents composites

Type	Type de fibres	% de fibres	fc (MPa)	Variation par rapport au témoin %	Ecart type (%)	C-V %
CCO	0	0.0	35.49	0.00	1.5	4.227
CRA 0.5%	A	0.5	34.3	-3.35	0.96	2.799
CRA 1%	A	1.0	35.53	0.11	1.75	4.925
CRA 1.5%	A	1.5	38.15	7.50	1.5	3.932
CRB 0.5%	B	0.5	33.01	-6.99	1.4	4.241
CRB 1%	B	1.0	37.81	6.54	1.6	4.232
CRB1.5%	B	1.5	39.85	12.29	1.12	2.811
CRGFA 0.5%	A	0.5	33.5	-5.61	0.95	2.836
CRGFA 1%	A	1.0	34.81	-1.92	1.71	4.912
CRGFA 1.5%	A	1.5	35.84	0.99	1.77	4.939
CRGFB 0.5%	B	0.5	32.65	-8.00	1.37	4.196
CRGFB 1%	B	1.0	34.37	-3.14	0.96	2.793
CRGFB 1.5%	B	1.5	35.27	-0.62	1.24	3.516

L'une des caractéristiques les plus souhaitables d'un composite cimentaire est sa résistance à la compression (F_c). Les composites ordinaires et les composites renforcés de fibres ont des résultats similaires en matière de résistance à la compression, f_c peuvent être améliorés ou dégradés par l'ajout de fibres.

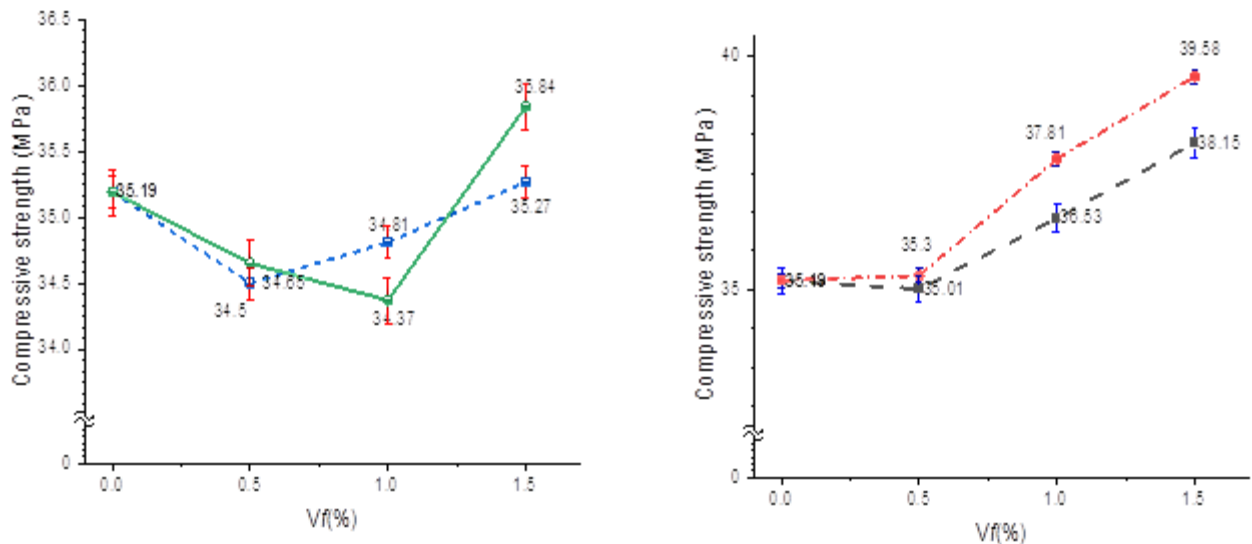


Figure IV- 6 Evolution de la résistance en compression des composites renforcés en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) Les composites renforcés sur toute la section, (b) les composites à gradient fonctionnel

La figure 6 montrée la représentation graphique de la résistance à la compression pour différents composites et les effets de la fraction volumique des deux types de fibres (fibres industrielles avec des crochets aux extrémités ou fibres recyclées avec une forme ondulée) dans les deux modèles, l'un renforcé sur toute la section et l'autre seulement dans la zone de traction, où nous avons substitué un gradient fonctionnel. L'CCO sans fibres d'acier a montré une résistance moyenne à la compression de 35.19 Mpa à 28 jours. Cependant, lorsque Vf atteint 1,5%, la tendance à l'augmentation, légèrement différente des diverses formes de fibres d'acier, se situe dans la gamme de 1,05% et 1,02% pour les spécimens entièrement renforcés et pour le concept de gradation fonctionnelle, respectivement. La pente des fibres recyclées est légèrement plus importante. L'augmentation est limitée, et la valeur de la résistance la plus élevée est de 39.58 Mpa et 35.48 Mpa pour CRB et CRGFB, respectivement. La valeur de la résistance la plus faible est de 35.01 Mpa et 34.37 Mpa avec Vf = 0.5% pour CRA et 1% pour CRGFB, respectivement,

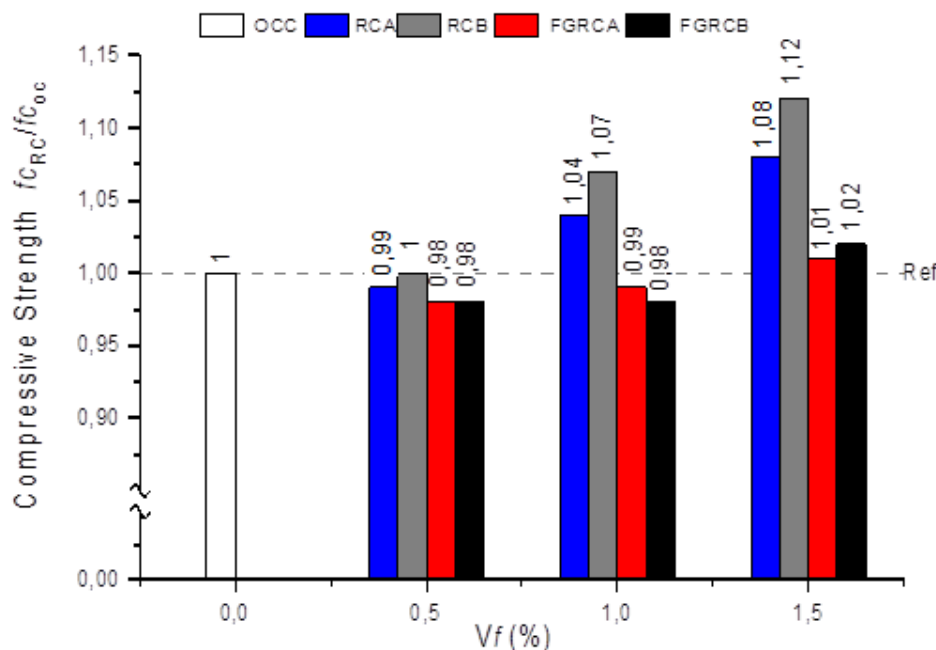


Figure 7 Relation entre le rapport f_{cCR}/f_{cCCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et V_f (%)

La figure 7 montre la relation entre le rapport de la résistance à la compression pour différents composites (f_{cCR}/f_{cCCO}) et le changement de V_f des deux types de fibres d'acier utilisées dans cette étude. On constate que l'amélioration du rapport (f_{cCR}/f_{cCCO}) atteint sa valeur maximale lorsque $V_f = 1.5\%$, soit environ 12%, 08%, 02%, et 01% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. D'autre part, lorsque $V_f = 1\%$, on constate une amélioration dans le rapport (f_{cCR}/f_{cCCO}) d'environ 7% et 4% pour les composites CRB, et CRA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. Contrairement aux composites CRGFB et CRGFA, l'incorporation des fibres avec $V_f = 1\%$ semble diminuer le rapport (f_{cCR}/f_{cCCO}) d'environ 2% et 1%, respectivement. Lorsque $V_f = 0,5\%$, le rapport (f_{cCR}/f_{cCCO}) diminue d'environ 2%, 2% et 1% pour les composites CRA, CRGFB et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. Cependant, l'ajout de fibres d'acier ne change pas le rapport (f_{cCR}/f_{cCCO}) de CRB par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier lorsque $V_f = 0.5\%$.

En général, (f_{CR}) augmente continuellement lorsque V_f augmente de 0% à 1.5% ; une conduite similaire a déjà été observée dans la littérature (MA Ismail, 2007).

Un comportement cassant avec une chute soudaine de la capacité de charge du mélange $V_f = 0\%$ a été observé. Cependant, les mélanges incorporant des fibres d'acier ont présenté des réponses ductiles après la déformation maximale, car les fibres d'acier ont partiellement limité l'expansion latérale de la zone fibrée pour les spécimens CRGF et CR, quelque soit le type de fibre d'acier, comme dans une étude précédente (Kazemi et Lubell, 2012 ; Pansuk et al., 2008). On peut conclure de ces observations que l'amélioration de la résistance est observée avec l'ajout de fibres métalliques recyclées dans un composite ordinaire. En revanche, l'augmentation de (f_{CR}) n'est pas linéaire lorsque V_f augmente, en particulier pour le composite fonctionnellement gradé. La performance en compression du composite entièrement renforcé est significativement améliorée lorsque V_f est supérieur à 0,5%. Ce résultat indique que l'ajout de fibres avec un V_f de 1% à 1,5% est plus efficace. Le rôle des fibres métalliques en compression est réduit par rapport à la tension, mais il peut retarder la détérioration de l'éprouvette et empêcher la propagation des fissures en reliant leurs lèvres. Ce comportement est plus prononcé dans les travaux de (Aslani et Nejadi, 2013 ; Li et al., 2019).

De plus, lorsque V_f était inférieur à 0,5%, la résistance à la compression était presque la même pour les composites entièrement renforcés. Une attitude similaire a déjà été observée dans la littérature (Abadel et al., 2016). L'ajout d'un petit volume de fibres de 0,5% n'a pas produit une amélioration appréciable et significative du comportement de la résistance à la compression (Lakavath et al., 2021). Toujours concernant les composites à gradient fonctionnel, une diminution de (f_{CR}) par rapport à celle des éprouvettes CCO sans fibres d'acier s'est produite parce que les fibres ne sont pas distribuées uniformément dans le mélange, ce qui augmente la porosité. Ce résultat est cohérent avec les travaux de (Boulekbache et al., 2012 ; Domaga\la, 2011 ; Khaloo et al., 2014). Par conséquent, le rôle mécanique et bénéfique des fibres métalliques est activé après l'apparition de la fissure (Awwad et al., 2012 ; Centonze et al., 2012).

IV.5.2 Corrélation statistique

L'analyse statistique, effectuée sur les ensembles de données collectées pour la relation entre la résistance à la compression f_{cRC} et la résistance à la compression du f_{cCRGF} , est présentée dans la Figure. 8.

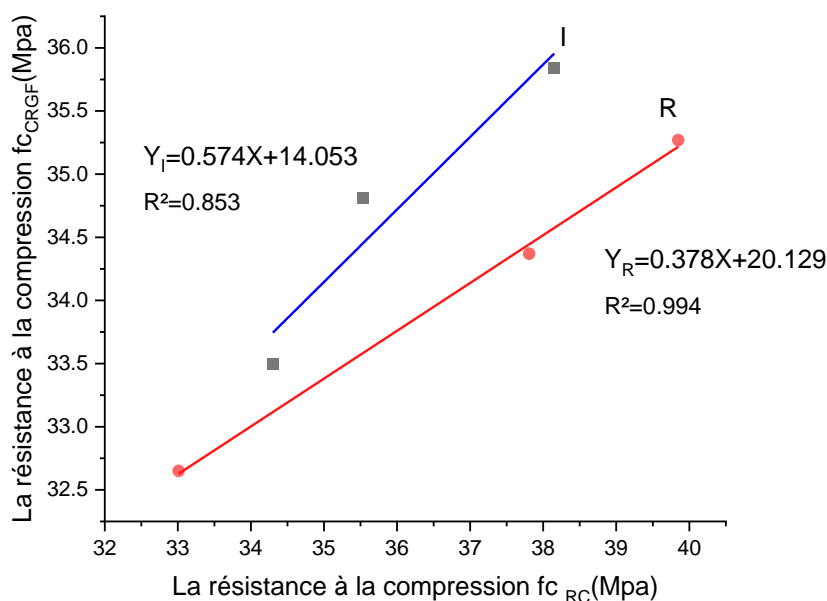


Figure IV- 8 Corrélation entre les valeurs de la résistance à la compression du béton

Figure 8 indique qu'il existe une corrélation qui réunit les différentes valeurs de la résistance à la compression. L'équation empirique de la régression linéaire obtenue pour cette dernière avec le coefficient de corrélation, est donnée comme suit :

Pour le composite renforcé par des fibres industrielles **$YI = 0.574X + 14.053$**

Le coefficient de corrélation égal **$R^2 = 0.853$**

Pour le composite renforcé par des fibres recyclées **$YR = 0.378X + 20.129$**

Le coefficient de corrélation égal **$R^2 = 0.994$**

IV.5.3 Modes de rupture en compression :

Deux types de défaillance différente ont été identifiés par les tests de compression, le premier type de rupture, des éclatements rapides provoquent une dégradation au cœur de l'éprouvette pour CCO. Le second type de défaillance est caractérisé par le gonflement de l'éprouvette dans la direction latérale de la charge,

l'émiettement ou la fragmentation de l'éprouvette, et à la rupture elle conserve son intégrité, les CR et CRGF avec la fraction volumique des deux types de fibres de 0,5% à 1,5%. La fibre renforce le composite en réduisant la localisation des contraintes, en empêchant aussi la propagation des fissures et en augmentant la ductilité des composites. Les différents modes de rupture des éprouvettes sont représentés sur la figure 9 ci-dessous :

