

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA**



Faculté des Sciences Appliquées

Département Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**BOUDEBZA Hayet**

**MANCER Katia**

En vue de l'obtention du diplôme Master en :

**Filière : GENIE CIVIL**

**Option : STRUCTURES**

**Thème :**

**Simulation de la distribution des fibres et la contrainte de traction par fendage d'un béton renforcé**

**Devant le jury composé de :**

- Président : Mr Galaoui
- Encadreur : Mme Saoudi Nacira
- Examineur 1 : Mr Hami
- Examineur 2 : Mr Arbaoui

**Année Universitaire 2024/2025**

## DÉDICACE HAYET

À ceux qui ont semé en moi les graines de l'ambition et les  
ont arrosées avec amour et prières,

À ma mère et mon père, battements de mon cœur et piliers de  
ma vie,

À mes chers frères et sœurs (**Aziz.nacer et linda**  
**.kahina**), qui ont partagé le chemin avec moi et m'ont  
toujours soutenue,

À ma chère amie Yasmine, lumière dans mes moments  
sombres et compagne fidèle dans tous les défis,

À mon ami Tarek, dont le soutien sincère a été une source de  
motivation, et dont les encouragements ont contribué à cette  
réussite.

Je vous dédie à tous le fruit de mes efforts, un succès qui  
n'aurait jamais été possible sans votre amour et votre  
présence à mes côtés.

### *Dédicace Katia :*

*À ma très chère mère, dont l'amour inconditionnel et les sacrifices ont tracé le chemin de ma vie. Ton absence physique n'a jamais altéré ta présence constante dans mon cœur, et chaque pas que je fais est une dédicace silencieuse à ta mémoire éternelle.*

*Ce travail est pour toi, ma source d'inspiration infinie.*

*À mon cher époux, Fateh, roc inébranlable de mon existence. Ta patience, ton soutien indéfectible, ta compréhension et ta force tranquille ont été les piliers sur lesquels j'ai pu m'appuyer, jour après jour, pour mener à bien ce projet. Merci d'être mon plus grand allié.*

*À mes sœurs adorées, Sara et Marwa, complices de toujours. Nos rires, nos confidences et les liens profonds qui nous unissent sont une richesse inestimable. Votre affection est un véritable moteur.*

*À mes tantes, Aldjia et Noura, pour votre tendresse, votre sagesse et votre présence chaleureuse qui ont éclairé tant de moments de ma vie.*

*À mon cher père, qui traverse une épreuve de santé. Ma force est puisée dans ta résilience et ton courage. Ce mémoire est aussi un hommage à ta persévérance, et j'espère qu'il t'apportera un peu de fierté et de réconfort.*

*À mes enfants, Saber, Meriem et Nouha, ma raison de me surpasser, ma joie la plus pure et ma plus belle réussite. Votre amour est ma plus grande inspiration et ma motivation quotidienne.*

*À toute ma famille, élargie, dont l'affection et l'encouragement ont tissé la toile de mon parcours. Merci d'être ce refuge précieux.*

*Enfin, à mes amis, compagnons de route, pour leur écoute, leur soutien et les moments partagés qui ont allégé les périodes de doute et enrichi ce voyage.*

# Remerciement

*Nous remercions Dieu de nous avoir donné la santé et le courage et la volonté pour terminer ce mémoire de fin d'étude*

*Je tiens à remercier sincèrement mon encadrante,  
Madame **Saoudi Nacira** pour son accompagnement, ses  
conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail.*

*Je remercie également tous les membres du jury pour avoir  
accepté d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt porté à notre  
travail.*

## Résumé

Cette recherche analyse l'impact de la répartition des fibres sur la résistance à la traction par fendage du béton renforcé de fibres, en s'appuyant à la fois sur une approche expérimentale et sur une modélisation via les réseaux de neurones artificiels (RNA). Trente éprouvettes cylindriques ont fait l'objet d'essais de traction indirecte (essai brésilien) et de compression, accompagnés d'une collecte de données sur la contrainte, la charge appliquée, ainsi que le nombre de fibres dépassant 5 mm. Après une phase de traitement préalable des données. Le modèle RNA, conçu avec Matlab, a permis de prédire de manière satisfaisante la contrainte de traction à partir des variables expérimentales, traduisant avec exactitude fidèlement l'effet de la distribution des fibres. Ces résultats suggèrent un potentiel prometteur pour une optimisation plus ciblée du béton fibré.

**Mots-clés :** béton renforcé de fibres, traction indirecte, distribution des fibres, modélisation, réseaux de neurones artificiels.

## Abstract

This study investigates the effect of fiber distribution on the splitting tensile strength of fiber-reinforced concrete, combining experimental methods with modeling through artificial neural networks (ANN). Thirty cylindrical specimens were subjected to indirect tensile tests (Brazilian method) and compression tests, with data collected on stress, applied force, and the number of fibers longer than 5 mm. The data were normalized prior to modeling. The ANN model, developed in Matlab, demonstrated reliable performance in predicting tensile strength based on the experimental inputs, accurately reflecting the influence of fiber distribution. These findings highlight the potential for a more efficient and rational optimization of fiber-reinforced concrete design.

**Keywords:** fiber-reinforced concrete, indirect tension, fiber distribution, modeling, artificial neural networks.

**ملخص:**

تُحلّل هذه الدراسة تأثير توزيع الألياف على مقاومة الشد بالانشطار في الخرسانة المسلحة بالألياف، بالاعتماد على نهج مزدوج يجمع بين التجارب المخبرية والنمذجة باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA). تم اختبار ثلاثين عينة أسطوانية من خلال اختبارات شد غير مباشر (طريقة برازيلية) واختبارات ضغط، مع جمع بيانات حول الإجهاد والقوة المطبقة وكذلك عدد الألياف التي يتجاوز طولها 5 مم. بعد مرحلة المعالجة المسبقة للبيانات. مكن النموذج المعتمد على الشبكات العصبية، الذي تم تطويره باستخدام برنامج Matlab ، من التنبؤ بمقاومة الشد بشكل دقيق انطلاقاً من المعطيات التجريبية، مما يعكس بدقة تأثير توزيع الألياف. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية تحسين تصميم الخرسانة المسلحة بالألياف بطريقة أكثر دقة وعلمية.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة مسلحة بالألياف، الشد غير المباشر، توزيع الألياف، النمذجة، الشبكات العصبية الاصطناعية.

## Liste d'abréviation

**SFRC:** steel fibre reinforced concret.

**MEB :** microscope électronique à balayage.

**TAIRB :** Tubulaire en Acier Inoxydable Rempli de Béton

**P.O 42.5:** ciment portland ordinaire 42.5

**FA:** Fly Ash.

**HSSCC:** High-Strength Self-Compacting Concrete

**CECS13-2009:** China Engineering Construction Standard Association – CECS 13:2009

**$\Sigma$ - $\epsilon$  :** Contrainte-déformation

**N- $\delta$  =** Force – Déplacement

**BFRA:** Béton Fibré à Renforts d'Acier

**ML:** Machine Learning

**ZIT :** Zones d'interface de Transition

**A et b :** sont les longueurs d'autocorrélation

**r :** le coefficient de rugosité

**Rc:**Avancement de la réaction chimique

**T :**Température (°C ou K)

**F :**Fonction de pondération (influence de chaque facteur)

**Gv :**Concentration volumique en CO<sub>2</sub>

**H :**Humidité relative du béton (ou humidité interne)

**BFAR :** béton de fibres d'acier Recyclées

**CBAPC :** chaussés en béton armé partiellement continue

**CFSST :**Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Tube en Acier Inoxydable Rempli de Béton

**BFUP :** Béton de Fibres Ultra-Performantes

**IZT :**Interfacial Transition Zone

**VF :**Teneur en fibres /en volume exprimé  
en pourcentage (%)

**$\theta$  :** Angle d'inclinaison de la fibre

**Df:** fiber diameter

**L :**Longueur de l'axe majeur

**X :** Déformation normalisée

**Y :** Contrainte normalisée

**n :** Paramètre de forme

**$\beta$  :** Exposant de forme



**$\alpha$**  : Coefficient d'ajustement

**AB** : Diamètre réel de la fibre (alignée)(mm)

**A' B'** : Petit axe de l'ellipse (section inclinée)

**d** :Diamètre réel de la fibre(mm)

**d cos( $\theta$ )** : Diamètre apparent dans la coupe inclinée mm

**k<sub>1</sub>** :Facteur d'ajustement de la pente initiale (Wee)

**k<sub>2</sub>** :Facteur d'ajustement du segment décroissant (Wee)

**W** : rapport d'eau

**C** : ciment

**ASFRC** : Advanced Steel Fiber Reinforced

**F<sub>t</sub>** : Résistance à la traction( MPa ou N/mm<sup>2</sup>)

**E<sub>t</sub>** : Déformation à la traction à rupture

**SCC** : Béton Autoplaçant

**HFb04...HFc12** : Types de béton fibré avec différentes quantités ou types de fibres

**ff<sub>cr</sub>** :Résistance à la traction initiale par fissuration

**ff<sub>a</sub>** :Contrainte maximale après fissuration de l'éprouvette entaillée

**Fat** : Résistance axiale à la traction selon le code chinois

**CECS13**( valeur maximale entre ff<sub>cr</sub> et ff<sub>a</sub>)

**$\epsilon_{fcr}$**  : Déformation en traction correspondant à ff<sub>cr</sub>

**$\epsilon_{fa}$**  :Déformation en traction correspondant à ff<sub>a</sub>

**$\epsilon_{at}$**  : Déformation correspondant à la résistance à la traction axiale fat

**UTTs** : les essais de traction uniaxiale

**DEWSTs** : les essais de flexion à ouverture de fissure déformée

**DPTs** : les essais de traction directe

**fR0.5**: Residual flexural tensile strength at CMOD = 0.5 mm)

**fct**: Tensile Strength of Concrete

**ns**: Number of Specimens

**CV %** = Coefficient of Variation

**SP** : (Superplasticizer :Superplastifiant (réducteur d'eau à base de polycarboxylate)

**H0** : Béton autoplaçant sans fibres

**H0.75** :SFRC contenant 0,75 % de fibres d'acier en volume

**H1** :SFRC contenant 1 % de fibres d'acier en volume

**H1.5** :SFRC contenant 1,5 % de fibres d'acier en volume

**ACC** : Algerian Cement Company

**ENGOA** : Entreprise Nationale de génie civil et d'ouvrages d'art, situé à Rouiba (Alger)

**l'ADVA flow 390** : Superplastifiant (ou réducteur d'eau à haute performance)

**MSE** : Mean Squared Error.

**RNA** : réseau neurones artificiel

**SSB** : Surface Spécifique Blaine

## Table des matières

dédicace

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

Liste d'abréviation

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 11

partie bibliographique

I.1. Introduction ..... 11

I.2. Matériels et méthodes :..... 11

I.3. Comparaison entre les matériaux et les essais ..... 11

I.4. Comportements :..... 11

I.5. Résultats et Discussion..... 11

I.5.1. Effets de la Carbonatation Supercritique sur le BFUP (Béton de Fibres Ultra-Performantes) 11

partie expérimentale

II.1. Introduction ..... 11

II.2. Fondements des réseaux de neurones artificiels : ..... 11

II.3. Phases de mise en place d'un Réseau de Neurones Artificiels :..... 11

II.4. Sélection des variables d'entrée et de sortie pour le modèle RNA : ..... 11

II.4.1. Formulation : ..... 11

II.4.2. Caractéristiques des matériaux utilisées : ..... 11

II.4.2.1. Le ciment : ..... 11

II.4.2.2. Les granulats : ..... 11

II.4.2.3. L'eau de gâchage : ..... 11

II.4.2.4. L'adjuvant : ..... 11

II.4.2.5. Les fibres métalliques : ..... 11

II.4.3. Ecrasement : ..... 11

II.4.3.1. Base de données : ..... 11

II.5. Le choix des variables d'entrées et de sorties du modèles RNA..... 11

II.6. La division des données ..... 11

II.7. Entraînement de réseau de neurones artificiels : ..... 11

II.8. Le choix de la fonction d'activation : .....	12
Conclusion générale .....	12
Référence bibliographique : .....	12

## Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Equipements pour le système de carbonatation supercritique. Hao Bao,2025 .....	13
<b>Figure I.2 :</b> Forme et longueurs des fibres d'acier. [Jike Tan, 2025] .....	13
<b>Figure I.3 :</b> dimensions de l'éprouvette et système de chargement associé pour l'essai de traction. [Jike.T, 2025].....	13
<b>Figure I.4 :</b> dimensions de l'éprouvette de compression uniaxiale et appareil de chargement. [Jike T, 2025]. .....	13
<b>Figure I.5 :</b> Distribution de la ZIT (Zone d'Interface de Transition) entourant les granulats grossiers et les fibres d'acier. ....	13
<b>Figure I.6:</b> Organigramme de la méthode de modélisation couplée multiphysique pour la carbonatation supercritique du BFAR (Béton de Fibres d'Acier Recyclées). ....	13
<b>Figure I.7 :</b> Courbe typique contrainte-déformation en compression uniaxiale du béton fibré (SFRC). [Jike Tan,2025].....	13
<b>Figure I.8 :</b> Morphologies typiques de rupture en compression du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'aciers. [Jike Tan,2025] .....	13
<b>Figure I.9 :</b> Courbe typique contrainte- déformation en traction uniaxiale du BFRC. [Jike Tan,2025]13	
<b>Figure I.10 :</b> Etats typiques de rupture en traction du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'aciers. [Jike Tan,2025] .....	13
<b>Figure I.11 :</b> Évolution Microstructurelle du BFUP sous Carbonatation Supercritique [Hao .B, 2025] .....	13
<b>Figure I.12 :</b> Influence des Fibres sur la Résistance [Hao Bao, 2025].....	13
<b>Figure I.13 :</b> Influence des Fibres sur la Carbonatation du BFRA [Hao .B, 2025].....	13
<b>Figure I.14 :</b> Courbes de Porosimétrie au Mercure pour le BFRA-L60-V1.5 avant et après Carbonatation Supercritique [Hao. B,2025]. ....	13
<b>Figure I.15 :</b> Profils de carbonatation supercritique du béton fibré à l'acier (SFRC) avec différentes fractions volumiques et rapports longueur/diamètre des fibres d'acier. [Hao. B,2025].....	13
<b>Figure I.16 :</b> Courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'acier (a) $V_f = 1.0 \%$ ; (b) $V_f = 1.2 \%$ ;.....	13
<b>Figure I.17 :</b> Courbes contrainte-déformation normalisées pour le béton renforcé de fibres d'acier (rapport d'aspect = 55, fraction volumique = 0,75 %).[Nataraja, M.C,1999] .....	13
<b>Figure I.18 :</b> (a) Géométrie de l'éprouvette, (b) Schéma du dispositif d'essai.....	13
<b>Figure I.19 :</b> Fibres utilisées dans l'étude : (a) Fibres d'acier à crochets ; (b) Fibres de polypropylène crépées monofilament ; (c) Fibres de Kevlar.....	13
<b>Figure I.20 :</b> Courbes contrainte-déformation en traction uniaxiale du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'acier.....	13