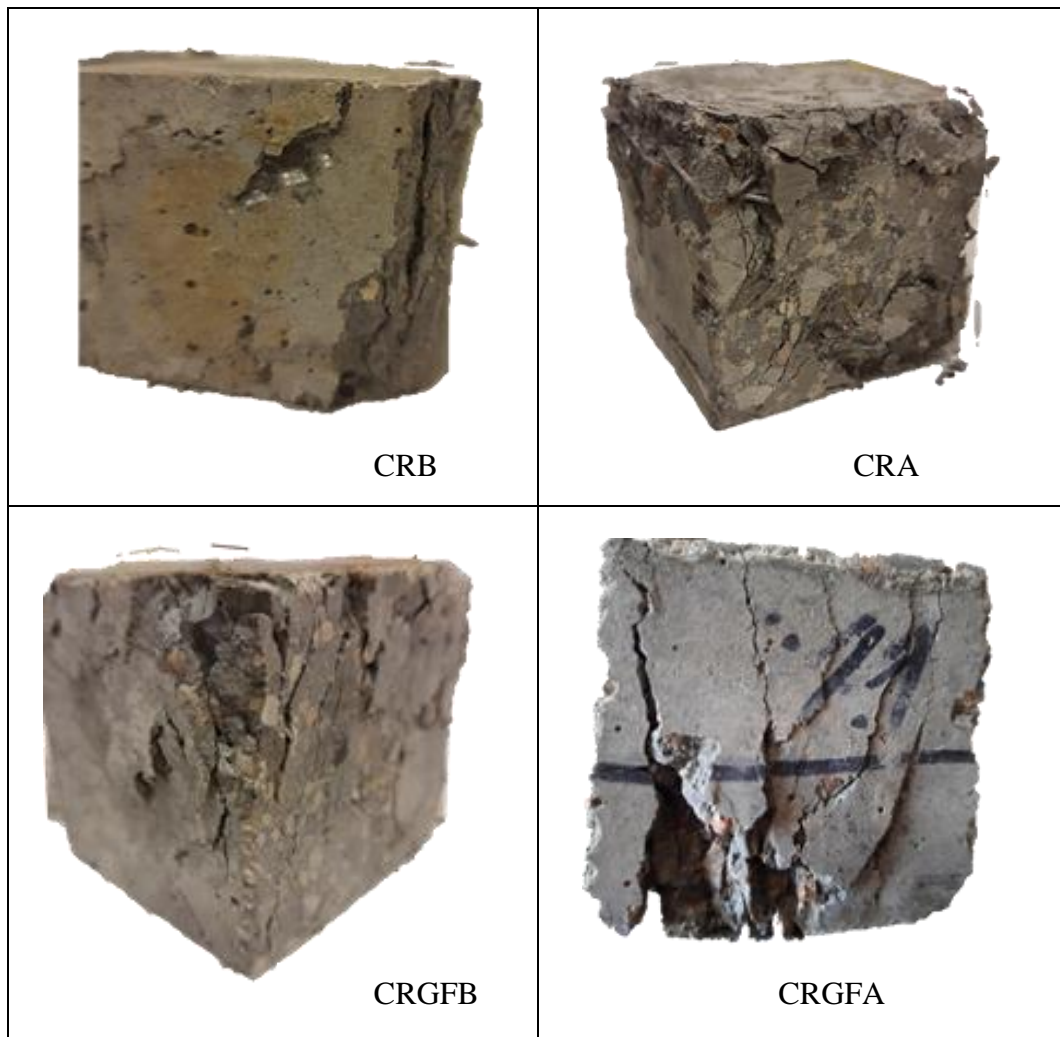


Figure IV- 9 Modes de rupture des éprouvettes à la compression.

IV.5.4 Résistance à la traction par fendage

La résistance à la traction par fendage est une mesure indirecte de la véritable résistance à la traction du béton. La résistance à la traction par fendage de tous les composites est présentée dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau IV- 3 Résultats des essais de traction par fendage des différents composites

Type de composite	Type de fibres	FV % de fibres	ft (MPa)	Variation par rapport au témoin %	Ecart type (%)	C-V%
CCO	0	0.0	3.03	0.00	0.20	6.60
CRA 0.5%	A	0.5	3.64	26.40	0.33	9.07
CRA 1%	A	1.0	4.22	32.20	0.21	4.98
CRA 1.5%	A	1.5	4.51	35.10	0.24	5.32
CRB 0.5%	B	0.5	3.90	29.00	0.19	4.87
CRB 1%	B	1.0	4.45	34.50	0.39	8.76
CRB1.5%	B	1.5	4.90	39.00	0.14	2.86
CRGFA 0.5%	A	0.5	3.24	22.40	0.27	8.33
CRGFA 1%	A	1.0	3.50	25.00	0.13	3.71
CRGFA 1.5%	A	1.5	3.79	27.90	0.41	10.82
CRGFB 0.5%	B	0.5	3.31	23.10	0.27	8.16
CRGFB 1%	B	1.0	3.65	26.50	0.14	3.84
CRGFB 1.5%	B	1.5	3.89	28.90	0.41	10.54

Le CCO sans fibres d'acier a montré une résistance moyenne à la traction par fendage égale à 3.03 Mpa à 28 jours. Comme prévu, CCO a montré une résistance à la traction par fendage inférieure au composite renforcé. La relation entre la résistance à la traction par fendage (f_t) et la fraction volumique de la fibre d'acier (V_f) avec les deux formes différentes de la fibre d'acier (fibres industrielles avec des crochets aux extrémités et fibres recyclées avec une forme ondulée) est montrée dans la Figure 5. f_t a augmenté continuellement quand V_f a augmenté de 0 % à 1.5%. Lorsque $0.5 \% \leq V_f \leq 1,5 \%$, les fibres recyclées ont un effet renforcé légèrement meilleur que les fibres industrielles. Comme le montre la figure 10, ces deux types de fibres d'acier ont une longueur similaire ; la seule différence est le diamètre et la forme. Avec la même la fraction volumique en fibres d'acier, l'effet de renforcement peut être amélioré de façon spectaculaire en changeant la forme et le diamètre des fibres d'acier.

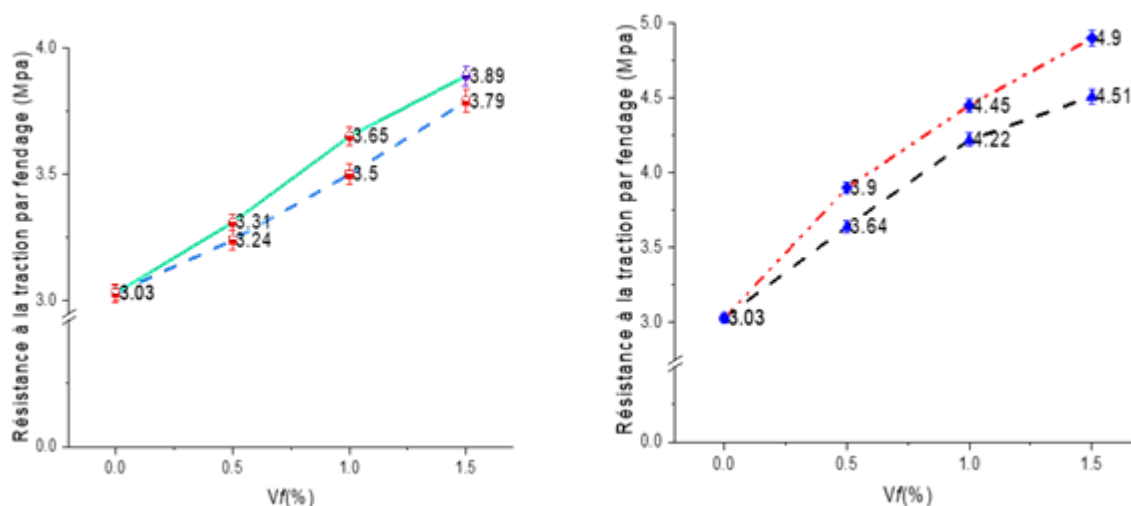


Figure IV- 10 Evolution de la résistance à la traction par fendage des composites renforcés en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) les composites renforcés sur toute la section (b) les composites à gradient fonctionnel

Cependant, lorsque V_f atteint 1.5%, la tendance d'augmentation de la résistance est légèrement différente avec les diverses formes de fibres d'acier, les fibres recyclées avec une forme ondulée a toujours le meilleur effet renforcé et les fibres industrielles prennent la deuxième place, pour les spécimens entièrement renforcés. La pente des fibres recyclées est légèrement plus importante. La valeur la plus élevée de (f_{tCR}) par V_f

= 1.5% est 4.9 Mpa et 3.89 Mpa pour CRB et CRGFB, respectivement, et la valeur la plus basse de (f_{tCR}) est 3.64 Mpa et 3.23 Mpa avec $V_f = 0.5\%$, pour CRA et CRGFA, respectivement.

Les résultats des tests ont prouvé que la forme d'une ondulation peut fournir une force de liaison d'interface plus élevée que la forme en crochet aux deux extrémités. On peut voir que la forme de la fibre d'acier a un effet important sur la force de liaison de l'interface entre la matrice et la fibre d'acier. Afin d'augmenter le renforcement de la fibre d'acier sur le composite, la forme déformée de la fibre d'acier est le meilleur choix.

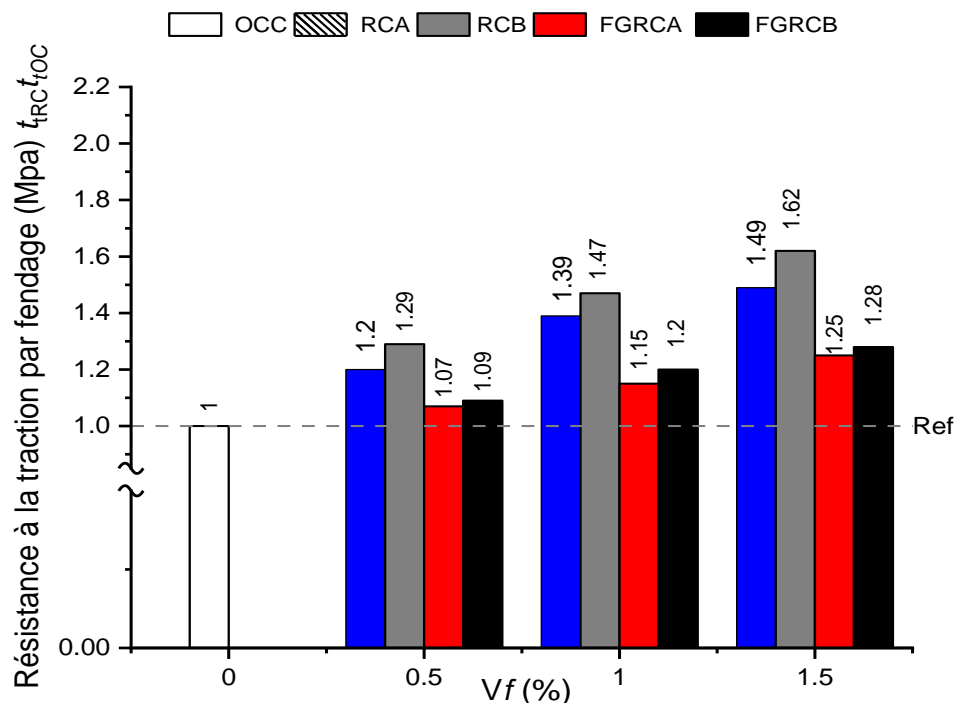


Figure IV- 11 Relation entre le rapport f_{tCR}/f_{tCCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et V_f (%)

Les résultats indiquent que la matrice avec des fibres d'acier en pleine profondeur a une résistance à la traction par fendage plus élevée que les échantillons à gradation fonctionnelle quelle que soit la forme des fibres d'acier, la résistance à la traction par fendage (f_{tCR}) augmente toujours avec l'augmentation de V_f de 0% à 1,5%. Une amélioration du rapport (f_{tCR}/f_{tCCO}) qui a atteint sa valeur maximale lorsque $V_f = 1,5\%$ est observée à environ 62%, 49%, 28% et 25% pour les composites CRB, CRA,

CRGFB et CRGFA, respectivement par rapport aux échantillons CCO sans fibres d'acier. Lorsque $V_f = 1\%$. Nous observons également une amélioration du rapport (f_{tCR}/f_{tCCO}) d'environ 47%, 39%, 20%, et 15% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. Nous remarquons également, lorsque $V_f = 0.5\%$, une amélioration du rapport (f_{tCR}/f_{tOCC}) d'environ 29%, 20%, 9%, et 7% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier.

IV.5.5 Corrélation statistique

L'analyse statistique effectuée liant les différentes valeurs de la résistance à la traction par fendage de f_{tCR} et f_{tCRGF} est présentée dans la Figure 12.

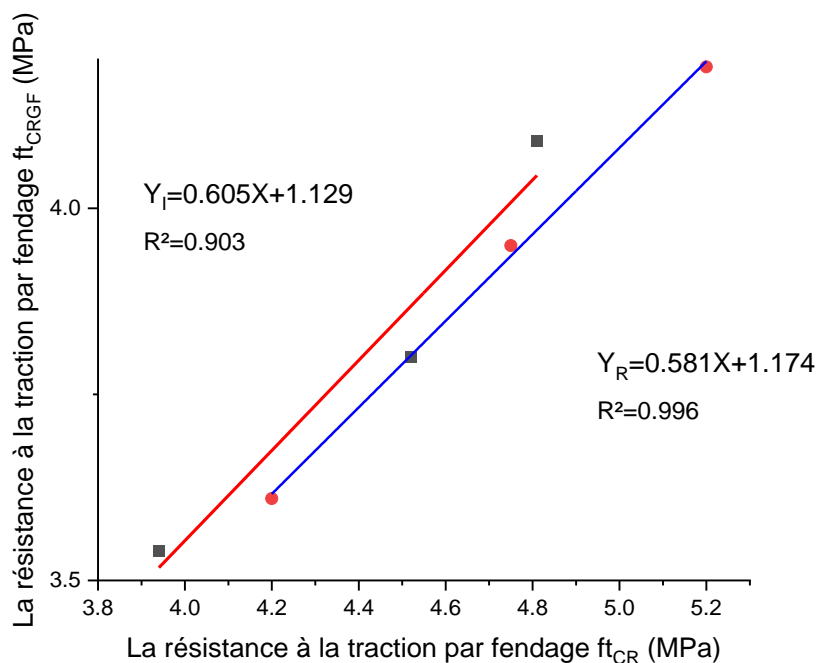


Figure IV- 12 Corrélation entre les valeurs de la résistance à la traction par fendage f_{tCR} et f_{tCRGF}

Les résultats du paragraphe précédent nous confirment une autre fois qu'on peut établir des relations empiriques possibles entre la résistance à la traction par fendage f_{tCRGF} et f_{tCR} et on peut ainsi analyser la qualité de corrélation en prenant comme indicateur statistique le coefficient de détermination « r^2 ».