<b>Figure I.21</b> : Section transversale d'une fibre inclinée et sa relation avec la matrice de béton : (a) Une fibre unique ;(b) Section a-a. ....	14
<b>Figure I.22</b> : Relation entre les performances mécaniques du béton renforcé de fibres d'acier (SFRC) et la variation de la fraction volumique de fibres d'acier. ....	14
<b>Figure I.23</b> : Comparaison des segments descendants entre les équations constitutives et les courbes expérimentales pour différents bétons renforcés de fibres d'acier (SFRC). ....	14
<b>Figure I.24</b> : Courbe typique contrainte-déformation en traction uniaxiale pour le béton renforcé de fibres d'acier (SFRC). ....	14
<b>Figure I.25</b> : Effet du rapport eau/ciment (w/c) sur le Gf-A des éprouvettes en SFRC et ASFRC avec $V_f = 2,0 \%$ . ....	14
<b>Figure I.26</b> : Comparaison des courbes contrainte-déformation entre l'essai de traction uniaxiale et les courbes prédites pour le béton renforcé de fibres d'acier (SFRC) avec différentes fractions volumiques. ....	14
<b>Figure I.27</b> : Diagramme d'erreur entre les valeurs prédites et expérimentales aux points clés des courbes contrainte-déformation en traction uniaxiale du SFRC. ....	14
<b>Figure I.28</b> : Schéma illustrant la méthode de calcul de l'angle d'inclinaison des fibres. ....	14
<b>Figure II.1</b> : réseau des neurones multicouches artificiels ....	14
<b>Figure II.2</b> : les éprouvettes cylindriques de dimensions ( $\varnothing 16 \times 32$ cm) du béton fibré ....	14
<b>Figure II.3</b> : Béton fibré.....	14
<b>Figure II.4</b> : des fibres d'aciers ....	14
<b>Figure II.5</b> : La mise en œuvre des éprouvettes ....	14
<b>Figure II.6</b> : la mise en œuvre de traction par fendage sur une éprouvette cylindrique.....	14
<b>Figure II.7</b> : les groupes des éprouvettes après l'essai de traction par fendage.....	14
<b>Figure II.8</b> : Architecture du réseau de neurones maintenu. ....	14
<b>Figure II.9</b> : Organigramme de l'algorithme de rétropropagation thèse Saoudi B, 2022. ....	14
<b>Figure II.10</b> : Phase d'entraînement.....	14
<b>Figure II.11</b> : phase de validation ....	14
<b>Figure II.12</b> : phase de test ....	14
<b>Figure II.13</b> : l'ensemble des données ....	14
<b>Figure II.14</b> : donnant la meilleurs époque (itérations) de validation (ici à 0).....	14

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Propriétés physiques et mécaniques de fibres d'acier utilisées par H.Bao,2025.....	15
<b>Tableau I.2 :</b> Composition de base du béton [Jike. T,2025].....	15
<b>Tableau I.3:</b> La taille des particules [Jike. T,2025].....	15
<b>Tableau I.4 :</b> Dosage du mélange des éprouvettes en béton renforcé de fibres d'acier (kg/m <sup>3</sup> ).....	15
<b>Tableau I.5 :</b> Écart type et intervalles de confiance à 95 % des valeurs de résistance aux points A, B et C sur les courbes contrainte-déformation en traction du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'acier. ....	15
<b>Tableau I.6 :</b> Formes du segment descendant dans les équations constitutives en traction pour différents bétons renforcés de fibres d'acier (SFRC).....	15
<b>Tableau I.7 :</b> Résultats des essais de résistance et de déformation en traction axiale. ....	15
<b>Tableau I.8 :</b> Résistances nominales moyennes pour (UTTs), (DEWSTs) et (DPTs) avec le coefficient de variation (CV %).....	15
<b>Tableau I.9 :</b> Modèle constitutif typique en compression du béton. ....	15
<b>Tableau II.1 :</b> Caractéristique physiques de Ciment.....	15
<b>Tableau II.2 :</b> Caractéristiques mécaniques du Ciment .....	15
<b>Tableau II.3 :</b> Les Caractéristiques des fibres .....	15
<b>Tableau II.4 :</b> les noms et les contraintes résultantes des éprouvettes .....	15
<b>Tableau II.5 :</b> les variables d'entrées et de sorties .....	15

Introduction

Générale



## Introduction générale

De nos jours, l'utilisation des fibres métalliques dans le béton représente une avancée majeure dans le renforcement des structures soumises à différentes sollicitations mécaniques. Cette technique Créative permet d'améliorer non seulement la résistance à la traction et la ténacité du béton, mais aussi sa durabilité face aux agressions extérieures. C'est une stratégie ingénieuse qui redéfinit les performances du béton moderne.

De nombreuses recherches contemporaines s'attachent à élucider l'influence de la distribution des fibres dans le béton fibré, notamment sur ses propriétés mécaniques après sollicitation. Parmi ces propriétés, la contrainte de traction par fendage demeure un paramètre fondamental pour juger du comportement intrinsèque du matériau.

Dans le cadre de ce travail, nous avons réalisé une étude expérimentale sur des éprouvettes cylindriques de dimensions ( $\varnothing 16 \times 32$  cm), confectionnées à partir d'un béton renforcé par des fibres métalliques. L'expérience consiste à appliquer un essai brésilien (traction par fendage) afin d'analyser la contrainte développée en fonction de la répartition des fibres.

Plusieurs études ont déjà montré que la distribution aléatoire ou orientée des fibres influence de manière significative la résistance en traction indirecte. L'analyse de ces effets est indispensable pour concevoir des modèles prédictifs plus fiables du comportement des bétons fibrés.

L'objectif de notre travail est donc de corrélérer la distribution des fibres métalliques dans les éprouvettes à la valeur réelle de la contrainte de traction par fendage, dans le but de mieux comprendre l'apport des fibres dans le renforcement du béton.

Afin de mener à bien cette étude, notre mémoire a été structuré en deux parties :

- Une première partie consacrée à l'état de l'art, présentant les travaux récents sur les bétons fibrés, la technique de traction par fendage, et les effets de la distribution des fibres.
- Une seconde partie détaillera les protocoles mis en œuvre pour les essais de traction par fendage sur le béton fibré. Nous y présenterons la caractérisation des éprouvettes, la description du dispositif expérimental et des mesures réalisées, telles que la force appliquée et le dénombrement des fibres. Cette section mettra également en lumière les résultats obtenus et leur interprétation, avant de s'attarder sur l'approche de modélisation innovante par réseaux neuronaux artificiels, qui a permis de relier ces observations expérimentales à la prédiction de la contrainte du matériau.

# Partie bibliographie

## I.1. Introduction

Dans cette section, nous réalisons une synthèse critique d'articles scientifiques derniers (2024/2025). Ces publications se concentrent sur l'analyse expérimentale de la distribution des fibres métalliques dans les bétons fibrés. Nous y abordons également l'influence de cette distribution sur les propriétés mécaniques du matériau, notamment lors de l'essai de traction par fendage.

La performance des bétons renforcés de fibres métalliques repose fortement sur la distribution spatiale et l'orientation des fibres dans la matrice cimentaire. Cette distribution influe directement sur la capacité de résistance à la traction et sur le comportement post-fissuration. De ce fait, plusieurs chercheurs ont développé des modèles de simulation avancés afin de mieux comprendre la répartition des fibres selon les paramètres de mise en œuvre (granulométrie, la compositions type de fibres, méthode de coulage ...).

Par ailleurs, l'étude approfondie de la traction par fendage permet d'évaluer indirectement la résistance en traction du béton. Ce type d'essai est sensible à la distribution des fibres, qui peut provoquer une dispersion significative des résultats mécaniques ([Rossi, 2005](#) ; [Mindess et al., 2003](#)). Ainsi, des approches numériques basées sur les méthodes aux éléments discrets ou les modèles probabilistes ont été proposées pour simuler cette variabilité et anticiper les performances du matériau.

D'autres travaux s'intéressent à la ductilité des bétons fibrés, c'est-à-dire leur aptitude à subir une déformation importante avant rupture. Cette propriété est souvent mesurée à travers des essais de flexion sur des poutres ou des éprouvettes cylindriques, où la quantité d'énergie absorbée avant la rupture est analysée. L'étude incluse dans cette revue porte notamment sur la ductilité de poutres en béton auto-plaçant renforcées de fibres d'acier, soumises à des charges de flexion. L'objectif est d'évaluer leur capacité à se déformer de manière plastique sans perte brutale de portance.

Plusieurs facteurs influencent ce comportement en flexion, notamment : la résistance à la compression du béton, les taux et types d'armatures, les conditions de chargement (monotone ou cyclique), le rapport portée/profondeur, la forme de la section transversale, ainsi que la formulation du béton.

À travers cette revue, il s'agira donc de comprendre comment ces différents paramètres interagissent avec la présence et la distribution des fibres métalliques, afin d'optimiser les performances structurelles du béton fibré.

## I.2. Matériels et méthodes :

Des études sur la modélisation des comportements des bétons renforcés de fibres d'acier ont été réalisées par plusieurs chercheurs sous différents modes. Le SFRC (steel fiber reinforced concrete) s'est avéré être un matériau concurrent dans de nombreux types de structures [Hao. B, 2025 ; Victor ,2021 ; Mohamed. M, 2024] .

Afin de modéliser et de confirmer le comportement du béton armé renforcé par les fibres d'acier sous l'effet de la carbonatation supercritique en traction, [Hao. B ,2025 ; Yichang, Hubei Shuhuo Zhang, 2022 ; Xinyu. L, 2025] ont utilisé du ciment Portland ordinaire de type P.O 42.5, ainsi que des granulats grossiers à granulométrie continue allant de 5 à 20 mm et des granulats fins constitués de sable de rivière naturel. Un agent réducteur d'eau haute performance à base d'acide polycarboxylique avec un taux de réduction allant jusqu'à 30% a été utilisé.

Dans une étude sur le comportement des SFRC sous attaque des chlorides, [Xinyu. L, 2025] a utilisé des cendres volantes (FA) de classe F, et du laitier de haut fourneau de grade S95. Tandis que ce dernier a employé un superplastifiant à base de polycarboxylate.

Une validation expérimentale a été menée par [Marcos-Meson.V , 2021] pour évaluer l'effet des cycles alternés de mouillage-séchage en présence de chlorures et de dioxyde de carbone sur la corrosion des fibres d'acier et les performances mécaniques du béton renforcé. Il a utilisé des cendres volantes comme substituant partiel au ciment à hauteur de 31 %, avec un rapport eau/liant réduit à 0,34. L'auteur vise à améliorer la durabilité du béton et de réduire sa perméabilité dans des environnements agressifs.

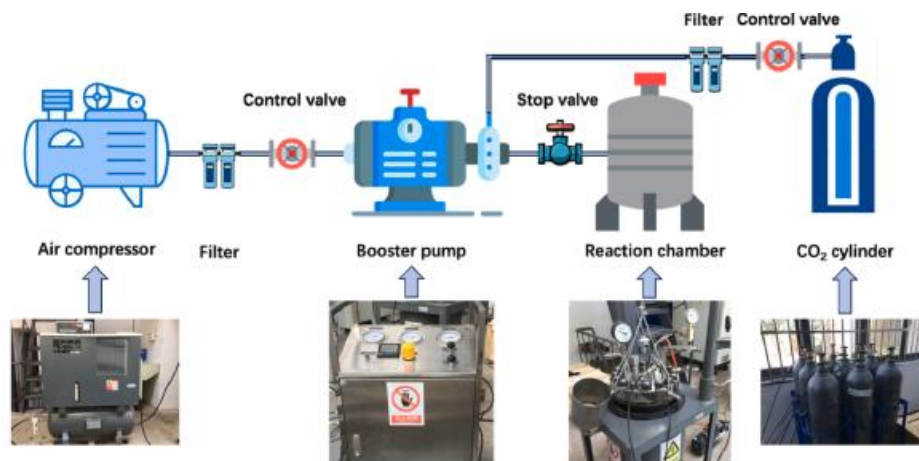
[H.Bao,2025 ; P. Purnell, 2001 ; China National Standards, 2009] ont déterminé les proportions de mélange nominales du béton armé de fibres d'acier conformément aux spécifications afin d'obtenir une résistance à la compression de 40 MPa, cas d'exemple dans le [tableau I.1](#).

**Tableau I.1 : Propriétés physiques et mécaniques de fibres d'acier utilisées par [H.Bao,2025]**

Ciment (kg /m <sup>3</sup> )	Granulat grossier (kg / m <sup>3</sup> )	Sable (kg / m <sup>3</sup> )	Eau (Kg / m <sup>3</sup> )	Rapport eau-liant
445	1078	732	178	0,40
Diamètre équivalent (mm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Rapport longueur/diamètre	Longueur (mm)	Résistance à la traction (Mpa)
0.55	7.8	30,60,80	16.5,33,44	1120

Des fibres d'acier ondulées utilisé par [Hao. B, 2025] pour le cisaillement avec un rapport longueur/diamètre de 30, 60 et 80, dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées dans le [tableau I.1](#).