L'équation empirique de la régression linéaire obtenue pour cette dernière avec le coefficient de corrélation, est donnée comme suit :

Pour le composite renforcé par des fibres industrielles $YI = 0.605X + 1.011$

Le coefficient de corrélation égal $R^2 = 0.903$

Pour le composite renforcé par des fibres recyclées $YR = 0.581X + 1.048$

Le coefficient de corrélation égal $R^2 = 0.996$

IV.5.6 Modes de rupture à la traction par fendage

Généralement en cours d'essai de la traction par fendage, nous constatons que dans la plupart des cas, une fissure apparaît au milieu de l'éprouvette et se propage le long du rayon sollicité. La longueur et l'ouverture de la fissure augmentent proportionnellement au déplacement latéral. La rupture étant brutale et fragile surtout pour le composite ordinaire.

Dans le cas du composite fibré, une fissure principale commence au milieu de l'échantillon avec une ouverture plus importante. Même si d'autres fissures connexes apparaissent fréquemment, cette fissure reste très souvent la fissure la plus considérable.

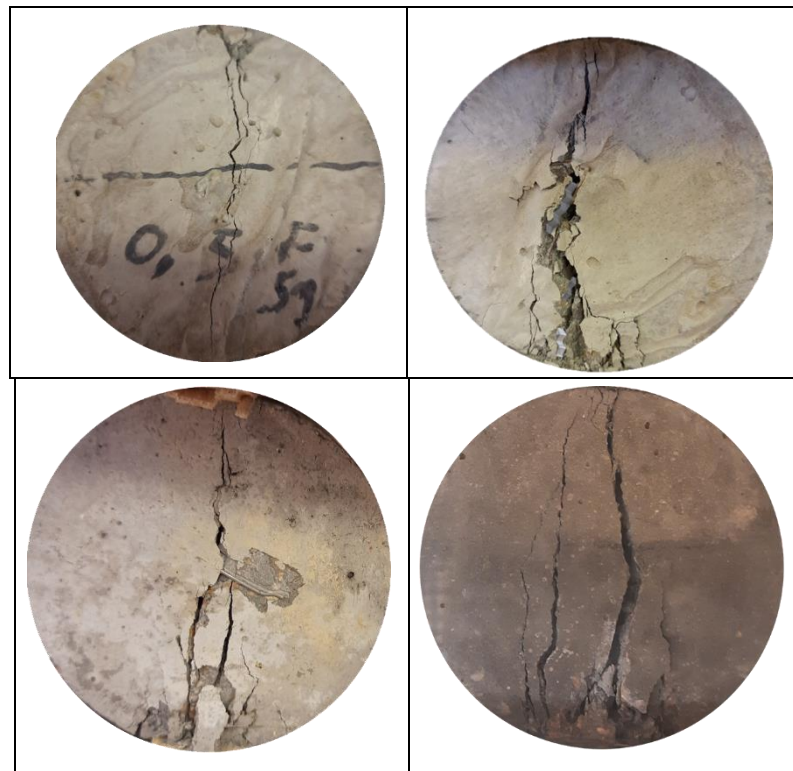




Figure IV-13 Modes de rupture des éprouvettes à la traction par fendage

IV.5.7 Résistance au cisaillement direct

Les résultats des essais à l'état durci de la résistance moyenne au cisaillement direct. Et les pourcentages d'augmentation sont représentés dans le tableau 4.

Tableau IV-4 Résultats des essais de cisaillement des différents composites.

Type de béton	Type de fibres	% de fibres	Tu (MPa)	Variation par rapport au témoin %	Ecart type (%)	C-V%
CCO	0	0.0	7.1	0.00	0.49	6.901
CRA 0.5%	A	0.5	10.31	45.16	0.72	6.984
CRA 1%	A	1.0	14.78	108.18	1.05	7.104
CRA 1.5%	A	1.5	15.86	123.32	0.89	5.612
CRB 0.5%	B	0.5	11.66	64.16	0.49	4.202
CRB 1%	B	1.0	13.19	85.84	0.37	2.805
CRB1.5%	B	1.5	16.15	127.47	0.91	5.635
CRGFA 0.5%	A	0.5	8.4	18.24	0.35	4.167
CRGFA 1%	A	1.0	12.21	71.93	0.59	4.832
CRGFA 1.5%	A	1.5	14.11	98.68	0.59	4.181
CRGFB 0.5%	B	0.5	10.63	49.66	0.75	7.056
CRGFB 1%	B	1.0	12.5	76.06	0.79	6.320
CRGFB 1.5%	B	1.5	14.42	103.16	0.41	2.843

Les résultats des essais de cisaillement en fonction de Vf en termes de qualité sont contraires aux résultats de l'UPV. Les valeurs montrent que la résistance au cisaillement des composites est influencée positivement par le facteur fibre et augmente avec l'augmentation de Vf.

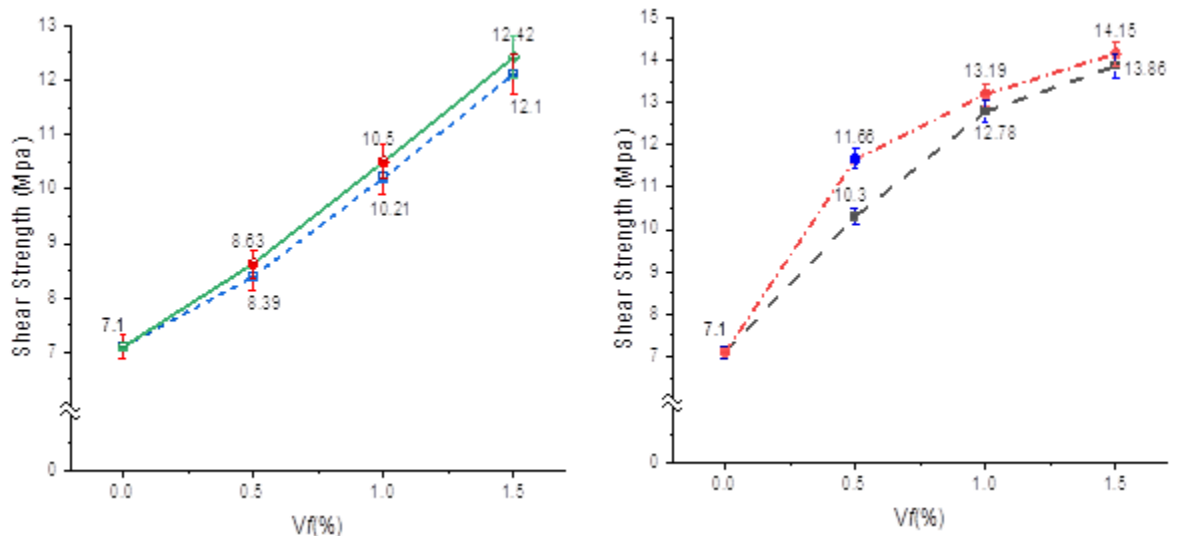


Figure IV- 14 Evolution de la résistance au cisaillement des composites renforcés en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) les composites renforcés sur toute la section (b) les composites à gradient fonctionnel

La Figure 14 montrée la représentation graphique de la résistance au cisaillement de tous les mélanges, ainsi que les effets de la fraction volumique des deux types de fibres (fibres industrielles avec des crochets aux extrémités et fibres recyclées avec une forme ondulée) dans les deux conceptions, l'une renforcée sur toute la section et l'autre seulement dans la zone de traction, où nous avons substitué un gradient fonctionnel. L'CCO sans fibres d'acier a montré une résistance moyenne au cisaillement égale à 7.10 Mpa à 28 jours.

Cependant, lorsque Vf atteint 1.5%, la tendance d'augmentation, légèrement différente avec les diverses formes de fibres d'acier, est de 1.02% et 1.03% pour les spécimens entièrement renforcés et fonctionnellement calibrés, respectivement. La pente des fibres recyclées est légèrement plus importante. La valeur la plus élevée de (τ_{CR}) est 14.15 Mpa et 12.42 Mpa pour CRB et CRGFB, respectivement, et la valeur la plus basse de (τ_{CR}) est 10.03 Mpa et 8.39 Mpa avec Vf = 0.5% pour CRA et CRGFA, respectivement.

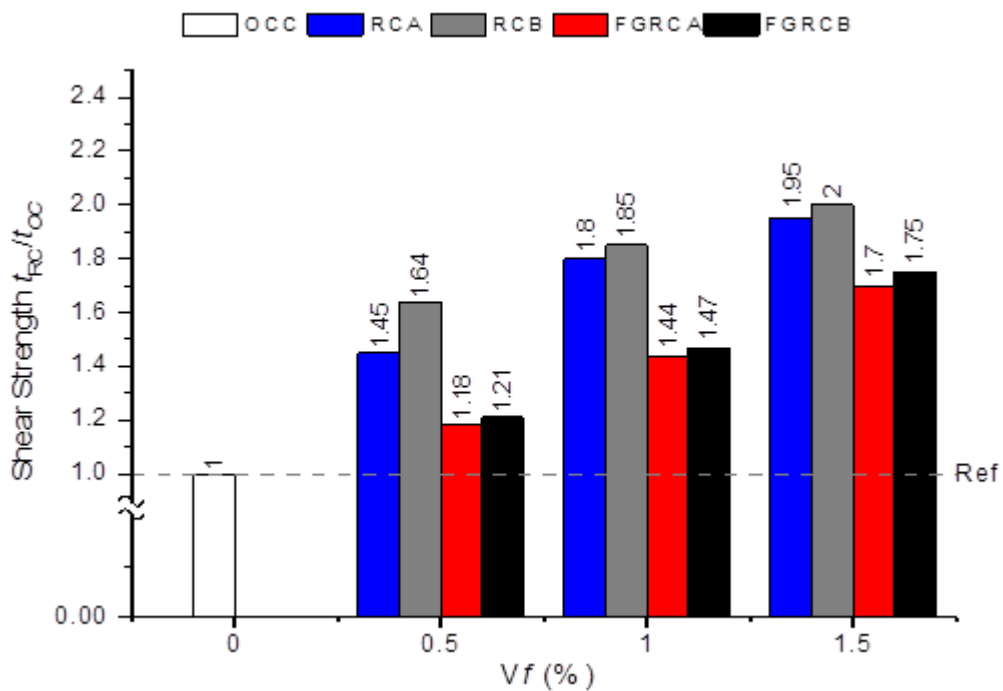


Figure IV-15 Relation entre le rapport τ_{CR}/τ_{CCO} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et V_f (%)

La relation entre le rapport de résistance au cisaillement pour les différents composites (τ_{CR}/τ_{CCO}) et la fraction volumique de fibres d'acier V_f avec les diverses formes de fibres d'acier (Figure 15). Les résultats indiquent que la matrice avec des fibres d'acier en pleine profondeur a une résistance au cisaillement plus élevée que les échantillons à gradation fonctionnelle. Quelle que soit la forme des fibres d'acier, la résistance au cisaillement (τ_{CR}) augmente toujours avec l'augmentation de V_f de 0% à 1,5%. Une amélioration du rapport (τ_{CR}/τ_{CCO}) qui a atteint sa valeur maximale lorsque $V_f = 1,5\%$ est observée à environ 100%, 95%, 75% et 70% pour les composites CRB, CRA, CRGFB et CRGFA, respectivement par rapport aux échantillons CCO sans fibres d'acier. Lorsque $V_f = 1\%$, nous observons également une amélioration du rapport (τ_{CR}/τ_{CCO}) d'environ 85%, 80%, 47%, et 44% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. Nous remarquons également, lorsque $V_f = 0,5\%$, une amélioration du rapport (τ_{CR}/τ_{CCO}) d'environ 64%, 45%, 21%, et 18% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier.

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce travail sont cohérents avec ceux communiqués dans des campagnes expérimentales similaires (Boulekbache et al., 2012 ; Khaloo et al., 2014). On constate que la résistance au cisaillement augmente lorsque V_f passe de 0% à 1,5%. La même observation a été faite dans la littérature (Boulekbache et al., 2012). L'un des critères pour augmenter et améliorer la résistance au cisaillement est l'ajout de fibres. Ces résultats sont en accord avec C. Lakavath et al (2021) (Lakavath et al., 2021). L'ajout de fractions volumiques plus élevées de 1,0 % et 1,5 % a amélioré de manière significative le comportement après fissuration, la ductilité et la résistance ultime au cisaillement. Les fibres se sont avérées plus efficaces pour augmenter la valeur (τ_{CR}) du composite. La même observation faite par (N. Banthia et al, 2014) a montré que la résistance au cisaillement du béton semble être plus liée à la teneur en fibres. Cette augmentation est attribuée à l'excellente liaison entre les armatures et la matrice cimentaire. T. Soetens et S. Matthys (2017) (Soetens et Matthys, 2017) indiquent que les fibres d'acier recyclées pourraient être utilisées efficacement comme renforcement discontinu dans la matrice composite cimentaire.

IV.5.8 Corrélation statistique

L'analyse statistique réalisée sur les ensembles de données collectées pour la relation entre la résistance au cisaillement τ_{CR} et la résistance au cisaillement τ_{CRGF} est présentée sur la Figure 16.

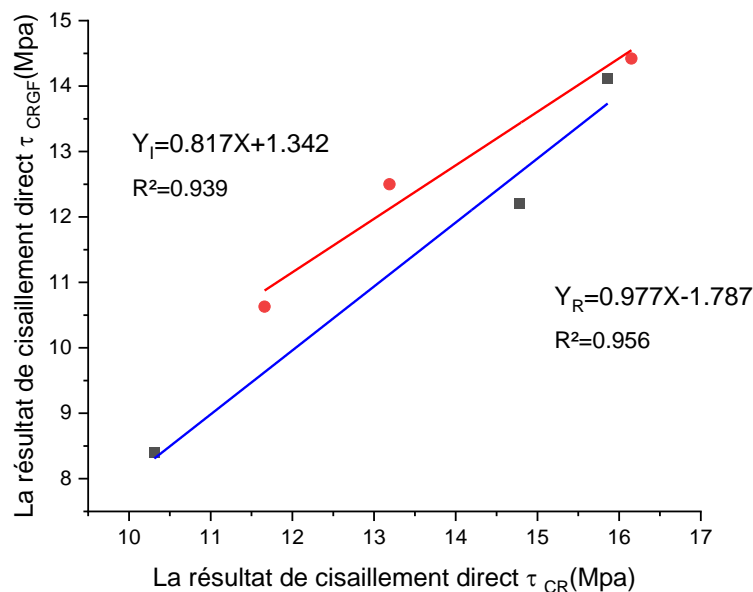


Figure IV-16 Relation entre la résistance au cisaillement τ_{CR} et τ_{CRGF}

On remarque que la résistance au cisaillement est liée étroitement et on peut établir des relations empiriques possibles et d'analyser la qualité de corrélation en prenant comme indicateur statistique le coefficient de détermination « R^2 ».

L'équation empirique de la régression linéaire obtenue pour cette dernière dans avec le coefficient de corrélation, est donnée comme suit :

Pour le composite renforcé par des fibres industrielles **$YI = 0.817X + 1.342$**

Le coefficient de corrélation égal **$R^2 = 0.939$**

Pour le composite renforcé par des fibres recyclées **$YR = 0.977X + 1.787$**

Le coefficient de corrélation égal **$R^2 = 0.956$**

IV.5.9 Modes de rupture au cisaillement

Pour les spécimens sans fibres d'acier, la rupture fragile significative a pu être observée pour chaque spécimen. De minuscules fissures visibles sont apparues le long des sections de cisaillement immédiatement, puis la fracture s'est produite rapidement lorsque la charge a augmenté jusqu'à un certain point.

Pour les spécimens avec des fibres d'acier, la rupture ductile typique a pu être observée pour chaque spécimen. La première fissure fine visible est apparue lorsque la charge a augmenté jusqu'à une valeur maximale et elle a formé finalement une zone de rupture par cisaillement dans la section. Avec l'augmentation de la déformation par cisaillement, certaines fibres d'acier sont progressivement arrachées et déformées. Au cours de ce processus, nous remarquons que les éprouvettes de cisaillement n'ont pas été coupées en trois parties en raison de l'effet du pontage des fibres d'acier.



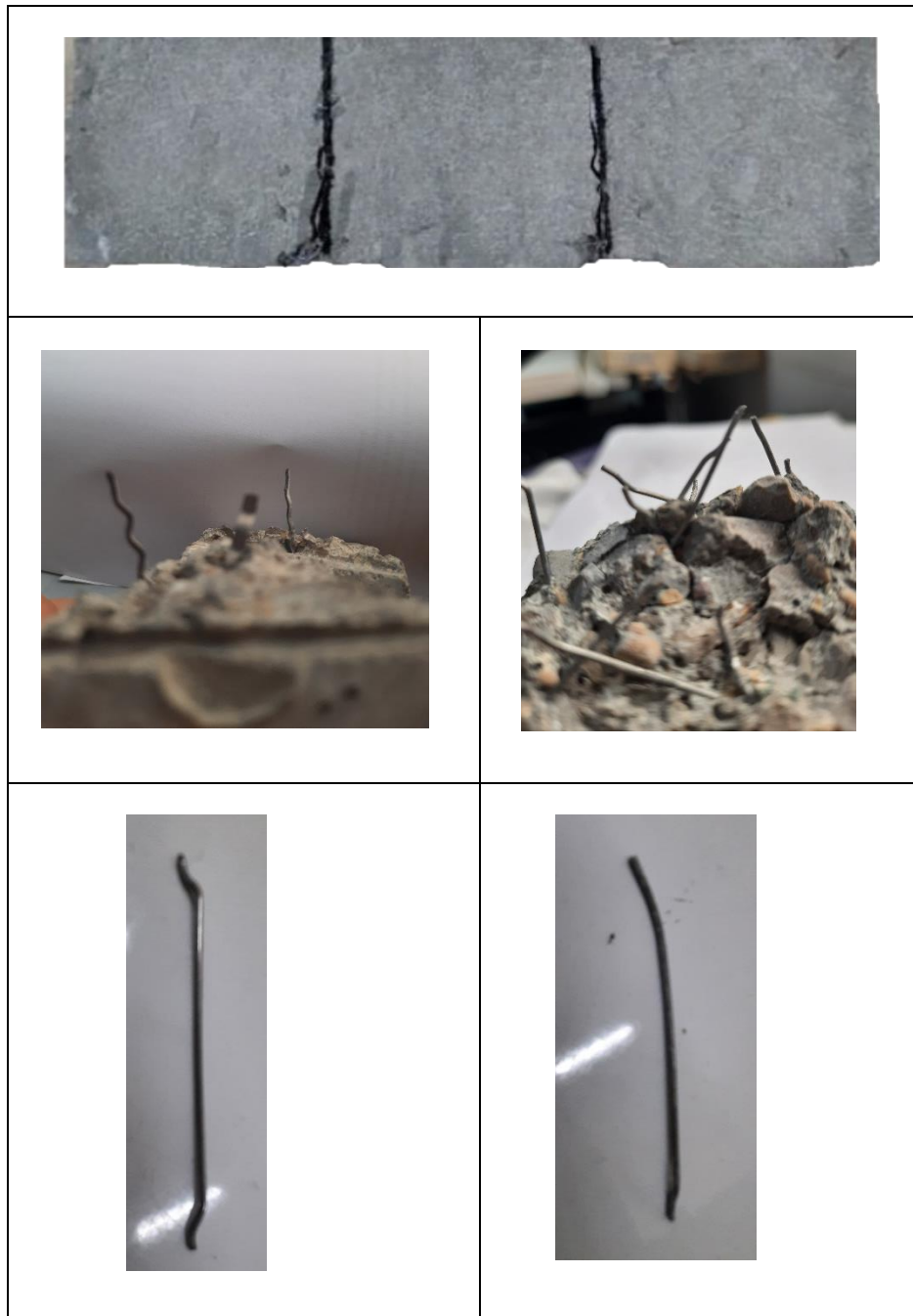


Figure IV-17 Modes de rupture des éprouvettes au cisaillement

IV.5.10 Résistance en flexion

Des essais de flexion 3 points ont été réalisés sur trois éprouvettes pour chaque type de fibre et pour les deux conceptions. La charge ultime et les flèches correspondantes sont données dans le Tableau 5. Les données présentées sont une moyenne de trois essais.

Tableau IV-5 Résultats des essais de flexion des différents composites

Type de béton	Type de fibres	% de fibres	Ft (MPa)	Variation par rapport au témoin %	Ecart type (%)	C-V %
CCO	0	0.0	5.05	0.00	0.36	7.129
CRA 0.5%	A	0.5	5.3	4.95	0.67	12.642
CRA 1%	A	1.0	7.32	44.95	0.52	7.104
CRA 1.5%	A	1.5	9.68	91.68	1.1	11.364
CRB 0.5%	B	0.5	6.06	20.00	0.43	7.096
CRB 1%	B	1.0	7.82	54.85	0.44	5.627
CRB1.5%	B	1.5	10.74	112.67	1.06	9.870
CRGFA 0.5%	A	0.5	5.13	1.58	0.33	6.433
CRGFA 1%	A	1.0	5.71	13.07	0.44	7.706
CRGFA 1.5%	A	1.5	7.47	47.92	0.53	7.095
CRGFB 0.5%	B	0.5	5.69	12.67	0.54	9.490
CRGFB 1%	B	1.0	6.69	32.48	0.64	9.567
CRGFB 1.5%	B	1.5	8.58	69.90	0.49	5.711

Les résultats obtenus montrent, à mesure que le rapport volumique des fibres d'acier augmente, la résistance à la flexion des deux types de composite renforcé de fibres d'acier continue aussi d'augmenter. Ce changement de résistance à la traction par flexion est similaire à celui de la résistance au cisaillement.

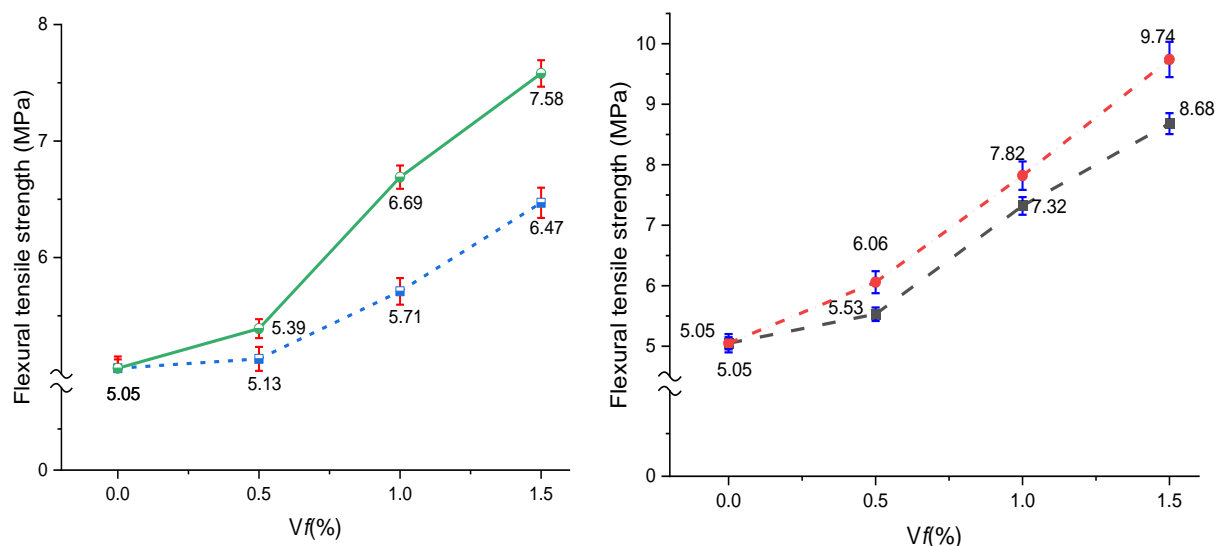


Figure IV-18 Evolution de la résistance en traction par flexion des composites renforcés sur en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres (a) les composites renforcés sur toute la section (b) les composites à gradient fonctionnel

La Figure 18, illustre la représentation graphique des résultats des essais de flexion de tous les mélanges, les effets de la fraction volumique et les deux types de fibres (fibres industrielles avec des crochets aux extrémités et fibres recyclées avec une forme ondulée dans les deux conceptions, l'une renforcée sur toute la section et l'autre seulement dans la zone de traction, nous substituons un gradient fonctionnel. L'CCO sans fibres d'acier a montré une résistance moyenne à la traction par flexion (ff_{CCO}) = 5.05 Mpa à 28 jours. Cependant, lorsque V_f atteint 1,5 %, la tendance à l'augmentation, légèrement différente des diverses formes de fibres d'acier, est de l'ordre de 1,12 % et 1,17 % pour les spécimens entièrement renforcés et fonctionnellement calibrés, respectivement. La pente des fibres recyclées est légèrement plus importante. Avec la valeur la plus élevée de (ff_{CR}) de 9.74 MPa et 5.58 Mpa pour CRB et CRGFB, respectivement. La valeur la plus basse de (ff_{CR}) est de 6.06 Mpa et 5.13 Mpa pour CRA et CRGFA, respectivement, lorsque $V_f = 0.5\%$.

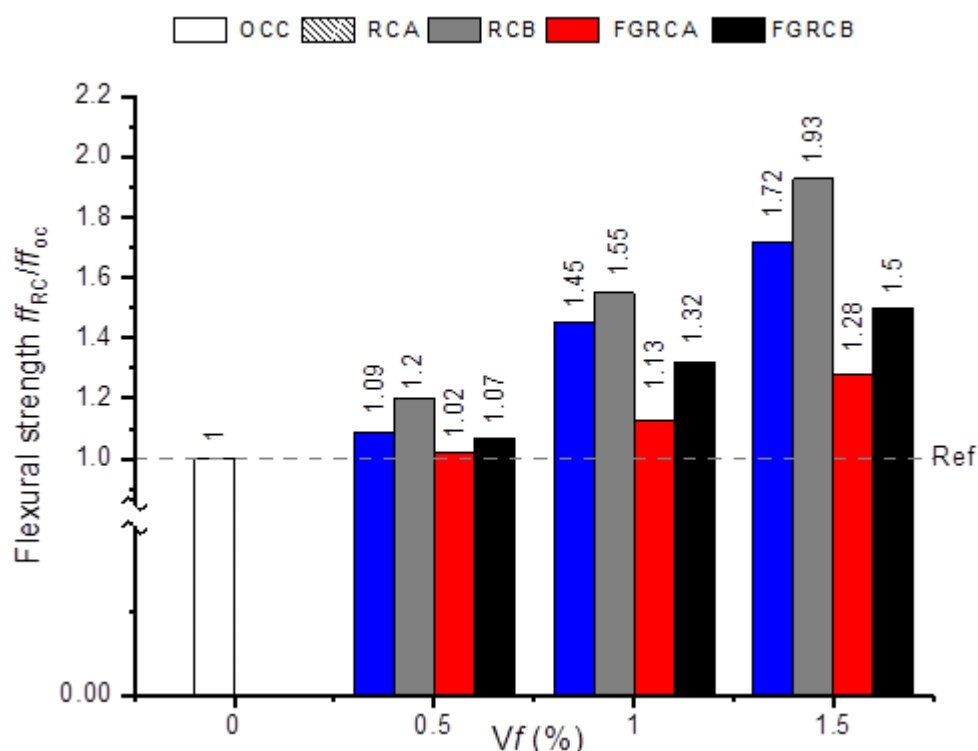


Figure IV-19 Relation entre le rapport ff_{RC}/ff_{OC} des composites renforcés sur toute la section et des composites à gradient fonctionnel en fonction de la fraction volumique des deux types de fibres et V_f (%)

La figure 19 montre la relation entre le rapport de la résistance à la traction par flexion pour différents composites (ff_{CR}/ff_{CCO}) et la variation de V_f des deux types de fibres d'acier utilisées dans cette étude. La charge maximale correspondante à mi-portée dans les essais de flexion au troisième point ou bien 3 points sur des prismes a été utilisée pour calculer la résistance à la traction par flexion (ff). Pour un composite à base de ciment, la résistance à (ff_{CR}) se situe en tête des caractéristiques les plus attendues. Les résultats (ff_{CR}/ff_{CCO}) sont également améliorés par l'ajout de fibres d'acier, comme dans les essais de cisaillement. En outre, elles ont amélioré de manière significative la ductilité de la matrice par rapport à l'CCO, ceci a été observé lorsque V_f a été augmenté de 0% à 1,5%. Ces résultats ont été également rapportés dans de nombreuses publications (Sahraei Moghadam et al., 2021).