Après une cure de 28 jours, [H. Bao,2025] a réalisé un essai de carbonatation supercritique à l'aide d'un système en circuit fermé avec un contrôle précis de la pression (8.0 MPa) et de la température (40°C) pendant 72 heures comme indiqué dans la [figure I.1](#). Après la carbonatation, la résistance à la compression a été évaluée, et la profondeur de carbonatation a été mesurée à l'aide de phénolphthaléine et d'une analyse numérique. Les changements dans la microstructure et la porosité du béton ont également été analysés à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).



**Figure I.1 :** Equipements pour le système de carbonatation supercritique. [Hao Bao,2025]

L'influence du pourcentage volumique de fibres d'acier sur le comportement mécanique et le développement de l'indice d'endommagement dans le béton armé de fibres a été étudiée dans une étude récente menée par le [Jike.T,2025]. Il a déterminé expérimentalement les proportions de mélange de base, comme indiqué dans le [tableau I.2](#) et [tableau I.3](#).

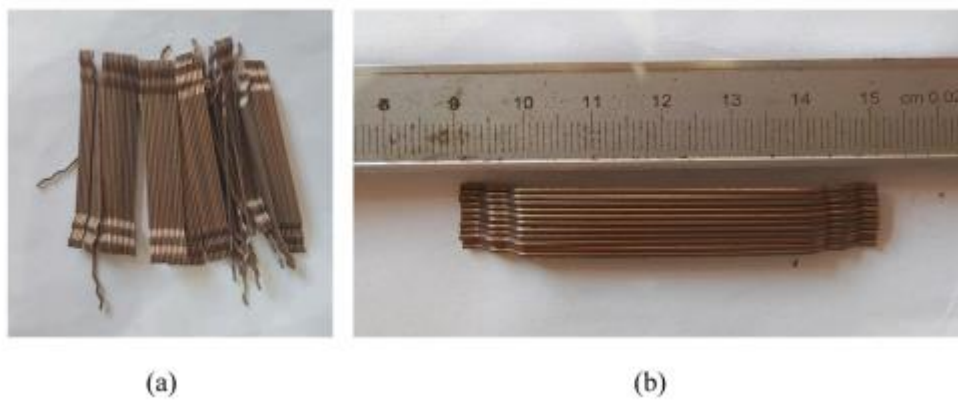
**Tableau I.2 :** Composition de base du béton [Jike. T,2025]

Matériau	Le pourcentage massique (kg/ m <sup>3</sup> )
Ciment	372
Cendres volantes	96
fumée de silice	21
Sable (agrégat fin)	1270
Rapport eau /ciment	0.3
Granulat grossier	529
Réducteur d'eau	5.32
Eau	110

**Tableau I.3:** La taille des particules [Jike. T,2025]

Matériau	La taille des particules
Sable fin	0.1 – 0.2
Sable grossier	0.4 – 0.8
Granulat	5-10
Fumée de silice	0.1

[Jike. T, 2025] a utilisé un superplastifiant de type polycarboxylate avec un taux de réduction d'eau supérieur à 40% dans le béton armé de fibres d'acier, des fibres d'acier de type Dramix 5D, d'une longueur de 60 mm et d'un diamètre de 0.9 mm (avec un rapport d'aspect équivalent de 65), afin d'assurer une distribution uniforme des fibres [Figure I.2](#).

**Figure I.2 :** Forme et longueurs des fibres d'acier. [Jike Tan, 2025]

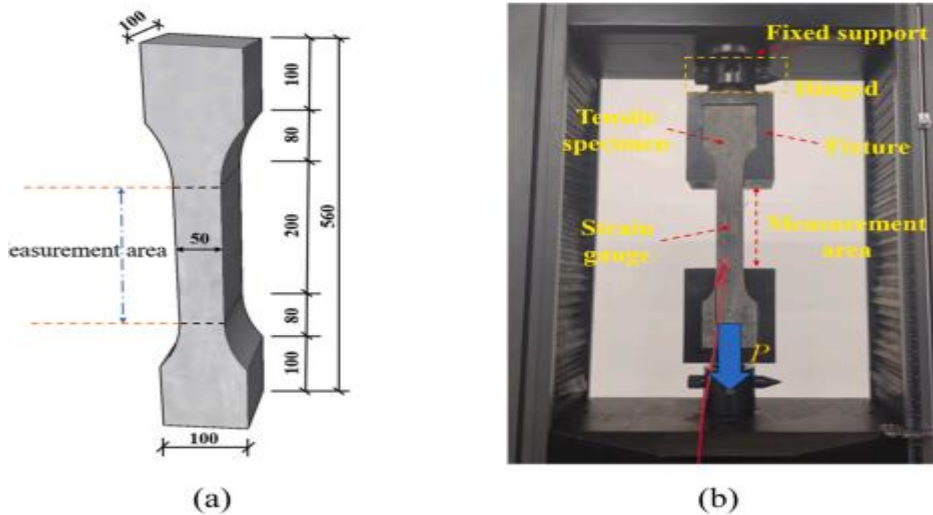
- (a) La forme des fibres d'acier
- (b) La longueur des fibres d'acier

L'étude réalisée par [Mohamed.M, 2024] s'est attachée à analyser l'influence du volume des fibres d'acier fines sur le comportement du béton autoplaçant à haute résistance (HSSCC). Pour ce faire, un béton de haute performance a été formulé en intégrant des fibres d'acier droites et fines, mesurant 8 mm de long pour 0,2 mm de diamètre, avec des teneurs en fibres allant de 0,0 % à 1,05 % en volume.

Conformément à la norme chinoise CECS13-2009 [R. Pradhan, 2010, Jike.T 2025] ont réalisés six séries, le processus de mélange comprenait le mélange des composants secs pendant une minute, suivi de l'ajout d'eau et de réducteur d'eau et de la poursuite du mélange pendant 1.5 minute pour assurer la dispersion des fibres d'acier et obtenir une distribution uniforme à l'intérieur du béton [Figure I.2](#).

Le mélange vibré [Jike.T 2025] pour réduire les bulles et niveler la surface. Les échantillons ont été soumis à une cure de 28 jours. Des éprouvettes de traction en forme d'os

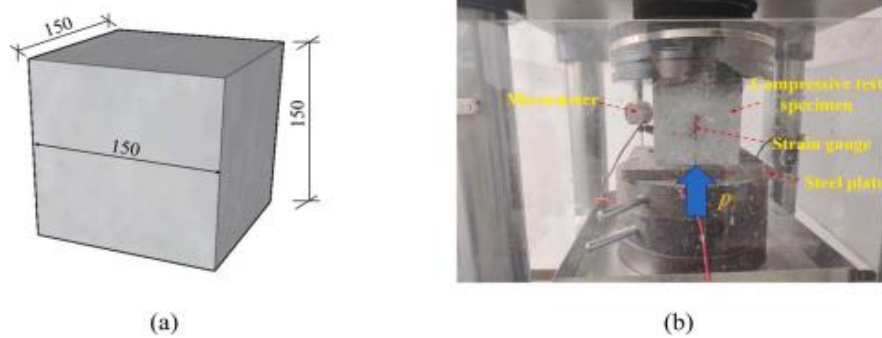
comme indiqué dans la [Figure I.3](#) avec des dimensions spécifiques (50 mm × 100 mm) dans la section de mesure et une longueur de mesure de 200 mm, et des dimensions totales de 560 mm × 100 mm × 100 mm). Des éprouvettes cubiques de dimensions 150 mm × 150 mm × 150 mm pour la compression [Figure I.4](#) des pourcentages volumiques de fibres d'acier allant de 0 à 1.6%



**Figure I.3 :** dimensions de l'éprouvette et système de chargement associé pour l'essai de traction. [Jike.T, 2025].

- a) Dimensions de l'éprouvette en traction
- b) Essai de traction uniaxiale

Des tests de traction uniaxiale ont été menés sur des ligaments denticulés par [Berriot. A , 2024] et son équipe à l'aide d'un système électromécanique Bose ElectroForce 3200. Avant chaque test, les échantillons étaient soumis à une précharge de 0,1 N et à 10 cycles de préconditionnement (1 mm d'élongation à 0,125 Hz). Les échantillons ont ensuite été étirés jusqu'à un déplacement de 2 mm à des taux de déplacement variés : 0,1 mm/s, 1 mm/s ou 10 mm/s. Ces vitesses ont été choisies pour comparer les résultats à des données quasi-statiques existantes et explorer les conditions dynamiques. Les tests, dont l'ordre a été randomisé pour chaque échantillon, ont permis d'enregistrer en continu la force de traction et le déplacement, tout en étant filmés pour une analyse visuelle. Les échantillons ont été conservés dans une solution saline à 20°C après dissection.



**Figure I.4 :** dimensions de l'éprouvette de compression uniaxiale et appareil de chargement. [Jike T, 2025].

- a) Dimensions de l'éprouvette en compression uniaxiale
- b) Appareil de chargement pour l'essai de compression uniaxiale

Des jauges de contrainte ont été placées au milieu des faces avant et arrière des éprouvettes, et des essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une machine hydraulique d'une capacité de 300 kN comme aperçu dans la Figure I.4. Le chargement a été appliqué à une vitesse de contrainte constante de 0,5 MPa/s, jusqu'à ce que la résistance à la compression résiduelle soit inférieure à 30 % ou que l'éprouvette s'effondre, conformément à la méthodologie adoptée par [Jike. T ,2025].

Les jauges de contrainte ont été placées au milieu des faces avant et arrière des éprouvettes, et des essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une machine hydraulique d'une capacité de 300 kN Figure I.4. Le chargement a été appliqué à une vitesse de contrainte constante de 0,5 MPa/s, jusqu'à ce que la résistance à la compression résiduelle soit inférieure à 30 % ou que l'éprouvette s'effondre, conformément à la méthodologie adoptée par [Jike. T, 2025].

Ensuite, [Jike. T, 2025] a réalisé des essais de traction uniaxiale à l'aide d'une machine d'essai universelle électronique d'une capacité de 30 kN. Les éprouvettes ont été fixées à un dispositif à rotule, puis la charge de traction a été mesurée par un capteur de force, tandis que la déformation d'allongement a été observée à l'aide de jauges de contrainte à l'avant de l'éprouvette et d'un capteur de déplacement. Après l'installation des montages supérieur et inférieur, des jauges de contrainte unidirectionnelles ont été fixées au milieu de l'éprouvette pour assurer leur alignement avec l'axe central afin d'éviter le chargement excentrique. Les dispositifs de mesure ont été connectés à un système d'acquisition de données, et le chargement a été effectué à une vitesse de déplacement constante de 0.2 mm/min jusqu'à ce que la résistance à la traction résiduelle soit inférieure à 20% de la résistance maximale



Pour analyser les données expérimentales, [Jike. T, 2025] a converti les données force axiale-déplacement (N- $\delta$ ) obtenues lors des essais en courbes contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ).

### I.3. Comparaison entre les matériaux et les essais

Les deux études, celle de H. Bao.,2025 et celle de J. Tan2025, s'intéressent au comportement du béton renforcé de fibres d'acier, mais elles se différencient par les matériaux utilisés et les méthodes expérimentales H. Bao.,2025 a utilisé une formulation traditionnelle, composée de ciment Portland P.O 42.5, de granulats grossiers de 5 à 20 mm, de sable de rivière naturel et d'un réducteur d'eau à base de polycarboxylate avec un rapport eau/liant de 0,40. Les fibres d'acier utilisées étaient ondulées, avec différentes longueurs (16,5 mm, 33 mm, 44 mm) et un rapport longueur/diamètre allant jusqu'à 80. Son étude portait principalement sur l'effet de la carbonatation supercritique en soumettant les échantillons à une pression de 8 MPa et une température de 40 °C pendant 72 h, suivie d'analyses mécaniques et microstructurales.

En revanche, [J. Tan2025] a opté pour un béton haute performance, intégrant en plus du ciment, des cendres volantes, de la fumée de silice, un rapport eau/ciment plus faible (0,30) et un superplastifiant plus puissant. Il a utilisé des fibres Dramix 5D (60 mm de long, 0,9 mm de diamètre, rapport d'aspect 65) pour améliorer la répartition dans le mélange. Son protocole expérimental était centré sur des essais de traction et de compression uni axiaux, avec des éprouvettes de formes spécifiques et un suivi précis des déformations à l'aide de jauges de contrainte et de capteurs de déplacement. Il a également étudié l'impact de différents pourcentages de fibres (jusqu'à 1,6%) sur les propriétés mécaniques.

En résumé, [H. Bao.,2025] a étudié l'effet de la carbonatation dans des conditions extrêmes avec une formulation classique, tandis que [J. Tan2025] a analysé le comportement mécanique en traction et compression avec un béton optimisé et des fibres plus performantes.

### I.4. Comportements :

[Hao Bao 2025] a modélisé la distribution stochastique et inhomogène des fibres au sein du SFRC (steel fiber reinforced concrete) en utilisant une équation de corrélation spatiale similaire à celle employée pour la porosité, cette équation est :

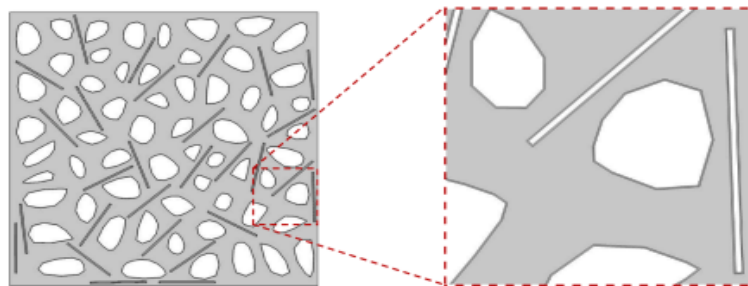
$$\phi(x,y) = \exp \left[ - \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{1+r}} \right] \quad (1)$$

- Où (a et b) sont les longueurs d'autocorrélation et r est le coefficient de rugosité

Un modèle de prédiction de la résistance au poinçonnement dans les connexions dalle-colonne internes en BFRA hybrides [YASSIR.M, 2025] en utilisons l'intelligence artificielle. (Machine learning) (ML) approaches. As advanced predictive technique.