Une amélioration du rapport (ff_{CR}/ff_{CCO}) qui a atteint sa valeur maximale lorsque $V_f = 1.5\%$, est observée à environ 93%, 72%, 50%, et 28% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement par rapport aux spécimens CCO sans fibres

d'acier. Lorsque $V_f = 1\%$. Nous observons également une amélioration du ratio (ff_{CR}/ff_{CCO}) d'environ 55%, 45%, 32%, et 13% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux échantillons CCO sans fibres d'acier. Lorsque $V_f = 0.5\%$, nous remarquons aussi une amélioration du ratio (ff_{CR}/ff_{CCO}) d'environ 20%, 09%, 07%, et 02% pour les composites CRB, CRA, CRGFB, et CRGFA, respectivement, par rapport aux spécimens CCO sans fibres d'acier. Les résultats montrent que les fibres de renforcement sont extrêmement utiles pour améliorer le rapport (ff_{CR}/ff_{CCO}). Les crochets aux deux extrémités des fibres d'acier industrielles et la forme déformée (ondulation) des fibres d'acier recyclées les rendent plus stables et assurent une meilleure liaison dans la matrice. Ces déformations empêchent le glissement et permettent une utilisation maximale de la force de traction. La même amélioration de (ff_{CR}) due au renforcement des fibres a été rapportée précédemment par (Khaloo et al., 2014 ; Singh et Rai, 2021). Comme pour l'essai de résistance au cisaillement, l'essai de flexion 3 points a permis d'observer l'effet significatif des fibres recyclées sur l'augmentation de la résistance à la traction en flexion.

Le grand avantage de cet ajout de fibres est qu'après la fissuration de la matrice, les fibres forment un pont des deux côtés de la fissure de flexion créée dans la zone de traction, portant les fissures et les empêchant de s'élargir. D'autre part, contrairement à la résistance à la compression, les résultats des tests prouvent que la résistance à la traction est significativement influencée par l'ajout de fibres et augmente d'environ 20% pour un $V_f = 0.5\%$. D'autres chercheurs ont rapporté des résultats similaires (Boulekbache et al., 2010 ; Mohammadi et al., 2008).

IV.5.11 Corrélation statistique

Dans cette section, une régression linéaire est effectuée entre les résultats expérimentaux. Les figures de corrélation montrent que la résistance en flexion offre une qualité de corrélation meilleure pour tous les types de composites.

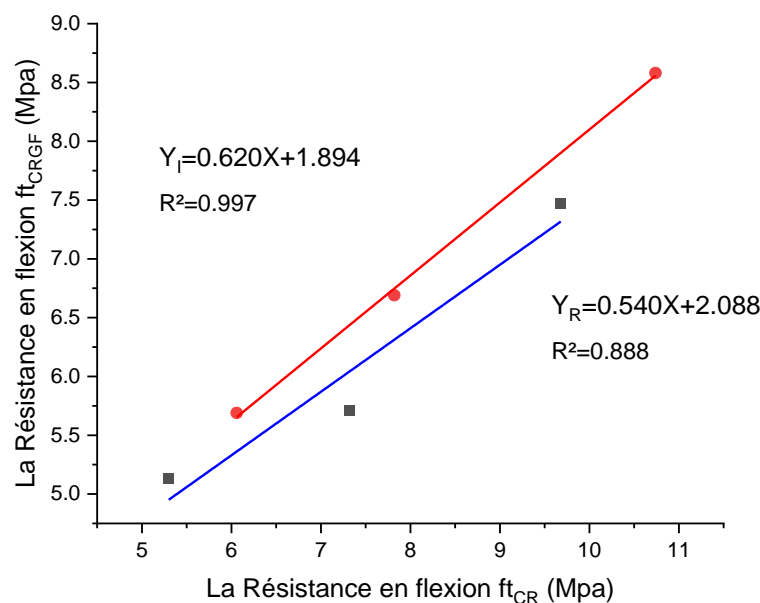


Figure IV-20 Relation entre la résistance à la flexion f_{fCR} et f_{fCRGF}

La corrélation entre la résistance en flexion f_{fCR} et f_{fCRGF} est fiable et offre une qualité de corrélation meilleure, l'équation empirique obtenue pour la résistance en flexion du composite avec le coefficient de corrélation, est donnée comme suit :

Pour le composite renforcé par des fibres industrielles $YI = 0.620X + 1.894$

Le coefficient de corrélation égal $R^2 = 0.997$

Pour le composite renforcé par des fibres recyclées $YR = 0.540X + 2.088$

Le coefficient de corrélation égal $R^2 = 0.888$

IV.5.12 Modes de rupture en flexion

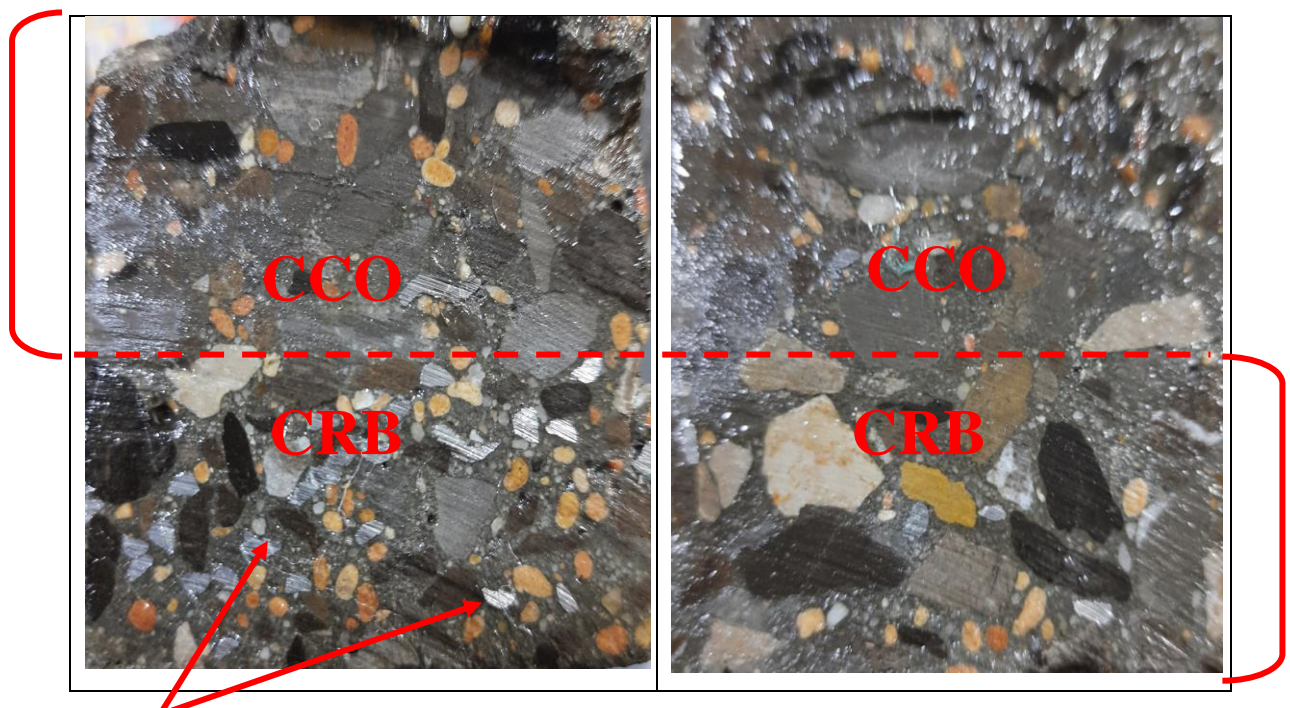
Une fois que le bas des éprouvettes du composite ordinaire CCO se fissure, cette fissure se dilate rapidement vers le haut des éprouvettes et le béton perd toute sa capacité portante. Avec l'ajout de fibres d'acier, la charge de la première fissuration du béton a fortement augmenté. Après la première fissuration, les éprouvettes étaient encore capables de supporter des charges importantes grâce à la liaison entre les fibres d'acier et le composite. Les fibres d'acier améliorent la ductilité et la ténacité du composite, puis changent son mode de rupture de fragile à élasto-plastique.



Figure IV-21 Modes de rupture des éprouvettes en flexion

IV.5.13 Les observations visuelles

La figure 22 présente des observations visuelles des faces transversales polies du composite cimentaire CRFG perpendiculairement à la direction d'extrusion. Comme on peut le constater, il n'y a pas de différences visibles à l'œil nu et aucune limite claire ne sépare les deux couches ; au contraire, le changement de matériau d'une couche à l'autre se fait sans discontinuité. Les fibres sont réparties et orientées de manière aléatoire dans la couche de fibres, de haut en bas, ce qui correspond à la direction de l'augmentation de la fraction volumique des fibres, ces distribution aléatoire dans la couche fibrée et son alignement parallèle montrent l'efficacité de la procédure de mélange et de fabrication. Les petits cercles et les pointes d'une section semi-sphérique sont tous deux des exemples de fibres de type A et B (industrielles) (recyclées), tandis que le sable et le gravier se trouvent dans les grandes taches. La matrice est la zone grise plus uniforme et continue. L'image montre clairement une augmentation du nombre de fibres de haut en bas. Chaque couche semble avoir une distribution aléatoire de fibres.



Fibre type -B

Composites CRGFB

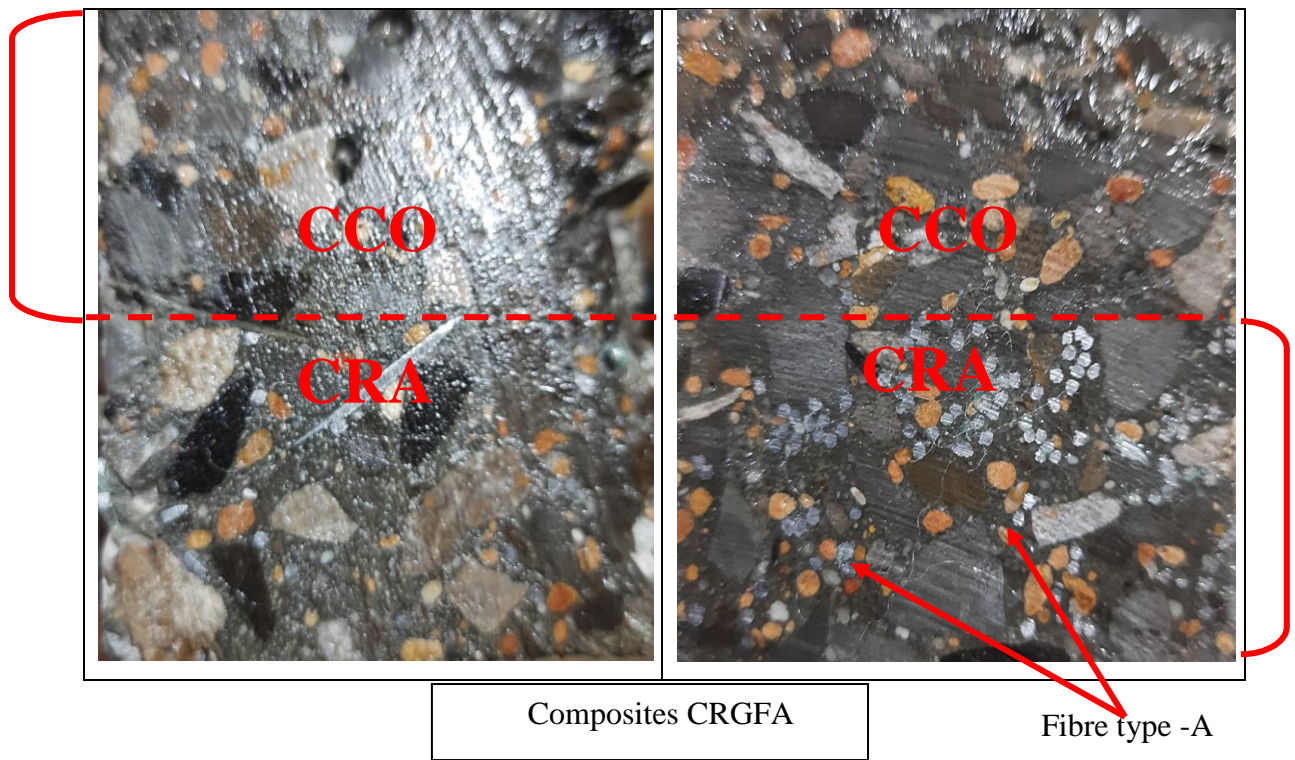


Figure IV-22 Observation visuelle des composites à gradient fonctionnel

IV.6 Influence hybridation des fibre (industrielles / recyclées) sur les comportements mécaniques

Les combinaisons de fibres hybrides les plus couramment utilisées sont constituées de fibres d'acier industrielles et recyclées. Récemment, les efforts de recherche ont augmenté vers l'étude du composite renforcé de fibres hybrides. Mais encore, les informations sont rares et doivent être validées en menant des recherches expérimentales rigoureuses. Compte tenu du potentiel de durabilité du composite fibré, les informations sur le comportement mécanique du composite renforcé de fibres d'acier hybrides sont essentielles. Cela peut aider à faire progresser l'application du composite renforcé de fibres d'acier hybrides en tant que matériaux structurels.

Quatre groupes des composites ont été produites. La conception du mélange de composite ordinaire a été sélectionnée à titre d'essai pour la résistance à la compression cubique de 35 MPa à 28 jours. Le rapport eau-ciment de 0,47 était constant pour tous les composites. Un mélange renforcé, 1 % de fibres d'acier industrielles, 1 % de fibres d'acier recyclées et 1% hybride a été utilisé séparément. Les doses de fibres ont été incorporées en fraction volumique du composite. La combinaison hybride de 1 % a été sélectionnée sur la base des résultats de performances mécaniques optimales précédents.

IV.6.1 Méthodes de test

Un total de quatre tests mécaniques principaux, (1) test de compression, (2) test de traction par fendage, (3) test de flexion et (4) test de cisaillement ont été effectués sur tous les composites à l'état durci. Les composites ont été testés conformément à la norme.

IV.6.2 Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance à la compression

Les effets de deux types de fibres d'acier seules (recyclée ou industrielle) ou hybrides sur la résistance cubique à la compression du composite sont illustrés sur la figure 23. Lorsque le rapport volumique des fibres est le même $V_f = 1 \%$, la résistance

cubique à la compression du composite des fibres d'acier industrielles est inférieure à celle des fibres d'acier recyclées.

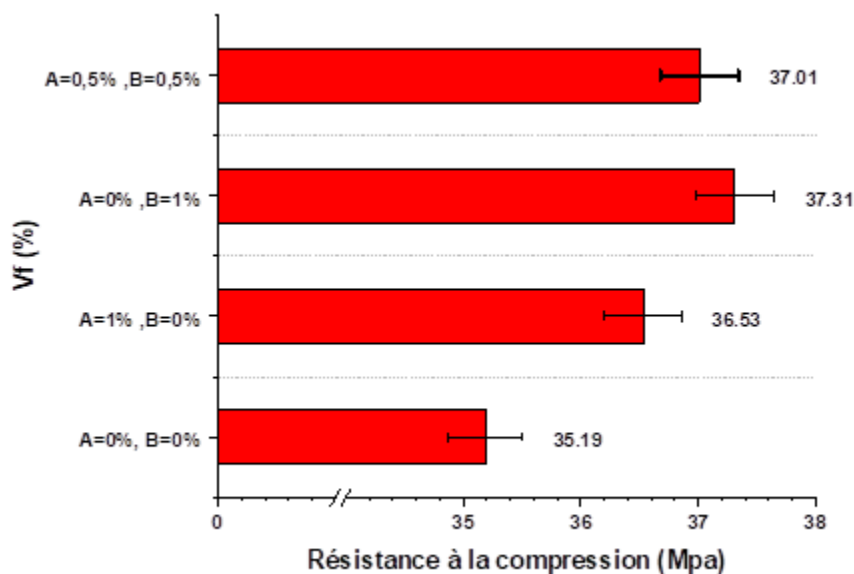


Figure IV-23 Relation entre la résistance à la compression en fonction de type de renfort

La résistance à la compression est la propriété la plus importante du composite cimentaire. La résistance cubique à la compression du composite des fibres d'acier industrielles est inférieure à celle des fibres d'acier recyclées. L'effet du renforcement des fibres sur la résistance à la compression dépend du type de fibre. Lorsque le rapport volumique des fibres est le même $V_f = 1\%$ de fibres acier seules a augmenté la résistance à la compression du CRA et du CRB de 3.80 et 6.02%, respectivement. L'effet positif ou l'effet négatif des fibres d'acier sur la résistance à la compression ont été rapportés dans des études antérieures. Song et Hwang (2004) ont remarqué une augmentation de la valeur de f_{cu} entre 7 % à 15 %. Abbass et al. (2018) ont montré que f_{cu} à 28 jours a marginalement augmenté de 2 % à 8 % lorsque les fibres d'acier ont été augmentées de $V_f = 0,5\% - 1,5\%$ respectivement.

Les fibres hybrides, les fibres recyclées et les fibres industrielles ont amélioré la résistance à la compression du composite de 5,17 % ; la rigidité axiale du composite hybride renforcé de fibres d'acier est toujours supérieure à celle du CCO ordinaire conventionnel. Des effets synergiques des fibres hybrides ont également été remarqués dans les résultats des tests de compression.

IV.6.3 Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance à la traction par fendage

Les effets de deux types de fibres d'acier seules (recyclée ou industrielle) ou hybrides sur la résistance à la traction par fendage du composite sont illustrés à la figure 24. Lorsque le rapport volumique des fibres est le même $V_f = 1\%$, la résistance cubique à la compression du composite de fibres d'acier industrielles est inférieure à celle des fibres d'acier recyclées.

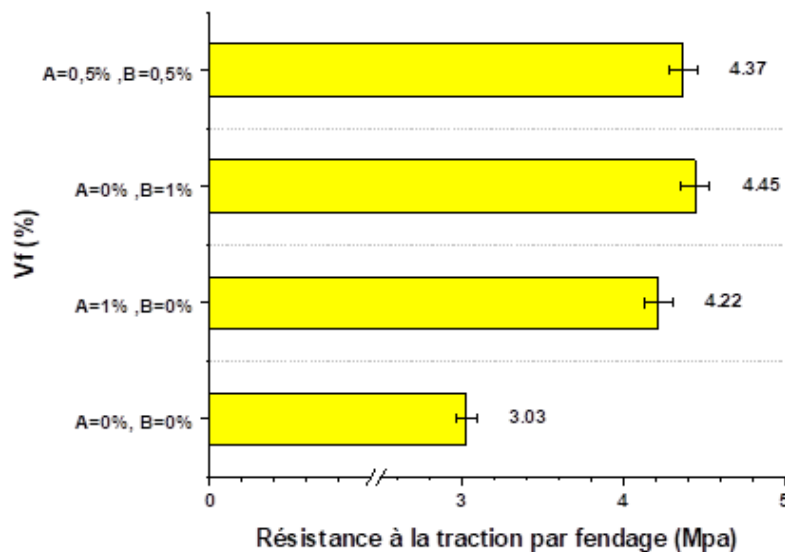


Figure IV-24 Relation entre la résistance à la traction par fendage en fonction de type de renfort

Le composite renforcé de fibres a montré une résistance à la traction par fendage supérieure par rapport au CCO ordinaire (témoin). La fibre recyclée provoque une augmentation significative de la résistance à la traction par fendage lorsqu'elle est utilisée seule comme renfort, elle peut fournir une meilleure résistance aux fissures lorsqu'elle est utilisée en conjonction avec des fibres industrielles. Les fibres hybrides ont montré des avantages synergiques. Par exemple, 1 % de fibres industrielles ou 1 % de fibres recyclées ont provoqué une augmentation d'environ 46.86 % et 39.27 % de la résistance à la traction par fendage par rapport à CCO ordinaire, respectivement. D'un point de vue analytique, la combinaison de fibres industrielles et de fibres recyclées à une fraction volumique de 1 % hybride (0,5 % fibres industrielles et 0,5 % fibres recyclées) a surpassé le CCO ordinaire et devrait donner une augmentation nette d'environ 44.22 %, cela a dépassé les avantages de l'utilisation de 1% de fibres

industrielles seules. On peut en conclure que l'utilisation des renforts 0,5 % de de fibres industrielles et 0.5 % de fibres recyclée montre des effets interactifs sur la résistance à la traction par fendage. Ce développement est le résultat d'une meilleure résistance à la fissuration car un mélange de formes et de diamètres améliore la capacité d'arrêt des fissures du composite ordinaire à différentes largeurs de fissures. Il convient de mentionner ici l'efficacité des fibres recyclées et hybrides.

IV.6.4 Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion de chaque composite est illustrée sur la Figure 25. Il a été calculé à partir de la charge maximale subie par chaque composite lors de l'essai de flexion. L'ajout de fibres a montré des résultats prometteurs concernant l'amélioration de la résistance à la flexion du CRA, CRB et du CRAB.

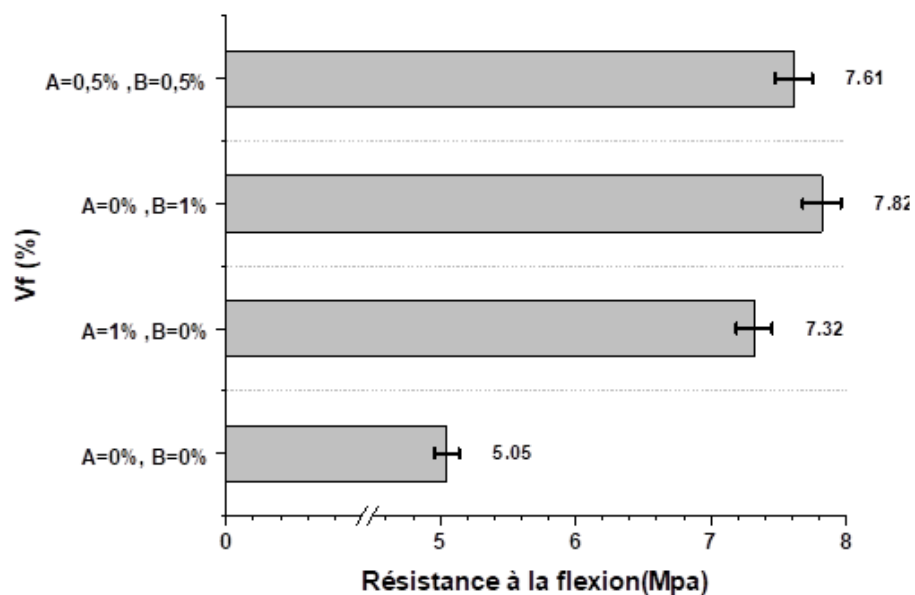


Figure IV-25 Relation entre la résistance à la flexion en fonction de type de renfort

L'ajout de 1 % de fibres recyclées seules ou de 1 % de fibres industrielles seules a amélioré la résistance à la flexion du composite renforcé de 54.85 % et 44.95 %, respectivement. Encore une fois, les fibres recyclées ont montré une efficacité plus

élevée que les fibres industrielles. La fibre recyclée avait l'avantage d'une résistance à la traction et d'une rigidité élevée par rapport à la fibre industrielle. De plus, l'efficacité du renforcement fibreux est élevée dans les composites CRB. Par rapport au CCO, des améliorations nettes plus élevées ont été observées en raison de l'ajout de fibres dans le CRA au même volume de fibres. Une bonne performance de liaison des fibres dans les fibres recyclées par rapport à celle de la fibre industrielle. Ces résultats ont montré que les propriétés de traction du composite peuvent être améliorées avec l'ajout de fibres.

Les contributions nettes dues aux fibres hybrides sont supérieures à la contribution individuelle des fibres industrielles. Le composite renforcé de fibres hybrides a une résistance plus élevée contre la défaillance/rupture car une large gamme de formes et de diamètres de fibres offre un bon contrôle sur les petites et grandes ouvertures de fissures.

IV.6.5 Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance au cisaillement

Les composites CCO, CRA, CRB et CRAB sont présentés sur la Figure 26. Après avoir analysé les échantillons testés dans chaque catégorie. Nous remarquons que la présence de 1 % de fibre d'acier s'est avérée très efficace pour améliorer la résistance au cisaillement.

Les deux fibres d'acier ont été très efficaces pour améliorer les performances en cisaillement, encore une fois, la longueur et la forme de la fibre d'acier, conduisent à un renforcement excessif de l'adhérence et à une fracture consécutive de la fibre lors de fortes déflexions de cisaillement. Les charges de pointe moyennes enregistrées pour les différents composites ont été converties en résistance au cisaillement

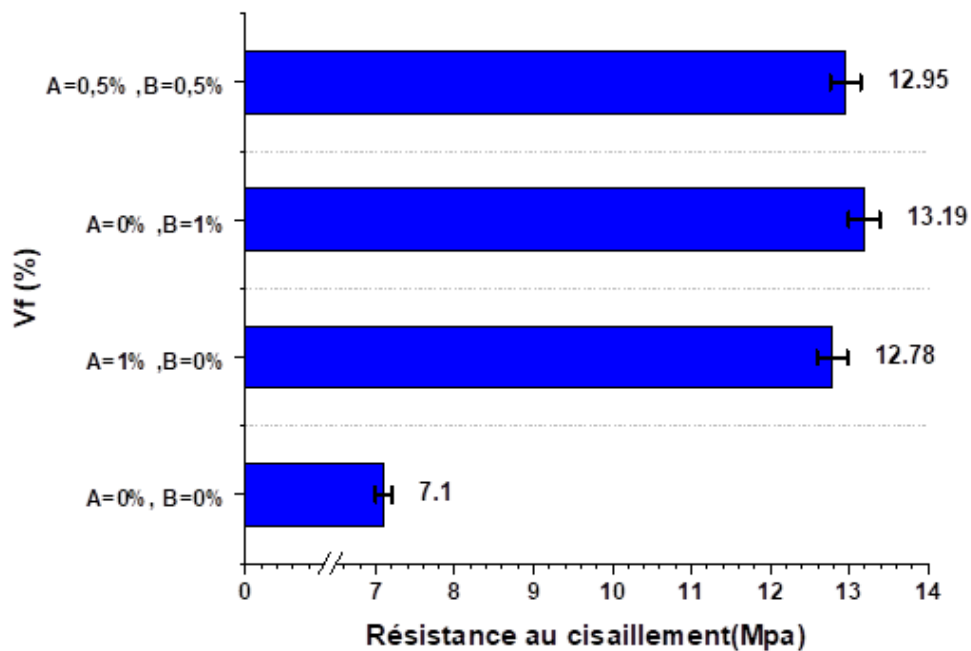


Figure IV-26 Relation entre la résistance au cisaillement en fonction de type de renfort

De plus, dans les mélanges renforcés avec une seule fibre, la fibre recyclée était significativement meilleure et semble être plus efficace en cisaillement que la fibre industrielle.

Comme on peut le voir sur la Figure 26 il y a eu une amélioration de la résistance au cisaillement par l'hybridation de fibres recyclées à 0,5 % de fraction volumique avec des fibres industrielles à 0,5 % de fraction volumique. Ces fibres ont amélioré la résistance au cisaillement plus lorsqu'elles sont hybridées que lorsqu'elles sont seules (avec fibre industrielle). L'hybridation avec des fibres supplémentaires peut encore modifier l'efficacité des fibres en fonction du type de chargement.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux des tests réalisés sur les composites fibrés et sans fibres. D'après les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Cette étude est essentielle dans le cadre du développement d'un composite pour l'industrie et les applications structurelles. Ces composites ont été comparés à un composite ordinaire, à un composite à fibres industrielles et à un composite avec fibres recyclées.

L'affaissement du composite fibré est beaucoup plus influencé par la fraction volumique des fibres et le type de fibres, il a fallu ainsi augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire jusqu'à l'obtention d'un mélange plus maniable et ouvrable.

Les résultats expérimentaux ont montré que le remplacement partiel ou entière des fibres d'acier industrielles par des fibres recyclées n'affecte pas de manière remarquable la résistance mécanique.

Nous avons étudié aussi le comportement mécanique (résistance à la compression, résistance à la traction par fendage et par flexion, résistance à la flexion et résistance au cisaillement) et l'UPV du composite avec renfort industriels ou recyclés seule sur les deux conceptions renforcées sur la section entière ou renforcées uniquement dans la zone de traction MGF.