[H. Bao,2025] s'est penché sur deux choses cruciales. D'abord, il y a des Zones d'Interface de Transition (ZIT) Figure I.5. C'est un peu comme une fine pellicule bizarre qui se forme autour de chaque morceau de gravier et chaque fibre d'acier à l'intérieur du béton.

[H. Bao,2025] nous montre comment on peut dessiner ces zones dans nos modèles : on prend la forme exacte du gravier ou de la fibre, et on rajoute une couche de 100 micromètres tout autour. Le comportement de ces ZIT est super important : elles peuvent changer la façon dont le béton se comporte juste à cet endroit, et souvent, elles deviennent des points faibles où les agents agressifs, comme le CO<sub>2</sub>, peuvent s'infiltrer plus facilement. En fait, ces ZIT agissent comme des accélérateurs de rouille.



**Figure I.5 :** Distribution de la ZIT (Zone d'Interface de Transition) entourant les granulats grossiers et les fibres d'acier. [H. Bao,2025]

[Desheng Yin, 2025] a examiné la microstructure et les propriétés mécaniques de la zone d'interface de transition (ZIT) à différents emplacements. Il a utilisé la microscopie électronique, la diffraction des rayons X, l'adsorption d'azote, la microscopie optique, des essais de microdureté et des essais de traction par fendage.

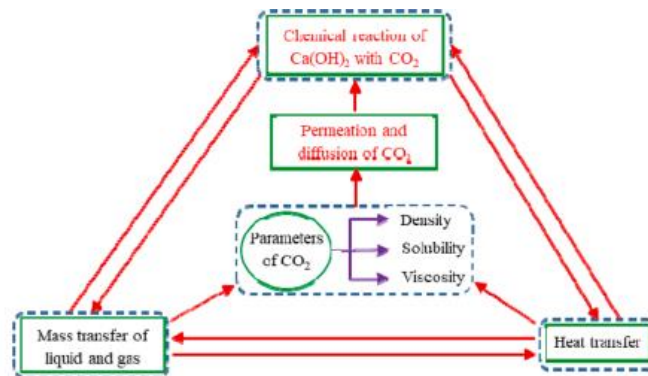
Ensuite, [H. Bao,2025] a mis au point un modèle de simulation génial pour la rouille supercritique du béton (la carbonatation). Ce modèle, c'est comme un laboratoire virtuel qui nous permet de voir comment le CO<sub>2</sub> interagit avec le béton dans des conditions extrêmes. Ce n'est pas juste un truc qui dit si le béton est solide ou non, mais il simule activement le comportement des phénomènes complexes :

- Le comportement chimique : Le modèle de [H. Bao,2025] calcule précisément à quelle vitesse le CO<sub>2</sub> va manger le Ca(OH)<sub>2</sub> du béton. Il tient compte de l'humidité du

béton (h), de la quantité de CO<sub>2</sub> présente (g<sub>v</sub>), de l'avancement de la réaction (R<sub>c</sub>) et de la température (T). C'est ce qui est résumé dans l'équation :

$$\frac{\partial R_c}{\partial t} = \alpha_1 \times f_1(h) \times f_2(g_v) \times f_3(R_c) \times f_4(T) \quad (2)$$

- où chaque "f" représente comment chaque facteur influence la vitesse de la réaction. C'est la loi de comportement de la réaction chimique de carbonatation selon [H. Bao,2025].
- Le comportement de transport : Le modèle de [H. Bao,2025] montre comment le CO<sub>2</sub> se déplace dans le béton. Il simule l'écoulement du gaz et du liquide dans les petits pores du béton, et la loi de Darcy y est utilisée pour expliquer comment le CO<sub>2</sub> percole dans le matériau. Il prend aussi en compte comment le CO<sub>2</sub> se dissout dans l'eau des pores et comment il se disperse, comme indiqué dans Figure I.6



**Figure I.6:** Organigramme de la méthode de modélisation couplée multiphysique pour la carbonatation supercritique du BFAR (Béton de Fibres d'Acier Recyclées). [H. Bao,2025]

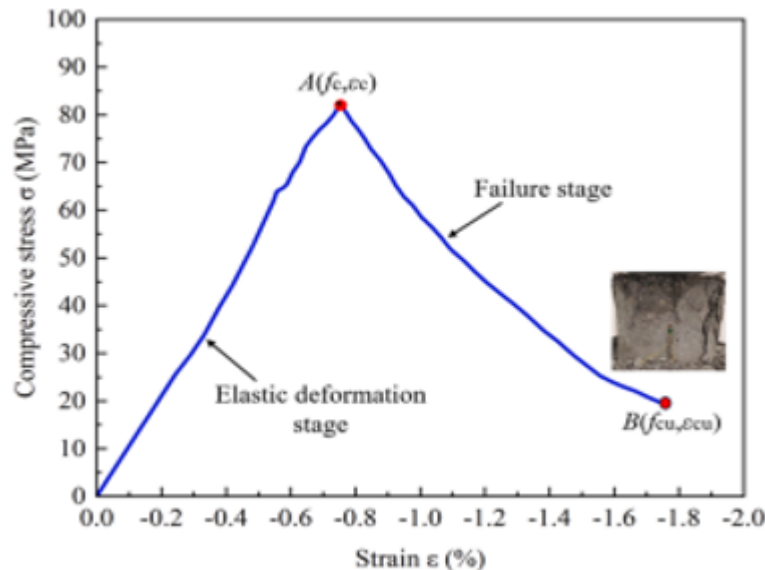
[Xiao Zhang, 2024] a examiné l'espacement et l'évolution de l'ouverture des fissures dans les chaussées en béton armé partiellement continues CBAPC (Chaussée en Béton Armé Partiellement Continue) soumises aux contraintes environnementales.

- Le comportement thermique : Les travaux de [H. Bao,2025] incluent aussi la chaleur. Le modèle voit comment la température change dans le béton (parce que les réactions peuvent chauffer ou refroidir) et comment cette température influence tous les autres processus.

Les résultats expérimentaux menés par [J. Tan2025] montrent que le béton armé de fibres d'acier SFRC (steel fiber reinforced concrete) présente un comportement structural distinct sous l'effet combiné de la compression et de la traction.

De plus, une étude a été faite par [Peng Dai, 2025] le comportement structurel des poteaux courts tubulaires en acier inoxydable remplis de béton TAIRB (Tubulaire en Acier Inoxydable Rempli de Béton) à sections transversales circulaires et carrées soumis à des charges combinées de compression et de flexion. Des modèles par éléments finis ont été développés et validés par rapport aux résultats expérimentaux de 20 poteaux courts CFSST, montrant une bonne concordance dans la prédiction des capacités portantes ultimes et des modes de rupture.

Sous l'effet de la compression axiale, comme illustré dans la Figure I.7, le béton traverse deux phases : la première (OA) correspond à un comportement linéaire élastique du matériau sans apparition de fissures ; elle est suivie par la phase (AB), marquée par des signes de détérioration et une perte de cohésion, particulièrement dans les échantillons à faible teneur en fibres ( $V_{f/sub} = 0,8 \%$ ), où une mauvaise intégration des fibres à la matrice béton a été observée. En revanche, la Figure I.8 montre que les échantillons contenant une plus grande proportion de fibres (entre 1,0 % et 1,6 %) ont présenté des dégradations superficielles limitées aux parties supérieures, tandis que les parties inférieures sont restées structurellement stables, ce qui indique une nette amélioration du comportement du matériau et de l'efficacité des fibres à renforcer la cohésion du béton.

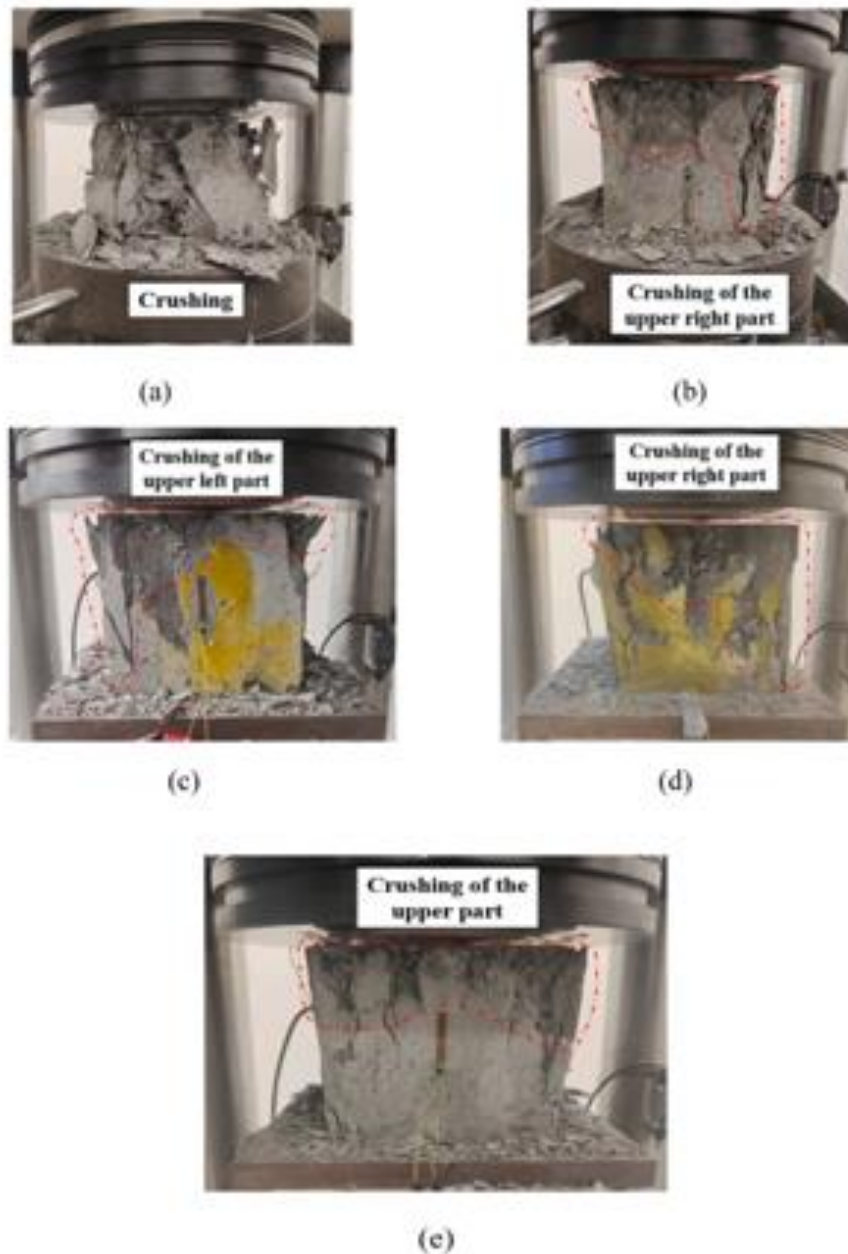


**Figure I.7 :** Courbe typique contrainte-déformation en compression uniaxiale du béton fibré (SFRC). [Jike Tan,2025]

Par ailleurs, une étude a été menée par [Rattanasak Hongthong 2025], le comportement du béton est analysé en fonction de l'ajout et de la forme des fibres d'acier, ainsi que de l'incorporation de cendres de fond et de cendres volantes. Il est constaté que l'augmentation de la teneur en fibres, en particulier les fibres déformées, diminue la fluidité. Concernant la résistance à la compression, l'impact des fibres est négligeable à jeune âge, mais une teneur et

une forme spécifiques (1,0 % de fibres à extrémités crochues et 0,5 % de fibres ondulées) peuvent l'améliorer à des âges plus avancés, tandis qu'une teneur excessive réduit cette résistance.

De plus, les fibres d'acier réduisent notablement le retrait de séchage et bien qu'elles aient un effet négligeable sur le module d'élasticité, elles atténuent significativement la déformation par fluage (jusqu'à 26 % de réduction) et augmentent les déformations de récupération instantanée et de fluage. En somme, l'ajout de fibres modifie les propriétés rhéologiques, mécaniques (résistance à la compression, fluage, module d'élasticité) et de durabilité (retrait, stabilité dimensionnelle) du béton de haute performance, lui conférant une stabilité dimensionnelle remarquablement élevée.



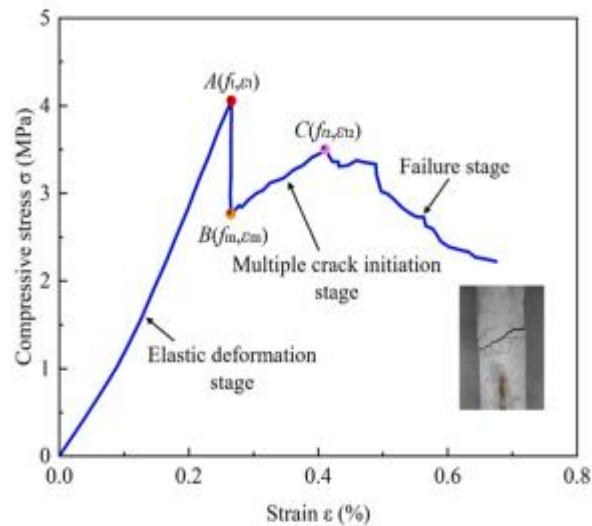
**Figure I.8 :** Morphologies typiques de rupture en compression du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d’aciers. [Jike Tan,2025]

Sous l’effet de la traction uniaxiale, le béton passe par trois phases principales. Il commence par une phase de déformation élastique où la relation contrainte-déformation reste linéaire sans apparition de microfissures. Cette phase se termine avec l’apparition de la première fissure dans les zones faibles, entraînant une chute soudaine de la contrainte et un changement de raideur.

Comme le montre l’étude de [J. Tan2025], elle est suivie par une seconde phase, caractérisée par le développement de microfissures grâce à la contribution des fibres d’acier dans le transfert des contraintes à travers celles-ci. L’énergie nécessaire à la formation de

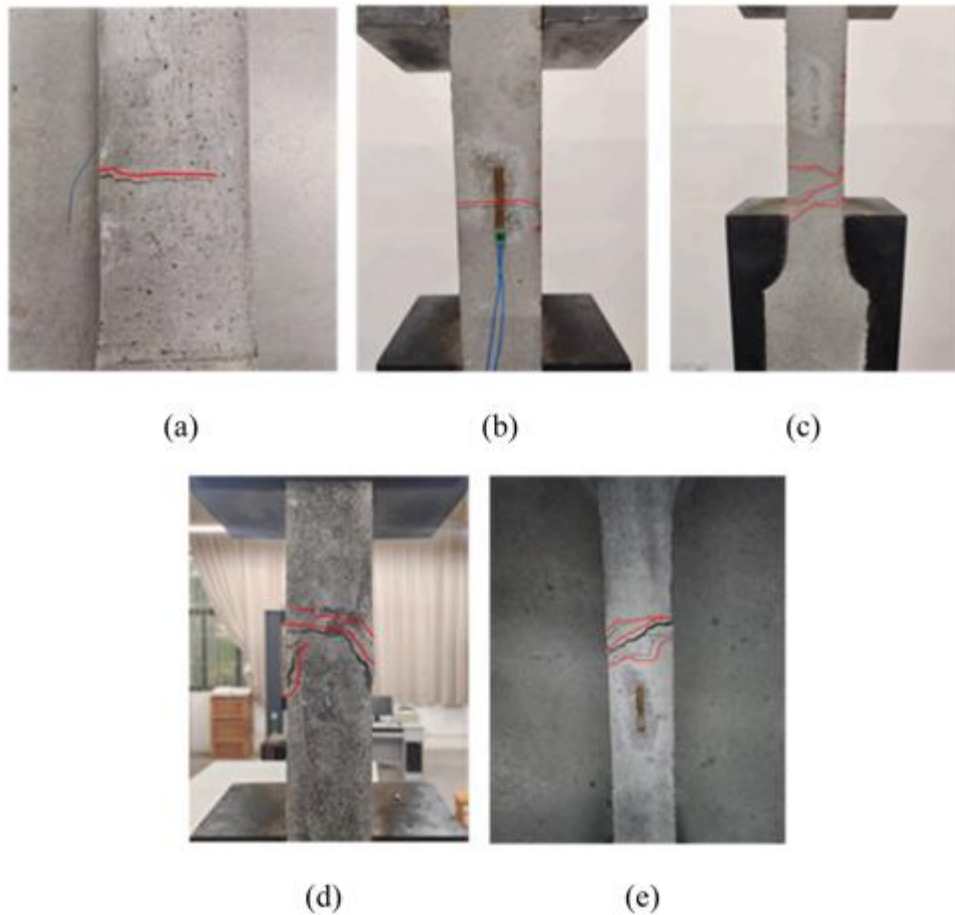
nouvelles fissures étant inférieure à celle requise pour élargir les fissures existantes, cela favorise la propagation multiple des ruptures. La contrainte continue d'augmenter jusqu'à atteindre un maximum au point C, où un comportement de durcissement par déformation devient apparent. Dans la troisième phase, la contrainte diminue progressivement avec l'augmentation de la déformation, en raison du relâchement de l'adhérence entre les fibres et la matrice de béton, ce qui entraîne le glissement des fibres et réduit leur efficacité à contenir l'élargissement des fissures visibles

Les résultats présentés par [J. Tan2025], illustrés dans les Figure I.9 et I.10, ont montré que les échantillons à faible teneur en fibres ( $V_{f} = 0,8\%$  et  $1,0\%$ ) ont présenté une fissure principale unique, tandis que ceux avec des teneurs plus élevées ( $V_{f} = 1,2\%$ ,  $1,4\%$  et  $1,6\%$ ) ont montré des fissures multiples, ce qui met en évidence le rôle des fibres dans l'amélioration de la résistance à la traction et le contrôle de la propagation des fissures.



**Figure I.9 :** Courbe typique contrainte- déformation en traction uniaxiale du BFRCC. [Jike Tan,2025]





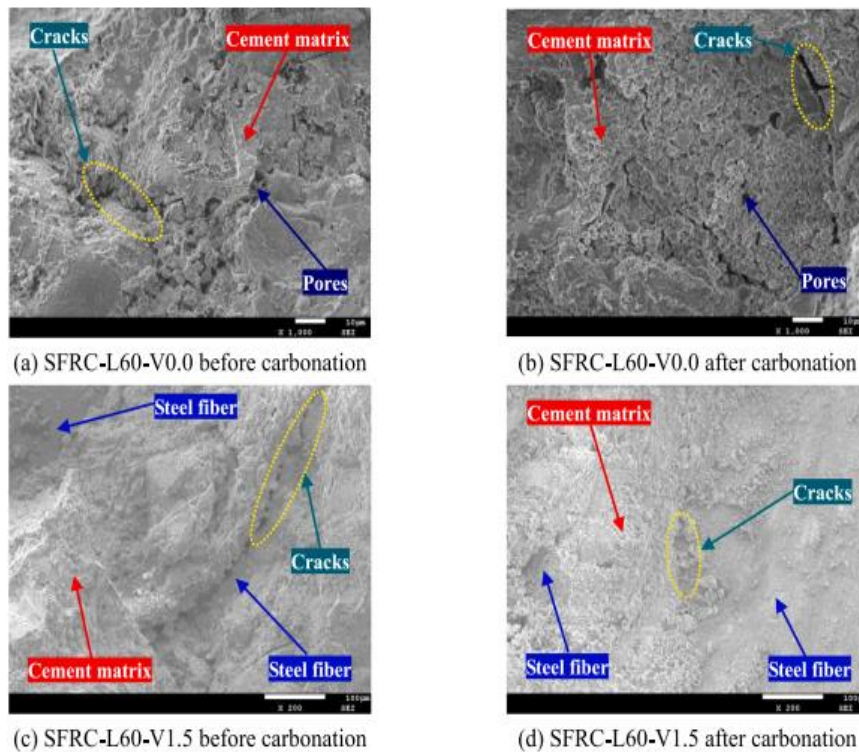
**Figure I.10 :** Etats typiques de rupture en traction du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'aciers. [Jike Tan,2025]

## I.5. Résultats et Discussion

### I.5.1. Effets de la Carbonatation Supercritique sur le BFUP (Béton de Fibres Ultra-Performantes)

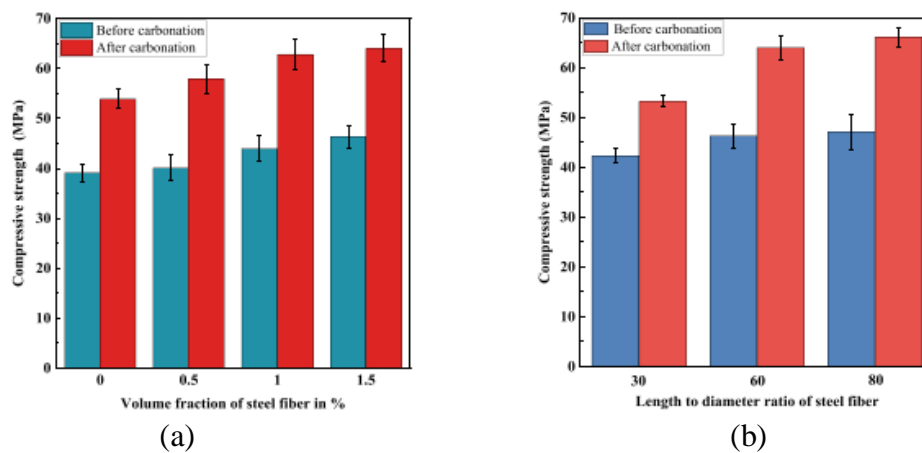
L'étude de [Hao . B, 2025] a montré que l'ajout de fibres d'acier améliore la résistance du Béton de Fibres Ultra-Performantes (BFUP) à la compression avant carbonatation Figure I.11. Des gains allant jusqu'à 18,4 % ont été observés lorsque la fraction volumique des fibres jusqu'à 1,5 % et leur rapport longueur/diamètre jusqu'à 80 sont élevés, un effet attribué à leur capacité à ponter les fissures.





**Figure I.11 :** Évolution Microstructurale du BFUP sous Carbonatation Supercritique [Hao .B, 2025]

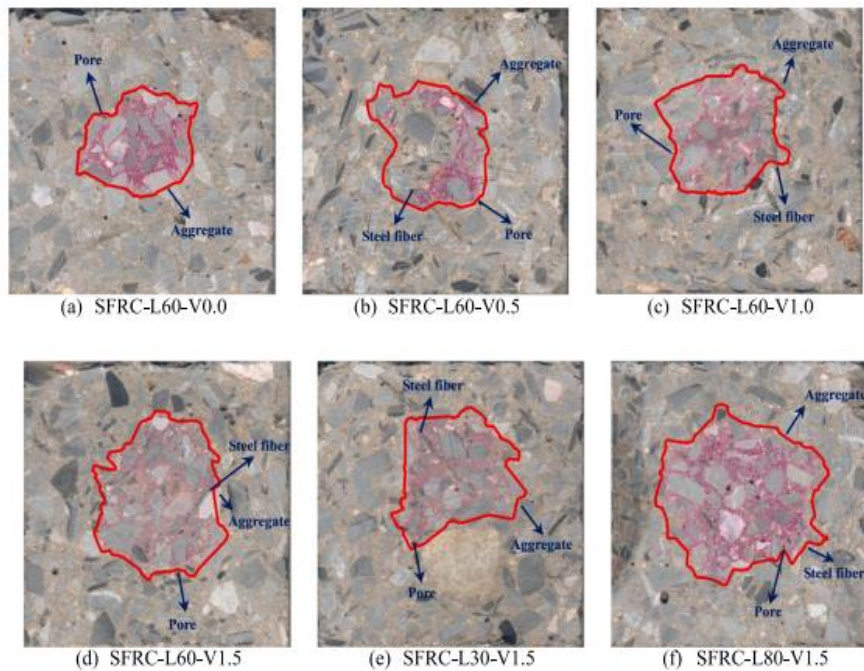
Suite à la carbonatation supercritique, le BFUP (Béton de Fibres Ultra-Performantes) comme indiquer dans la Figure I.12 voit sa résistance augmenter de façon encore plus marquée, entre 25,1 % et 42,7 %, grâce au dépôt de  $\text{CaCO}_3$  qui remplit les pores internes et les Ce phénomène densifie la matrice et renforce la structure, comme le confirme l'analyse microstructurale. Cette analyse révèle que la carbonatation réduit la quantité et la taille des microfissures et pores dans la matrice et aux interfaces fibres-matrice, où une carbonatation rapide des ZIT (Zone d'Interface de Transition) contribue à une liaison plus forte.



**Figure I.12 :** Influence des Fibres sur la Résistance [Hao Bao, 2025]

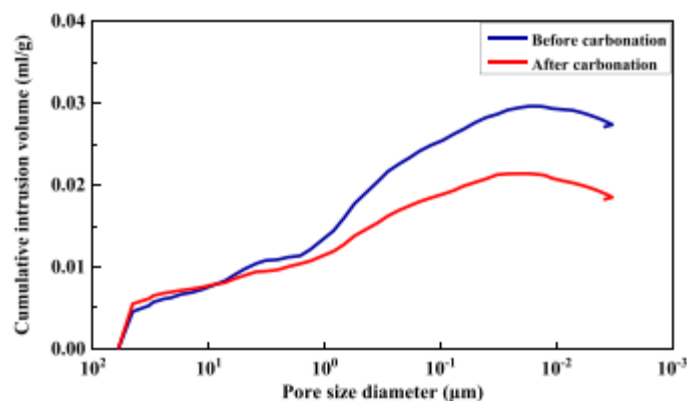
- a) Effet de la Fraction Volumique
- b) Effet du Rapport Longueur/Diamètre

La profondeur de carbonatation des échantillons de BFUP (Béton de Fibres Ultra-Performantes) soumis à des conditions de CO<sub>2</sub> supercritique, dans le cadre des essais menés par [Hao.B, 2025]. Les contours de carbonatation [Figure I.13](#) montrent que la répartition aléatoire de cette carbonatation est influencée non seulement par les agrégats grossiers et les pores de la matrice, mais aussi de manière significative par la présence des fibres d'acier.



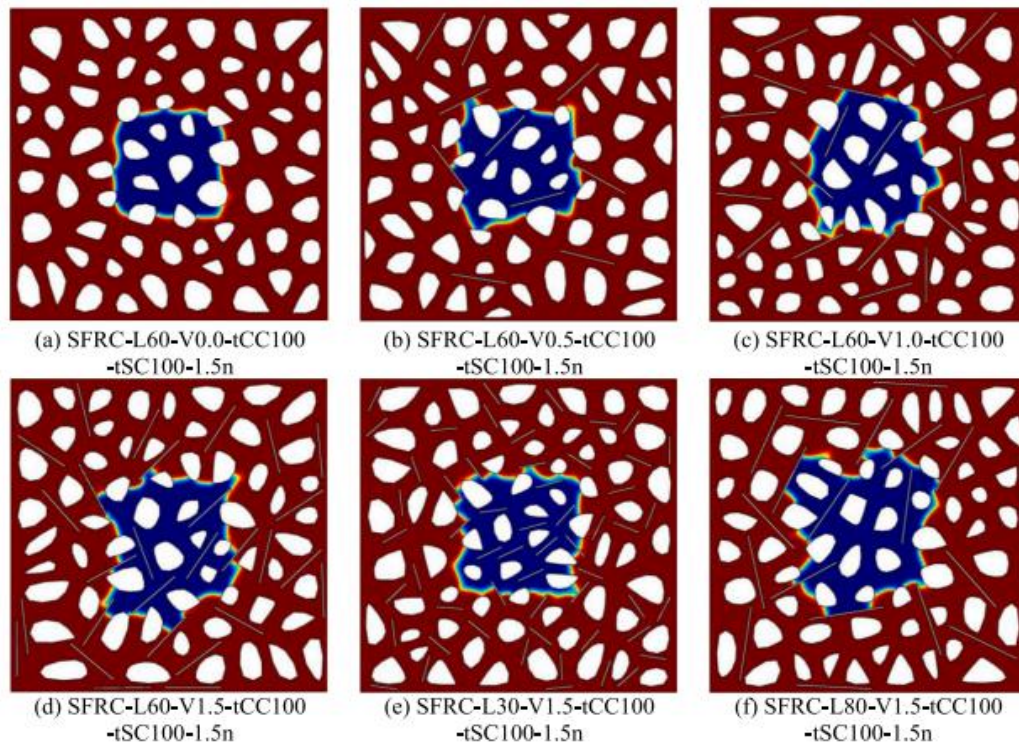
**Figure I.13 :** Influence des Fibres sur la Carbonatation du BFRA [Hao .B, 2025]

Pour quantifier l'impact des fibres, une analyse statistique de la profondeur de carbonatation a été menée en utilisant MATLAB R2014a, dont les courbes de distribution sont présentées à [Figure I.14](#).