Il est possible développée des relations empiriques pour établir des régressions statistiques permettent également de combiner les valeurs de chaque résistance mécanique.

Nous estimons généralement que toutes les résistances mécaniques : soit à la traction par flexion, à la traction par fendage et au cisaillement sont meilleures pour un composite renforcé sur la section entière ou renforcé uniquement dans la zone de traction que pour un composite ordinaire.

Table des Matières

Table des Matières

Remerciements.....	I
ملخص	II
Résumé	III
Abstract	IV
Liste des Notations.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	XI
CHAPITRE I.....	1
I.1 Introduction	2
I.2 Généralités sur les matériaux composites	3
I.2.1 Les composants élémentaires des matériaux composites.....	3
I.2.2 La conception des matériaux composites :	6
I.2.3 Avantages du matériau composite :	8
I.2.4 Inconvénients du matériau composite :	9
I.3 Généralités sur le béton renforcé de fibres.....	10
I.3.1 Histoire	13
I.3.2 Types et propriétés des fibres	16
I.3.3 Caractéristiques à l'état frais.....	28
I.3.4 Amélioration des caractéristiques mécaniques	29
I.3.5 Fabrication des fibres : cas des fibres d'acier	37
I.3.6 Utilisation et influence de l'hybridation des fibres :	40
I.4 Généralités sur les matériaux à gradient fonctionnel	42
I.4.1 Historique	43
I.4.2 Application de la technologie du FGM en génie civil	45
I.4.3 Le Béton à gradient fonctionnel.....	45
I.4.4 Technologie de coulage des MGF	47
I.5 Conclusion de l'étude bibliographique.....	52
CHAPITRE II	53
CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET PROTOCOLES D'ESSAIS	
II.1 Introduction :	54
II.2 Programme expérimental :	54
II.3 Normes :	55
II.4 Caractéristiques des matériaux	56
II.4.1 Ciment :	56
II.4.2 L'adjuvant.....	58
II.4.3 L'eau.....	58
II.4.4 Les granulats.....	58
II.4.5 Les graviers.....	58
II.4.6 Le sable.....	59
II.4.7 Les fibres	60
II.5 Formulations, fabrication et conservation des éprouvettes	62
II.6 Essais réalisés à l'état frais	68
II.6.1 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams.....	68
II.7 Essais physiques	68
II.7.1 Essais d'absorption d'eau	68
II.7.2 Essais d'absorption d'eau par immersion	68
II.8 Essais mécaniques	69

II.8.1	Mesure par essais non destructifs	69
II.8.2	Mesure par essais destructifs	71
II.9	Conclusion	76
CHAPITRE III		77
CARACTERISATION ET FABRICATION DES FIBRES RECYCLEES		77
III.1	Introduction	78
III.2	La méthode de fabrication des fibres d'acier recyclées	78
III.3	Processus technologique :	80
III.4	Caractérisation des fibres recyclées	81
III.4.1	Caractérisation chimique	81
III.4.2	Caractérisation géométrique	82
III.4.3	Caractérisation mécanique	83
III.4.3.1	Essai de traction	83
III.5	Conclusion	87
CHAPITRE IV		88
IV.1	Introduction	89
IV.2	Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les propriétés à l'état frais des composites	90
IV.2.1	Test d'affaissement	90
IV.3	Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur la durabilité des composites	91
IV.3.1	Absorption d'eau par immersion	91
IV.4	Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les essais non destructifs	93
IV.4.1	La vitesse de propagation des impulsions des ultrasons	93
IV.4.2	Corrélation statistique	96
IV.5	Influence de type, Vf % de fibre et le mode de conception sur les propriétés mécaniques à l'état durci (essais destructifs)	98
IV.5.1	Résistance en compression	98
IV.5.2	Corrélation statistique	102
IV.5.3	Modes de rupture en compression :	102
IV.5.4	Résistance à la traction par fendage	104
IV.5.5	Corrélation statistique	107
IV.5.6	Modes de rupture à la traction par fendage	108
IV.5.7	Résistance au cisaillement direct	110
IV.5.8	Corrélation statistique	113
IV.5.9	Modes de rupture au cisaillement	114
IV.5.10	Résistance en flexion	116
IV.5.11	Corrélation statistique	119
IV.5.12	Modes de rupture en flexion	120
IV.5.13	Les observations visuelles	122
IV.6	Influence hybridation des fibre (industrielles / recyclées) sur les comportements mécaniques	124
IV.6.1	Méthodes de test	124
IV.6.2	Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance à la compression	124
IV.6.3	Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance à la traction par fendage	126
IV.6.4	Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance à la traction par flexion	127
IV.6.5	Influence hybridation des fibres (recyclée/ industrielle) sur la résistance au cisaillement	128

IV.7 Conclusion	130
CONCLUSION GENERALE	131
PERSPECTIVES	135
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	136
TABLE DES MATIERES	147

Références Bibliographiques

A

- A. Channa et A. Saand, « Comportement mécanique du béton armé avec des déchets de bandes d'aluminium », *Civ. Ing. J.*, vol. 7, non. 7, Art. non. 7, juillet 2021, doi : 10.28991/cej-2021-03091718
- Abadel, H. Abbas, T. Almusallam, Y. Al-Salloum et N. Siddiqui, « Propriétés mécaniques du béton hybride renforcé de fibres – modélisation analytique et comportement expérimental », *Mag. concr. Rés.*, vol. 68, non. 16, p. 823–843, 2016.
- ACI-544.4R-88. (1994). Considérations de conception pour le béton armé de fibres d'acier.
- Allen H. G., *Analysis and design of structural sandwich panels*, Pergamon Press, London, U.K. 1961.
- ASTM Standards, Comité ASTM, C-9(1992) 514-20
- Aucher, J. (2009). Etude comparative du comportement composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable (Thèse de doctorat, INSA de Rouen).
- Aylie, H., Gan, BS, As'ad, S. et Pratama, MMA (2015). Étude paramétrique de la capacité de charge du béton fonctionnellement classé des éléments de flexion. *Journal international de l'ingénierie et de l'innovation technologique*, 5 (4).
-

B

- B. Ali, R. Kurda, H. Ahmed et R. Alyousef, "Effet de la fibre d'acier de pneu recyclé sur la ténacité à la flexion, la résistance résiduelle et la perméabilité au chlorure du béton haute performance (HPC)", *J. Sustain. Cem.-Based Mater.*, pp. 1–17, janvier 2022, doi :
- B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk et S. Amziane, « Influence de la limite d'élasticité et de la résistance à la compression sur le comportement au cisaillement direct du béton renforcé de fibres d'acier », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 27, non. 1, pp. 6–14, février 2012, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.015.
- B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk et S. Amziane, « La fluidité du béton fibré et son effet sur les propriétés mécaniques du matériau », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 24, non. 9, p. 1664–1671, 2010.
- B. BSI, '12390-1 (2012) Essais sur béton durci. Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences pour les spécimens et les moules », *Br. Supporter. Inst. BSI Londres. Royaume-Uni*, 2012.
- B. Hassiba, M. Mekki et R. Fraid, «La relation entre la résistance à la compression et le béton à vitesse d'impulsion ultrasonique avec des fibres exposées à des températures élevées», *Int. J. Energ.*, vol. 3, non. 1, p. 31–36, 2018.
- B. Norme, « Norme BS EN 12390-3 : 2002 », n° août 2003.
- B.S. EN, '12390-5. Essais du béton durci – Partie 5 : résistance à la flexion des éprouvettes »,
- Bajaj, K., Shrivastava, Y. et Dhoke, P. (2013). Etude expérimentale d'une poutre graduée fonctionnellement avec des cendres volantes.

- Journal de l'Institution of Engineers (Inde) : Série A , 94 (4), 219-227.
- Balaguru, P. N. et Shah, S. P. (1992). "Composites de ciment renforcés par des fibres". McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.
- Banfill, PF (2003, mai). La rhéologie du ciment frais et du béton - une revue. Dans Actes du 11e congrès international de chimie du ciment (Vol. 1, pp. 50-62).
- Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J. et Bindiganaville, V. (2014). Synergie des fibres dans le béton renforcé de fibres hybrides (HyFRC) en flexion et en cisaillement direct. Composites de ciment et de béton , 48 , 91-97.
- Bernadi, M., Bley, H., Schmitt, B. et Zenner, C. (2003, mars). Planification de l'assemblage de mini et micro-produits améliorée par un modèle de produit et de processus intégré. Dans le séminaire international d'assemblage de précision (IPAS). Bad Hofgastein, Autriche (Vol. 1719, p. 3138Bickford).
- BISKRIA CIMENT'. <https://biskriaciment.com/Nos-Produits.aspx> (consulté le 26 janvier 2022).
- Błaszczczyński, T., et Przybylska-Fałek, M. (2015). Le béton armé de fibres d'acier en tant que a Structural Material. Procedia Engineering, 122, 282-289.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2009). Influence de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques. European journal of environmental and civil engineering, 13(4), 473-488.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2012). Influence de la limite d'élasticité et de la résistance à la compression sur le comportement au cisaillement direct du béton renforcé de fibres d'acier. Construction et matériaux de construction , 27 (1), 6-14.
- Br. Supporter. Inst.-BSI CEN Eur. Comm. Stand., 2009.
- Brandt, AM, Olek, J., Glinicki, MA et Leung, CKY (2012). M. MAALEJ', ST QUEK*, J. ZHANG", et VWJ LIN. Brittle Matrix Composites 10 , 335.
-

C

- C 1018. Méthode d'essai normalisée pour la résistance à la flexion et la résistance à la première fissure du béton renforcé par des fibres (à l'aide d'une rame avec chargement en trois points). Fibre-Reinforced Concrete (Using Ream with Third-Point Loading), Annual Book of
- C. Astm, '597, Méthode d'essai standard pour la vitesse d'impulsion à travers le béton', ASTM Int. West Conshohocken PA, 2009.
- C. D. Johnston, F.-R. Ciments et G. Béton, « Breach Science Publishers », Amst. Pays-Bas, 2001.
- C. Lakavath, S. Suriya Prakash et S. Dirar, «Études expérimentales et numériques sur le comportement au cisaillement des poutres en

- béton précontraint renforcées de fibres macro-synthétiques», *Constr. Construire. Mater.*, vol. 291, p. 123313, juillet 2021, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.123313.
- Chang, C., Chen, W., Chen, Y., Chen, Y., Chen, Y., Ding, F., ... & Liu, Z. (2021). Progrès récents sur les matériaux bidimensionnels. *Acta Phys.-Chim. Sin* , 37 (12), 2108017.
- Comportements physico-mécaniques et durabilité du béton fibré chauffé | Benali | Revue de Génie Civil ». <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/2905> (consulté le 26 janvier 2022).
- Craig A. Steeves, Norman A. Fleck, Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling, *International Journal of Mechanical Sciences* 46 (2004) 585–608.
- Cucchiara, C., La Mendola, L., & Papia, M. (2004). Efficacité des étriers et des fibres d'acier comme armature de cisaillement. *Composites ciment et béton* , 26 (7), 777-786.
- Cuenca, E., & Ferrara, L. (2020). Paramètres de ténacité à la rupture pour évaluer la capacité de cicatrisation des fissures du béton fibré sous des cycles répétés de fissuration-cicatrisation. *Mécanique théorique et appliquée de la rupture* , 106 , 102468.
-

D

- D. MA Ismail, « Résistance à la compression et à la traction des composites à base de ciment renforcés de fibres naturelles », *Al-Rafidain Eng. J. AREJ*, vol. 15, non. 2, p. 42–51, 2007.
- Denarié, E., J. Silfwerbrand et H. Beushausen (2011). Revêtements en matériaux à base de ciment collé pour la réparation,
- Djebbloun, Y. (2004). Etude de la rupture en mode I d'ouverture des matériaux composites (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
-

E

- E. A. Whitehurst, « Soniscope teste les structures en béton », dans *Journal Proceedings*, 1951, vol. 47, non. 2, p. 433–444.
- E. Awwad, M. Mabsout, B. Hamad, M. T. Farran et H. Khatib, « Études sur le béton renforcé de fibres utilisant des fibres de chanvre industrielles », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 35, p. 710–717, 2012.
- E. CSN, '12504-4 (2005) Testing concrete-Part 4: Determination of ultrasonic pulse speed', *Czech Stand. Inst. Prague*.
- E. Naaman, « Fibres d'acier d'ingénierie aux propriétés optimales pour le renforcement des composites de ciment », *J. Adv. concr. Technol.*, vol. 1, non. 3, p. 241–252, 2003.

F

- F. Aslani et S. Nejadi, « Béton autoplaçant incorporant des fibres d'acier et de polypropylène : résistances à la compression et à la traction, modules d'élasticité et de rupture, courbe contrainte-déformation en compression et énergie dissipée sous compression », *Compos. Partie B Eng.*, vol. 53, pp. 121–133, oct. 2013, doi : 10.1016/j.compositesb.2013.04.044.
- F. Omidinasab, S. Moazami Goodarzi et A. Sahraei Moghadam, « Caractérisation et optimisation des propriétés mécaniques et d'impact du béton recyclé renforcé de fibres d'acier », *Int. J. Civil. Eng.*, vol. 20, non. 1, p. 41–55, janvier 2022, doi : 10.1007/s40999-021-00656-2.
- F. Vogel, O. Holčapek, M. Jogl, K. Kolář et P. Konvalinka, « Développement des propriétés mécaniques du béton à haute résistance renforcé de fibres d'acier », dans *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1077, p. 113–117.
- Fischer, G., & Li, VC (2007). Effet du renforcement des fibres sur la réponse des éléments structuraux. *Ingénierie de la mécanique des fractures*, 74 (1-2), 258-272.
- Fritih, Y. (2009). Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA).

G

- G. Centonze, M. Leone et M. A. Aiello, « Fibres d'acier provenant de pneus usés comme renforcement dans le béton : une caractérisation mécanique », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 36, p. 46–57, 2012.
- Goli, E., & Kazemi, MT (2014). Modélisation XFEM de la mécanique de la rupture dans les FGM transversalement isotropes via la méthode intégrale d'interaction. *Science des matériaux Procedia*, 3, 1257-1262.
- Gopalaratnam, VS, & Shah, SP (1987). Rupture en traction d'un mortier renforcé de fibres d'acier. *Journal d'ingénierie mécanique*, 113 (5), 635-652.
- Greer, MJA (1996). L'effet de la teneur en humidité et de la composition sur la résistance à la compression et la rigidité de l'épi fabriqué à partir du sol des mesures de la brèche près de Teignmouth, Devon.