**Figure I.14 :** Courbes de Porosimétrie au Mercure pour le BFRA-L60-V1.5 avant et après Carbonatation Supercritique [Hao. B,2025].

L'étude de [Hao. B, 2025] explore aussi l'impact de la fraction volumique et du ratio longueur/diamètre des fibres d'acier sur la profondeur de carbonatation supercritique du béton fibré à renfort d'acier comme présenté dans la Figure I.15 .



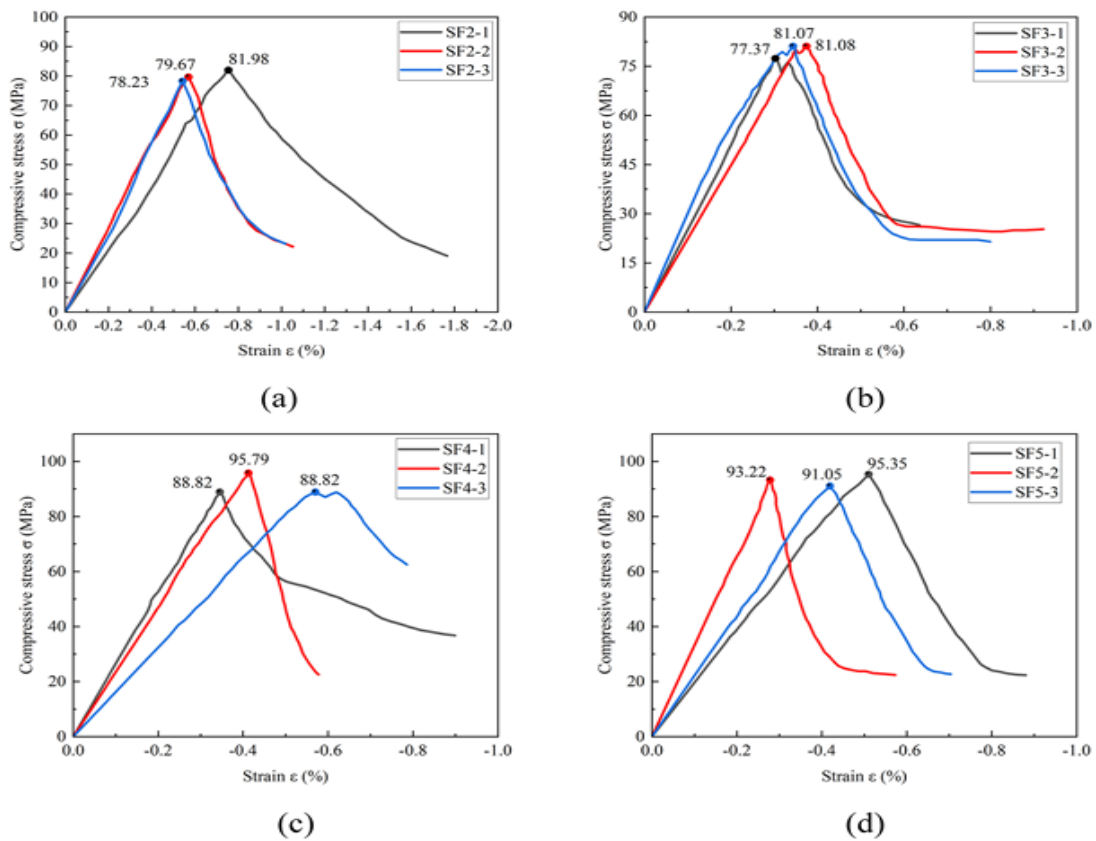
**Figure I.15 :** Profils de carbonatation supercritique du béton fibré à l'acier (SFRC) avec différentes fractions volumiques et rapports longueur/diamètre des fibres d'acier. [Hao. B,2025]

**Remarque :** En prenant SFRC-L60-V1.5-tCC100-tSC100–1.5 n comme exemple, tCC100 et tSC100 représentent respectivement l'épaisseur de la zone de transition interfaciale (ITZ) entre la matrice cimentaire et les granulats grossiers, et entre la matrice cimentaire et les fibres d'acier, toutes deux mesurant 100 mm ; 1.5 n désigne la porosité de l'ITZ, équivalente à 1,5 fois celle de la matrice cimentaire

[Hao. B, 2025] a mené des simulations numériques en fixant l'épaisseur de la zone de transition interfaciale (ZTI) à 100  $\mu\text{m}$ . Ses résultats montrent que la présence de fibres accroît l'irrégularité de la carbonatation. De plus, augmenter la fraction volumique des fibres réduit la profondeur moyenne de carbonatation du BFRA, une amélioration attribuée à la diminution des fissures de retrait plastique et de la porosité. Similairement, l'augmentation du ratio longueur/diamètre des fibres entraîne également une réduction de cette profondeur, grâce à un meilleur pontage des fissures et une amélioration de la microstructure du béton. Ces observations soulignent l'importance de la configuration des fibres pour optimiser la résistance du BFRA à la carbonatation. L'étude mentionne également la difficulté d'étudier

expérimentalement l'effet de l'épaisseur et de la porosité de la ZTI en raison de leur taille micrométrique.

Les travaux de [Jike. T ,2025] ont démontré que la courbe contrainte-déformation en compression uniaxiale Figure I.16 se divise en trois étapes majeures : une étape linéaire élastique, qui est suivie d'une chute abrupte après l'atteinte du seuil de contrainte maximale, puis une phase de résistance résiduelle maintenue par les forces de friction et d'adhérence persistantes entre les fibres et la matrice.

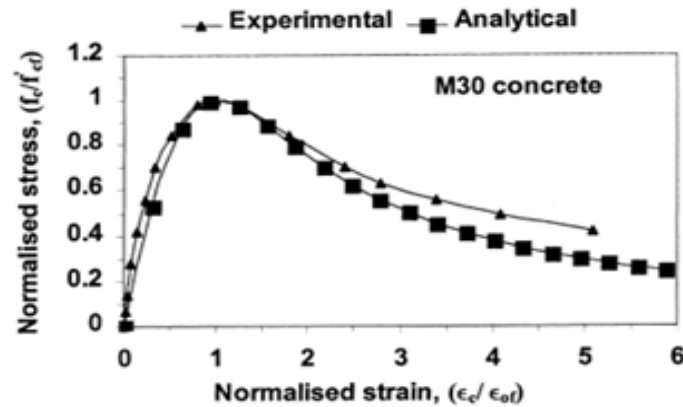


**Figure I.16** : Courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'acier (a)  $V_f = 1.0\%$ ; (b)  $V_f = 1.2\%$ ; (c)  $V_f = 1.4\%$ ; (d)  $V_f = 1.6\%$ . [Jike. T ,2025]

[Nataraja, M.C,1999] ,qui ont mené une étude visant à fournir une description précise des courbes de contrainte-déformation du béton renforcé de fibres d'acier sous compression, ont noté une séquence semblable, mais avec une phase post-maximum plus graduelle.

La Figure I.17 illustre que ce comportement résiduel est dû à l'apport des fibres qui assurent la cohésion et évitent une rupture brusque.





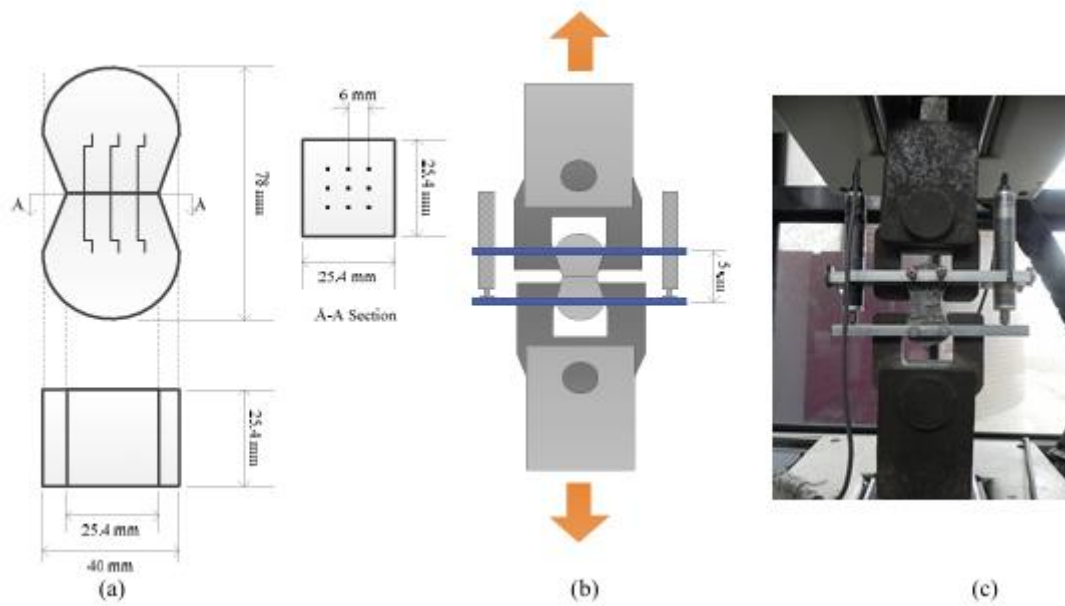
**Figure I.17 :** Courbes contrainte-déformation normalisées pour le béton renforcé de fibres d'acier (rapport d'aspect = 55, fraction volumique = 0,75 %). [Nataraja, M.C,1999]

[Jike. T,2025 ] a démontré que les pics de contrainte et de déformation se sont produits à des taux de fibres  $V_f = 1,2\%$  et  $1,4\%$ , malgré une légère variation notée au sommet du graphique, particulièrement sur la courbe c). Ceci l'a conduit à utiliser la normalisation sans dimension pour diminuer la dispersion des informations.

Ces résultats correspondent à ceux de l'étude de [ Liao et al,2015] qui visait à élaborer un modèle précis de la relation contrainte-déformation pour un béton fibré à haute résistance. Cette étude a illustré, via la figure I.18 et le tableau I.4, que l'accroissement du taux de fibres jusqu'à environ  $1,4\%$  améliore tant la contrainte que la déformation maximale.

**Tableau I.4 :** Dosage du mélange des éprouvettes en béton renforcé de fibres d'acier ( $\text{kg/m}^3$ ) [ Liao et al,2015]

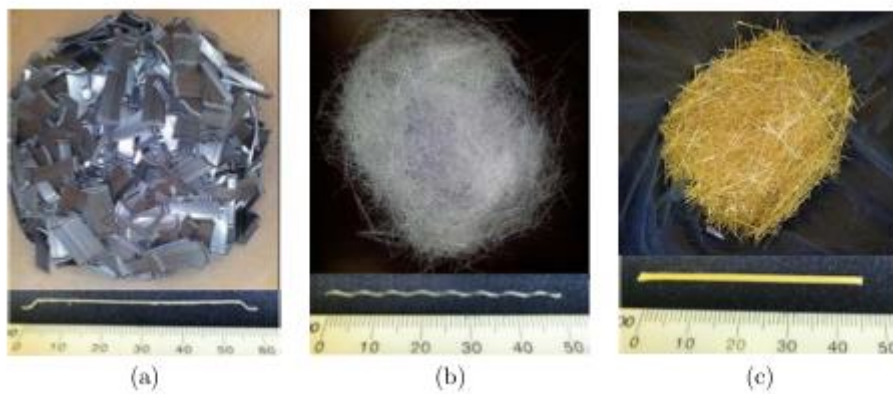
ID	28-day compressive strength target value (MPa)	Fibre volume fraction (%)	cement	slag	Silica fume	water	Course aggregate	Fine aggregate	Steel fibre	SP
H0	80	0.00	365.0	285.0	50.0	163.8	866.0	647.0	0.0	4.5
H0.75		0.75	362.3	282.9	49.6	162.6	859.5	642.2	58.9	4.5
H1		1.00	361.4	282.2	49.5	162.2	857.3	640.5	78.5	4.5
H1.5		1.50	359.5	280.7	49.2	161.3	853.0	637.3	117.8	4.5



**Figure I.18 :** (a) Géométrie de l'éprouvette, (b) Schéma du dispositif d'essai

(c) Documentation du montage d'essai. [ Liao et al,2015]

En revanche, l'analyse conduite par [S.M. Ibrahim,2016], qui cherchait à examiner le comportement du béton armé de fibres hybrides exposé à différentes vitesses de chargement, a révélé que l'emploi des mêmes proportions dans les mélanges hybrides conduisait à une diminution significative de la résistance après le pic, due à un affaiblissement de l'adhérence entre les fibres et la matrice, comme le démontre la figure I.19 de leur étude, mettant ainsi en exergue une réaction différente liée aux caractéristiques et à l'interaction des fibres.

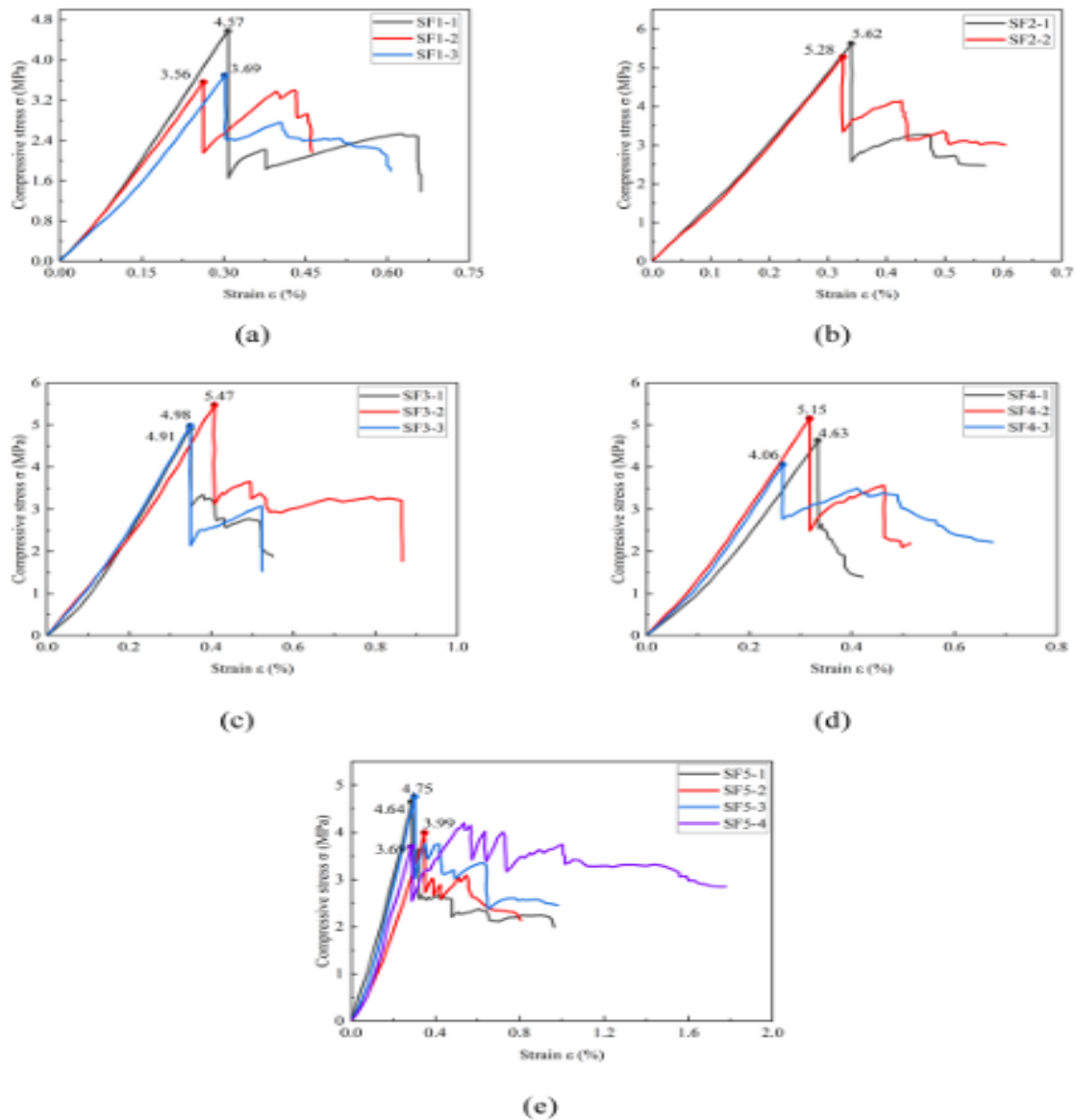


**Figure I.19 :** Fibres utilisées dans l'étude [S.M. Ibrahim,2016],

- a) Fibres d'acier à crochets.
- b) Fibres de polypropylène crêpées monofilament .
- c) Fibres de Kevlar.

Concernant la traction uniaxiale Figure I.20, [ Jike. T ,2025] a souligné une propriété de renforcement par déformation dans la plupart des échantillons, et l'échantillon possédant un

taux de fibres  $V_f = 1,0\%$  a montré les meilleures performances en ce qui concerne la contrainte maximale et la déformation. Elle a attribué cette conduite à une distribution équilibrée des fibres au sein de la matrice, assurant par conséquent une solide cohésion mécanique.



**Figure I.20 :** Courbes contrainte-déformation en traction uniaxiale du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'acier. [ Jike. T ,2025]

- a)  $V_f = 0,8\%$ .
- b)  $V_f = 1,0\%$ .
- c)  $V_f = 1,2\%$ .
- d)  $V_f = 1,4\%$ .
- e)  $V_f = 1,6\%$ .

Cette constatation est en accord avec les conclusions de [Yang et al. ,2006], qui ont révélé dans leur recherche sur les courbes contrainte-déformation du béton fibré à haute résistance soumis à une traction unidimensionnelle que des taux de fibres avoisinant  $1,0\%$  montrent un

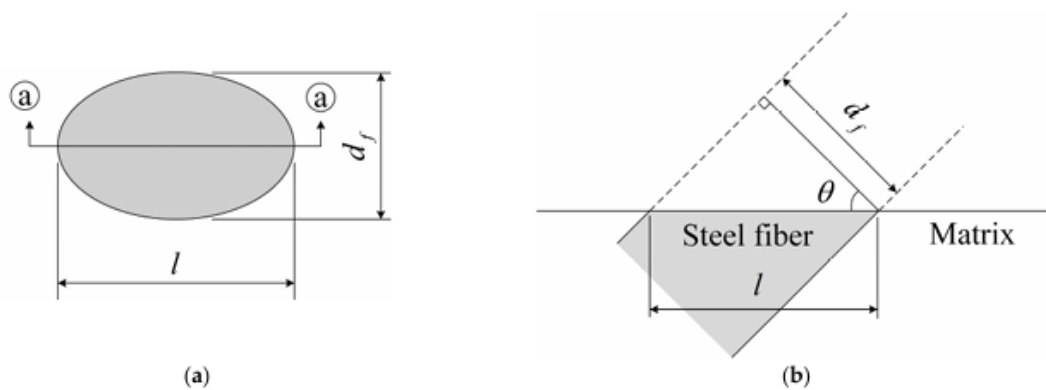
comportement de durcissement avant l'apogée, confirmant ainsi l'importance d'une répartition homogène pour améliorer les performances structurelles.

Comme le démontre le [tableau I.5](#) élaboré par [\[Jike .T, 2025\]](#) une fraction volumique de fibres élevée ( $V_f = 1,4 \%$  et  $1,6 \%$ ) est associée à une hausse des écarts-types aux points critiques A, B et C. Cela indique une distribution inégale des fibres qui influence la constance des performances.

**Tableau I.5 :** Écart type et intervalles de confiance à 95 % des valeurs de résistance aux points A, B et C sur les courbes contrainte-déformation en traction du béton avec différentes fractions volumiques de fibres d'acier. [\[ Jike. T ,2025\]](#)

Volume fraction (%)	Point A		Point B		Point C	
	Standard deviations	Confidence intervals	Standard deviations	Confidence intervals	Standard deviations	Confidence intervals
$V_f = 0.8$	0.40	3.59 – 4.37	0.13	2.10 – 2.45	0.31	2.64 – 3.49
$V_f = 1.0$	0.17	5.18 – 5.57	0.39	2.42 – 3.50	0.42	3.11 – 4.28
$V_f = 1.2$	0.22	4.93 – 5.35	0.03	3.05 – 3.13	0.24	3.09 – 3.63
$V_f = 1.4$	0.45	4.10 – 5.11	0.12	2.46 – 2.73	0.42	2.76 – 3.71
$V_f = 1.6$	0.44	3.83 – 4.69	0.19	2.54 – 2.90	0.45	2.66 – 3.67

Cette observation est corroborée par la recherche de [\[Zhao,Y.,2023\]](#), qui a prouvé, grâce à une analyse expérimentale et visuelle, qu'une augmentation du taux de fibres provoque une répartition inégale dans le béton. La [Figure I.21](#) de leur recherche illustre parfaitement cet effet en exhibant la distribution des fibres pour différentes valeurs de  $V_f$ .

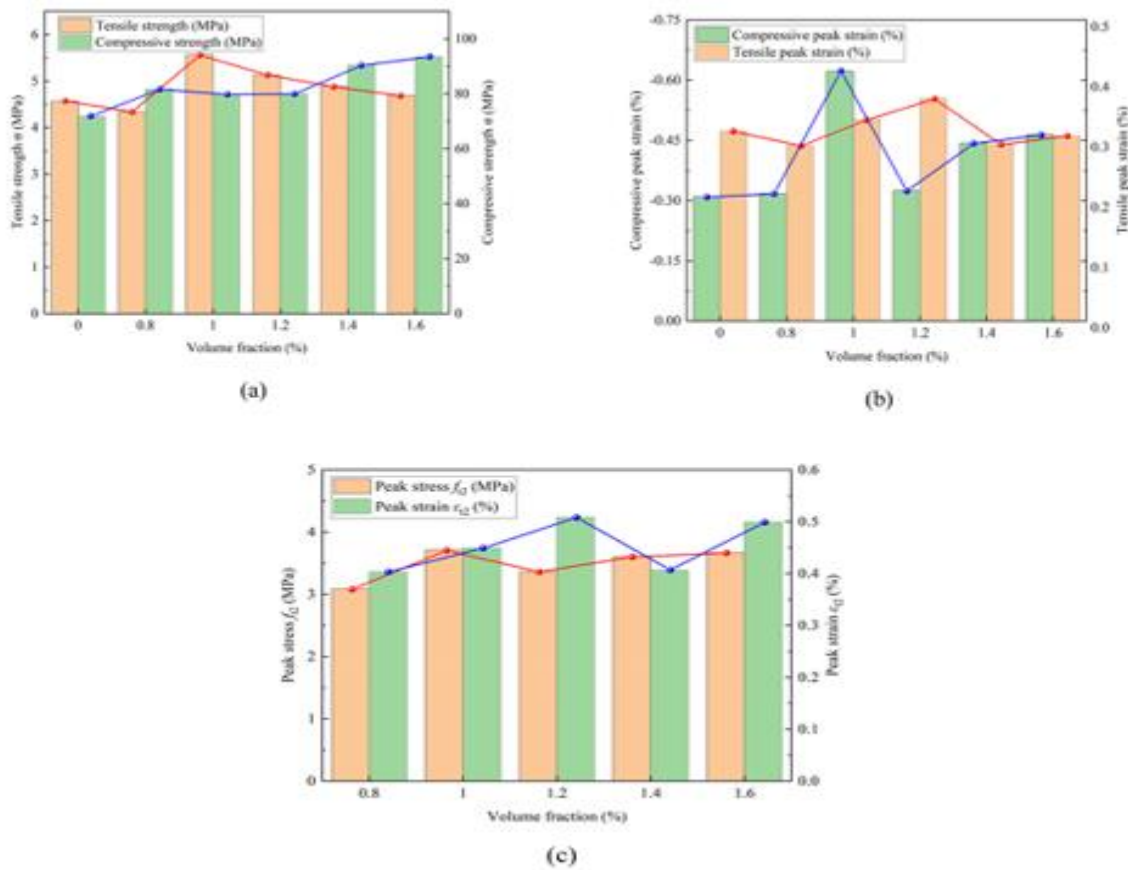


**Figure I.21 :** Section transversale d'une fibre inclinée et sa relation avec la matrice de béton[\[Zhao,Y.,2023\]](#)

- a) Une fibre unique
- b) Section a-a.

Dans la [figure I.22](#), [\[Jike.T,2025\]](#) a démontré que pour un taux de fibres  $V_f = 1,0 \%$ , la résistance à la traction a surpassé de  $13,9 \%$  à  $18,7 \%$  celle des échantillons avec  $V_f = 1,4 \%$  et  $1,6 \%$ . Par ailleurs, la déformation en compression à ce même pourcentage a montré une hausse significative de  $91,7 \%$  comparativement à l'échantillon avec un  $V_f = 1,2 \%$ .





**Figure I.22 :** Relation entre les performances mécaniques du béton renforcé de fibres d'acier (SFRC) et la variation de la fraction volumique de fibres d'acier. [Jike.T,2025]

- Relation entre les résistances à la traction et à la compression et la variation de la fraction volumique .
- Relation entre les déformations maximales en traction et en compression et la variation de la fraction volumique .
- Relation entre la deuxième contrainte de traction maximale et la déformation, et la variation de la fraction volumique.

Ces conclusions coïncident en partie avec celles de l'étude de [Rizzuti et Bencardino, 2024], qui avait pour but d'examiner l'impact du taux de fibres sur la résistance à la compression et le comportement en déformation du béton armé de fibres. Les expérimentations ont démontré une augmentation de la résistance à la compression de 4,35 % à  $V_f = 1,0$  %, alors que la déformation finale à  $V_f = 1,6$  % était approximativement cinq fois supérieure à celle du béton sans renforcement, attestant l'efficacité des portions modérées de fibres pour améliorer simultanément la résistance et la ductilité.