H

- H. K. Hussain, M. S. Zewair et M. A. Ahmed, « Poutres en béton à haute résistance renforcées de fibres d'acier à crochets sous torsion pure », *Civ. Ing. J.*, vol. 8, non. 1, Art. non. 1, janv. 2022, doi : 10.28991/CEJ-2022-08-01-07.

- Hami, B. (2018). Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure sandwich multicouches (Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Département Génie).
- Hannant, DJ (1974). NOMOGRAMMES DE RUPTURE DU BÉTON SOUMIS À DES CONTRAINTES MULTI-AXIALES À COURT TERME. Ingénieur structure , 52 (5).
- Havlikova et al., « Effet du type de fibre dans le béton sur l'initiation des fissures », dans Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 769, p. 308–311.
-

J

- J. Domski, « Moment de fissuration dans des poutres en béton renforcé de fibres d'acier à base de déchets de sable », Ovidius Univ. Ann. Constantza Ser. Civ. Ing., non. 13, p. 29, 2011.
- J. Katzer et J. Domski, "Qualité et propriétés mécaniques des fibres d'acier d'ingénierie utilisées comme renfort pour le béton", Constr. Construire. Mater., vol. 34, p. 243–248, 2012.
- J. Katzer, « Fibres d'acier et béton renforcé de fibres d'acier dans le génie civil », Pac. J. Sci. Technol., vol. 7, non. 1, p. 53–58, 2006.
- J. Roesler, G. Paulino, C. Gaedicke, A. Bordelon et K. Park, « Comportement à la rupture des matériaux en béton à gradient fonctionnel pour les chaussées rigides », Transp. Rés. Rec., vol. 2037, non. 1, p. 40–49, 2007.
- Jansson, Effets des fibres d'acier sur la fissuration du béton armé. Chalmers Tekniska Hogskola (Suède), 2011.
- JSCE-SF6, Société japonaise des ingénieurs civils. (1990). Méthode d'essai pour la résistance au cisaillement du béton renforcé de fibres d'acier. Tōkyō ; p. 67–9.'
-

K

- K. H. Khayat, F. Kassimi et P. Ghoddousi, « Conception et essai de mélange de béton autoconsolidant renforcé de fibres », ACI Mater. J., vol. 111, non. 2, p. 143, 2014.
- K. H. Mo, S. P. Yap, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat et C. H. Bu, 'Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete', Constr. Construire. Mater., vol. 50, pp. 499–507, janvier 2014, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.016.
- Kaskas, S. (2010). Etude de l'effet du cisaillement transversal sur le comportement mécanique des poutres composites. le revêtement ou le renforcement des dalles ou des chaussées.
- Khaloo, E. Molaei Raisi, P. Hosseini et H. Tahsiri, « Performances mécaniques du béton autoplaçant renforcé de fibres d'acier », Constr. Construire. Mater., vol. 51, pp. 179–186, janvier 2014, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054.
-

L

- L. Domagała, "Modification des propriétés du béton léger structural à fibres d'acier", *J. Civ. Ing. Gestion*, vol. 17, non. 1, p. 36–44, 2011.
- L. Li, R. Zhang, L. Jin, X. Du, J. Wu et W. Duan, « Étude expérimentale sur le comportement en compression dynamique du béton renforcé de fibres d'acier à des températures élevées », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 210, pp. 673–684, juin 2019, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.138.
- L. Lourenço, Z. Zamanzadeh, J. A. Barros et M. Rezazadeh, « Renforcement au cisaillement des poutres RC avec des panneaux minces de mortier renforcés de fibres d'acier recyclées », *J. Clean. Prod.*, vol. 194, p. 112–126, 2018.
- Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK, Institut de la conception et de la construction de structures légères
-

M

- M. B. Bever et P. E. Duwez, « Gradients in composite materials », *Mater. Sci. Eng.*, vol. 10, p. 1–8, 1972.
- M. Nili et V. Afroughsabet, « Les effets des fumées de silice et des fibres de polypropylène sur la résistance aux chocs et les propriétés mécaniques du béton », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 24, non. 6, p. 927–933, 2010.
- M. Nili et V. Afroughsabet, « Les propriétés de résistance à la compression et de durabilité à long terme du béton renforcé de fibres de fumée de silice », *Mater. Sci. Ing. A*, vol. 531, p. 107–111, 2012.
- M. Pająk et T. Ponikiewski, « Comportement en flexion du béton autoplaçant renforcé avec différents types de fibres d'acier », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 47, p. 397–408, 2013.
- M. T. Kazemi, H. Golsorkhtabar, M. H. A. Beygi et M. Gholamitabar, « Propriétés de rupture du béton à haute résistance renforcé de fibres d'acier à l'aide de méthodes de fracture et d'effet de taille », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 142, p. 482–489, 2017.
- M. Zeyad, « Effet des méthodes de durcissement par temps chaud sur les propriétés des bétons à haute résistance », *J. King Saud Univ.-Eng. Sci.*, vol. 31, non. 3, p. 218–223, 2019.
- Maidl BR, Béton renforcé de fibres d'acier. Berlin, Allemagne : Ernst & Sohn', 1995.
- Mansur, MA, Chin, MS et Wee, TH (1999). Relation contrainte-déformation du béton fibré à haute résistance en compression. *Revue des matériaux en génie civil*, 11 (1), 21-29.
- Mindess, S. (2007, juin). Trente ans de recherche sur le béton renforcé de fibres à l'Université de la Colombie-Britannique. Dans *Conférence internationale sur les matériaux et technologies de construction durables* (pp. 259-268).
- Mirsayah, AA, & Banthia, N. (2002). Résistance au cisaillement du béton renforcé de fibres d'acier. *Journal des matériaux*, 99 (5), 473-479.

Monteiro, PJ et Kurtis, KE (2008). Analyse expérimentale asymptotique de la dilatation du béton exposé à l'attaque des sulfates. *Journal des matériaux ACI*, 105 (1), 62.

N

- N. Banthia, F. Majdzadeh, J. Wu et V. Bindiganaville, "Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear", *Cem. concr. Compos.*, vol. 48, p. 91–97, 2014.
- N. K. Singh et B. Rai, « Évaluation de l'effet synergique sur les propriétés microscopiques et mécaniques du béton renforcé de fibres hybrides acier-polypropylène », *Struct. Concr.*, vol. 22, non. 1, pp. 516–534, février 2021, doi : 10.1002/suco.201900166.
- N. Prasad et G. Murali, « Exploration des performances d'impact du béton de granulats préplacés à gradation fonctionnelle incorporant des fibres d'acier et de polypropylène », *J. Build. Eng.*, vol. 35, p. 102077, mars 2021, doi : 10.1016/j.jobbe.2020.102077.
- N. Spinella, « Résistance au cisaillement des poutres en béton armé de fibres d'acier à grande échelle sans étriers », *Comput Concr*, vol. 11, non. 5, p. 365–382, 2013.
- Naaman, AE, Fischer, G., & Krstulovic-Opara, N. (2007). *Mesure des propriétés de traction du béton renforcé de fibres : projet soumis au comité ACI 544. Composites de ciment renforcé de fibres à haute performance (HPFRCC5)*, Mayence, Allemagne, 3-9.
- NF EN 12390-1, *Essais pour béton durci, Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules*, AFNOR, France, 2012.
- NF EN 12390-2, *Essais pour béton durci, Partie : 2 confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance* AFNOR, France, 2012.
- NF EN 12390-3, *Essais pour béton durci, Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes*, AFNOR, France, 2012.
- NF P18-404, *Bétons - Essais d'étude, de convenue et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes*, AFNOR, France, 1981.
- NF P18-405, *Bétons - Essai d'information - Confection et conservation des éprouvettes*, AFNOR, France, 1981.
- Nunes, NL, & Agopyan, V. (1998). *Étude de l'influence de la géométrie des fibres d'acier sur la résistance à la flexion des composites à matrice de béton*.
-

O

- O. Río, V. D. Nguyen et K. Nguyen, « Exploration du potentiel du SCC à gradation fonctionnelle pour développer des solutions concrètes durables », *J. Adv. concr. Technol.*, vol. 13, non. 3, p. 193–204, 2015.
-

P

Paultre, P. (2011). Structures en béton armé : analyse et dimensionnement .
Presses inter Polytechnique.

R

- R. Chan, X. Liu et I. Galobardes, « Étude paramétrique de bétons à gradient fonctionnel incorporant des fibres d'acier et des granulats recyclés », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 242, p. 118186, mai 2020, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2020.118186.
- R. Demirboğa, ©. Türkmen et M. B. Karakoc, « Relation entre la vitesse des ultrasons et la résistance à la compression pour le béton mélangé à des minéraux à haut volume », *Cem. concr. Rés.*, vol. 34, non. 12, p. 2329–2336, 2004.
- Reddy, J. (1997). Sur des éléments finis de poutres déformables en cisaillement sans blocage. *Méthodes informatiques en mécanique appliquée et ingénierie* , 149 (1-4), 113-132.
- Rilem, TC (2002). 162-TDF, "Recommandations du RILEM TC 162-TDF : Méthodes d'essai et de conception pour le béton renforcé de fibres d'acier : essai de flexion". *Mater. Structure* , 35 (253), 579-582.
-

S

- S. Djebali, Y. Bouafia, D. Atlaoui et A. Bilek, « Étude du comportement mécanique des copeaux de béton armé », *Adv. Mater. Rés.*, vol. 324, pp. 360–363, 2011, doi : 10.4028/www.scientific.net/AMR.324.360.
- S. Kazemi et A. S. Lubell, « Influence de la taille de l'échantillon et de la teneur en fibres sur les propriétés mécaniques du béton renforcé de fibres ultra-hautes performances », *ACI Mater. J.*, vol. 109, non. 6, p. 675, 2012.
- Sahraei Moghadam, F. Omidinasab et M. Abdalikia, « L'effet de la résistance initiale des déchets de béton sur les propriétés fraîches et durcies du béton recyclé renforcé de fibres d'acier recyclées », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 300, p. 124284, septembre 2021, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2021.124284.
- Stang, H., Li, VC et Krenchel, H. (1995). Conception et applications structurelles des relations contrainte-largeur de fissure dans le béton fibré. *Matériaux et structures* , 28 (4), 210-219.
-

T

- T. EN, '14889-1.(2006). Fibres pour béton-Partie 1 : Fibres d'acier- Définitions, spécifications et conformité ». 2006.
- T. Jirawattanasomkul, N. Kongwang, P. Jongvivatsakul et S. Likitlersuang, «Modélisation par éléments finis du comportement en flexion du tapis composite cimentaire géosynthétique (GCCM)», *Compos. Partie B Eng.*, vol. 154, p. 33–42, 2018.
- T. Soetens et S. Matthys, « Transfert de contrainte de cisaillement à travers une fissure dans le béton renforcé de fibres d'acier », *Cem. concr.*

Compos., vol. 82, pp. 1–13, septembre 2017, doi : 10.1016/j.cemconcomp.2017.05.010.

Tattersall, GH, & Banfill, PF (1983). La rhéologie du béton frais (n° Monographie).

Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). Théorie des plaques et des coques : moments de flexion dans une plaque rectangulaire simplement supportée avec une charge concentrée (no. Engineering Soc Monographs).

Torelli, G., Fernández, MG et Lees, JM (2020). Béton à gradation fonctionnelle : objectifs de conception, techniques de production et méthodes d'analyse pour les éléments stratifiés et à gradation continue. *Construction et matériaux de construction* , 242 , 118040.

U

Uddin, MT, Shikdar, MKH et Joy, JA (2019). Résistance au cisaillement des poutres BA constituées de granulats de briques sans armature de cisaillement. *Journal of Civil Engineering (IEB)* , 47 (1), 31-45.

UN. L. Døssland, « Renforcement des fibres dans les structures porteuses en béton : investigations en laboratoire et sur le terrain comparées à la théorie et à l'analyse par éléments finis », 2008.

V

V. M. Malhotra, 'Essai du béton durci : méthodes non destructives', 1976.

W

W. Abbass, M. I. Khan et S. Mourad, « Évaluation des propriétés mécaniques du béton renforcé de fibres d'acier avec différentes résistances du béton », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 168, p. 556–569, 2018.

W. Pansuk, H. Sato, Y. Sato et R. Shionaga, 'Tensile behaviors and fiber orientation of UHPC', dans *Actes du deuxième symposium international sur le béton ultra haute performance*, Kassel, Allemagne (Kassel University Press), 2008, p. 161–168.

Whitehurst, EA (1966). Évaluation des propriétés du béton à partir d'essais soniques. Monographie de l'American Concrete Institute , 2 , 27.

Williamson, GR (1974). L'effet des fibres d'acier sur la résistance à la compression du béton. *Publication spéciale* , 44 , 195-208.

X

X. Liu, M. Yan, I. Galobardes et K. Sikora, « Évaluation du potentiel du béton à gradation fonctionnelle à l'aide de béton renforcé de fibres et de granulats recyclés », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 171, pp. 793–801, mai 2018, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.202.

Y

- Y. Choi et R. L. Yuan, « Relation expérimentale entre la résistance à la traction et la résistance à la compression du GFRC et du PFRC », *Cem. concr. Rés.*, vol. 35, non. 8, pages 1587-1591, 2005.
- Y. Mohammadi, S. P. Singh et S. K. Kaushik, « Propriétés du béton fibreux d'acier contenant des fibres mélangées à l'état frais et durci », *Constr. Construire. Mater.*, vol. 22, non. 5, pages 956–965, 2008.
- Y. Y. Y. Cao, P. P. Li, H. J. H. Brouwers, M. Sluijsmans et Q. L. Yu, « Améliorer les performances en flexion du béton à ultra-haute performance par un concept de structure en couches optimisé », *Compos. Partie B Eng.*, vol. 171, pp. 154–165, août 2019, doi : 10.1016/j.compositesb.2019.04.021.
-

Z

-
- Zerbino, R., Tobes, JM, Bossio, ME et Giaccio, G. (2012). Sur l'orientation des fibres dans les éléments structuraux fabriqués en béton fibré autoplaçant. *Composites de ciment et de béton* , 34 (2), 191-200.