Pour la modélisation structurelle, [Jike. T,2025] a employé des équations descendantes, détaillées dans le [tableau I.6](#), pour reproduire le comportement en tension post-fissuration du

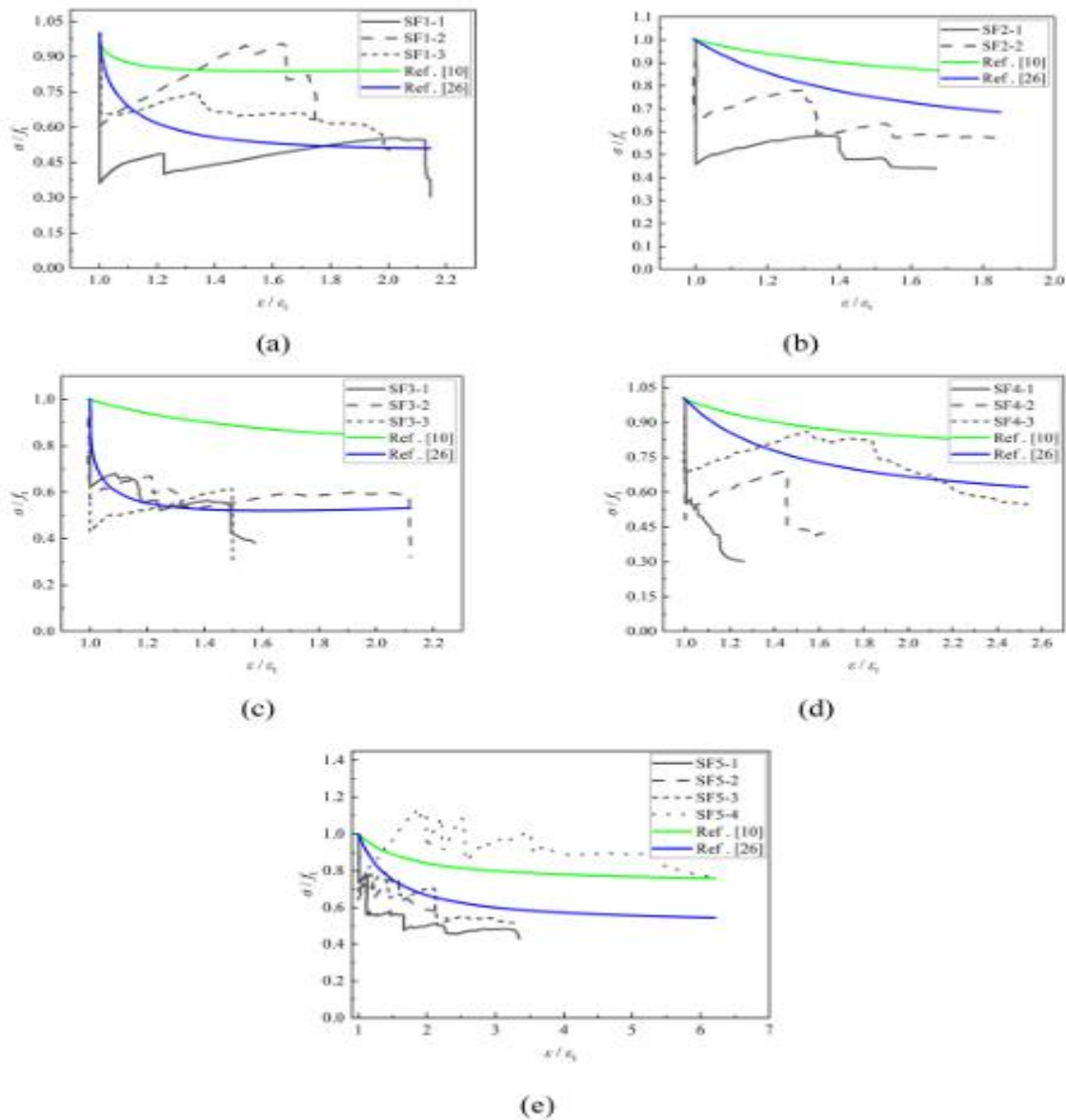
béton renforcé par des fibres. Il a confronté les courbes théoriques aux données expérimentales afin de juger la précision du modèle choisi. De façon analogue, mais avec un degré de détail mécanique plus approfondi.

**Tableau I.6 :** Formes du segment descendant dans les équations constitutives en traction pour différents bétons renforcés de fibres d'acier (SFRC). [Jike. T,2025]

Types of steel fibres	Descending segment forms of uniaxial tensile constitutive equations for different SFRC
Steel-polypropylene hybrid fibres	$y = \frac{x}{0.38(x-1)^n + x}$
Steel-polyvinyl alcohol hybrid fibres	$y = \frac{x}{\alpha(x-1)^\beta + x}$
Cylindrical straight steel fibres	

Selon [Wang et al, 2021] un modèle méso-mécanique a été élaboré, intégrant l'interaction entre les fibres et la matrice de béton lors des ruptures. Les données de la simulation issues de ce modèle ont démontré une correspondance significative avec les résultats expérimentaux, illustrant l'aptitude du modèle à dépeindre fidèlement le comportement effectif du béton renforcé par des fibres suite à la fissuration.

Selon la figure I.23 mise en avant par [Jike. T,2025] les modèles conventionnels ne parviennent pas à illustrer fidèlement le comportement du béton renforcé de fibres d'acier (SFRC), notamment durant les phases de durcissement et d'adoucissement post fissuration. Cela souligne l'importance d'élaborer un modèle structural spécifiquement destiné à ce genre de béton.

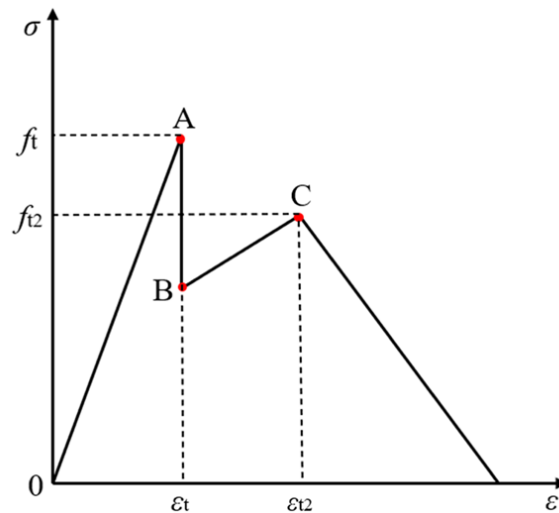


**Figure I.23 :** Comparaison des segments descendants entre les équations constitutives et les courbes expérimentales pour différents bétons renforcés de fibres d'acier (SFRC). [Jike. T,2025]

- a)  $V_f = 0.8 \%$ .
- b)  $V_f = 1.0 \%$ .
- c)  $V_f = 1.2 \%$ .
- d)  $V_f = 1.4 \%$ .
- e)  $V_f = 1.6 \%$ .

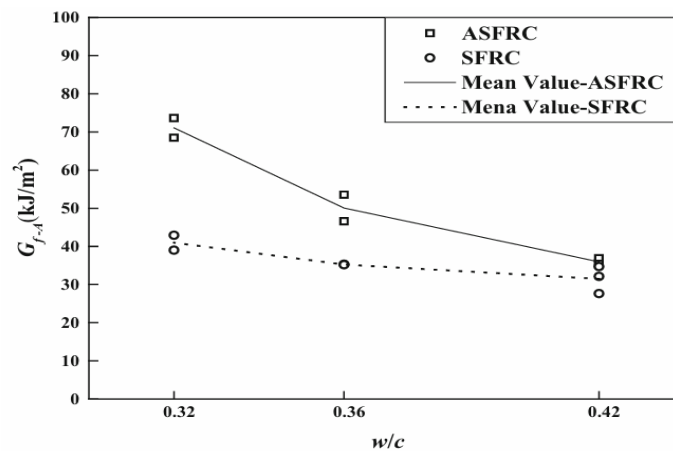
Cette perspective est aussi appuyée par la recherche de [Fu et al,2014] qui a démontré, via des tests de flexion à trois points, que les caractéristiques de rupture et de déformation du SFRC se développent de façon complexe durant les premières phases de durcissement. De plus, les modèles numériques progressés, comme ceux basés sur la méthode des éléments finis, reflètent mieux ce comportement que les modèles traditionnels. Cela met en évidence la nécessité d'avoir des modèles structuraux plus précis spécifiquement conçus pour ce matériau.

Selon des résultats expérimentaux, [Jike. T, 2025 ] a suggéré une nouvelle courbe contrainte-déformation dépeinte dans la Figure I.24. Cette courbe illustre les trois phases successives du comportement du béton armé de fibres d'acier (SFRC) lors de la traction : l'élasticité, l'écroutissage, et enfin l'adoucissement. Ce modèle offre une fondation prometteuse pour la conception et l'examen non linéaire des structures renforcées de fibres.



**Figure I.24 :** Courbe typique contrainte-déformation en traction uniaxiale pour le béton renforcé de fibres d'acier (SFRC). [Jike. T,2025]

L'approche a été appuyée par la recherche de [Qing. L, 2019] qui avait pour objectif d'analyser le comportement du béton renforcé par des fibres d'acier orientées sous traction uniaxiale. La Figure I.25 a révélé que les échantillons dotés de fibres orientées ont démontré une phase d'écroutissage prononcée suite à la fissuration, ce qui renforce l'aptitude du matériau à l'énergie et valide le modèle triphasé suggéré par Tan.



**Figure I.25 :** Effet du rapport eau/ciment ( $w/c$ ) sur le  $G_{f-A}$  des éprouvettes en SFRC et ASFRC avec  $V_f = 2,0 \%$ . [Qing. L, 2019]

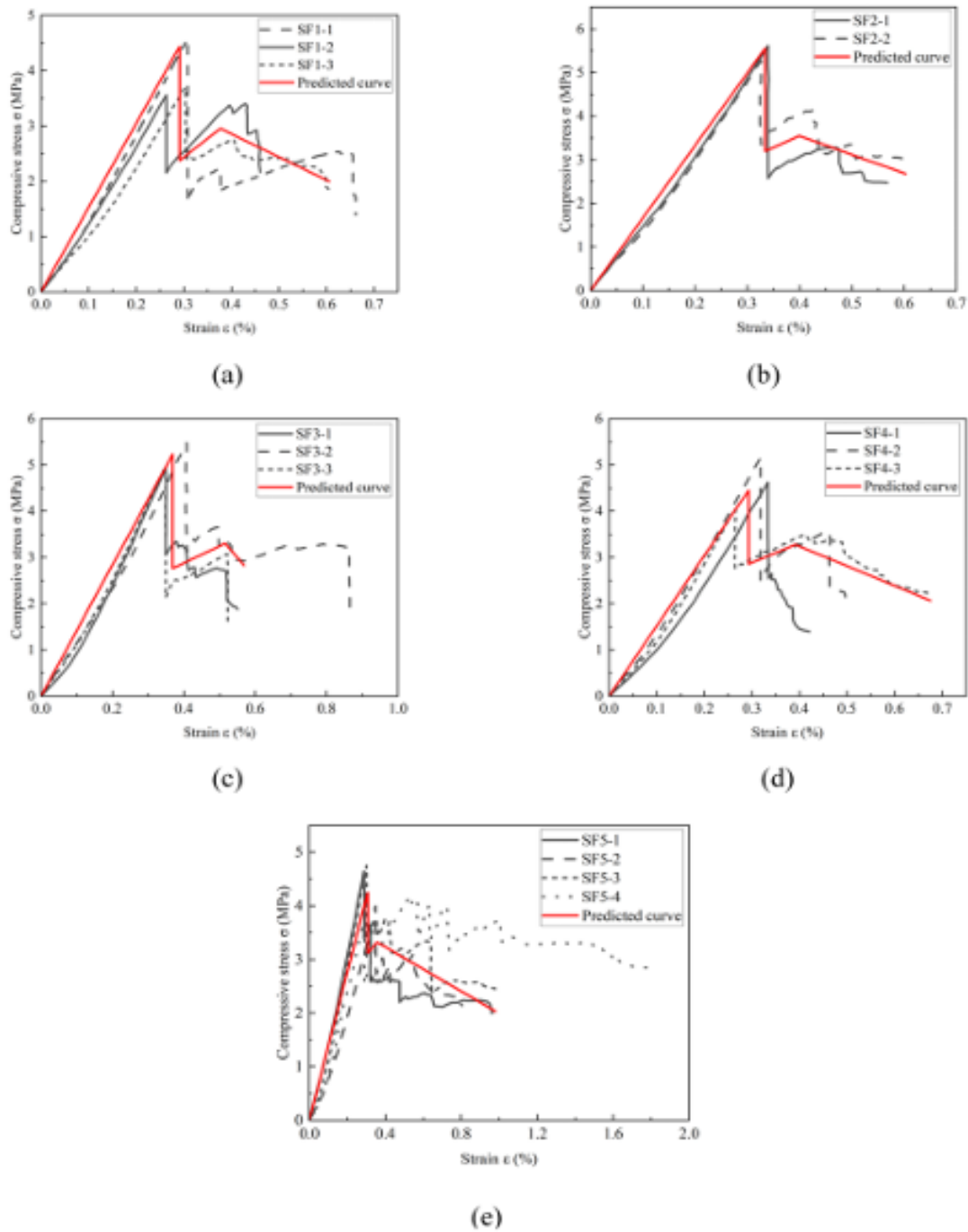
La recherche de [Ding .X.,2021] sur le comportement du béton autocompactant renforcé par des fibres d'acier a aussi démontré qu'une élévation du pourcentage de fibres améliore tant la solidité à la traction que la déformation lors de la rupture. Ce fait est illustré dans le [tableau I.7](#), où les mélanges riches en fibres affichent des valeurs plus hautes de  $f_t$  et  $\varepsilon_t$ , soutenant l'idée d'une phase d'adoucissement post-pic selon Tan.

**Tableau I.7** : Résultats des essais de résistance et de déformation en traction axiale. [Ding .X.,2021]

Item	SCC	HFb04	HFb08	HFb12	HFb14	HFa12	HFc12
Strengths							
$f_{fcr}$ (MPa)	4.59	4.77	5.08	5.55	5.65	5.69	5.52
$f_{fa}$ (MPa)	-	-	-	5.66	5.59	5.66	5.64
$f_{at}$ (MPa)	4.59	4.77	5.08	5.66	5.65	5.69	5.64
Corresponding strains							
$\varepsilon_{fcr}$ ( $10^{-6}$ )	63.3	95.3	81.4	91.7	70.3	103.4	102.6
$\varepsilon_{fa}$ ( $10^{-6}$ )		-	-	101.1	73.5	133.3	160.3
$\varepsilon_{at}$ ( $10^{-6}$ )	63.3	95.3	81.4	101.1	70.3	103.4	160.3

Par contre, l'étude menée par [Bai. W, 2021] ,ayant pour but de concevoir un modèle mésoscopique de dommage pour imiter le comportement du SFRC sous tension, s'est basée sur les données expérimentales précédentes fournies par [ Han .R, 2006] Elle a suggéré un point de vue différent : la courbe contrainte-déformation va directement du sommet à la phase d'adoucissement, sans phase distincte d'écrouissage. Cela souligne que certaines compositions ne manifestent pas forcément un comportement semblable, selon la répartition des fibres et les caractéristiques de la matrice.

Selon [Jike. T, 2025] basé sur des résultats expérimentaux et théoriques, la [Figure I.26](#) illustre que la courbe de contrainte-déformation en traction uniaxiale comporte quatre phases distinctes : linéaire, déclin abrupt, durcissement par déformation et finalement adoucissement. Le modèle suggéré reflète fidèlement ces étapes, affichant une correspondance significative entre les points A, B et C de la courbe expérimentale et celle théorique.



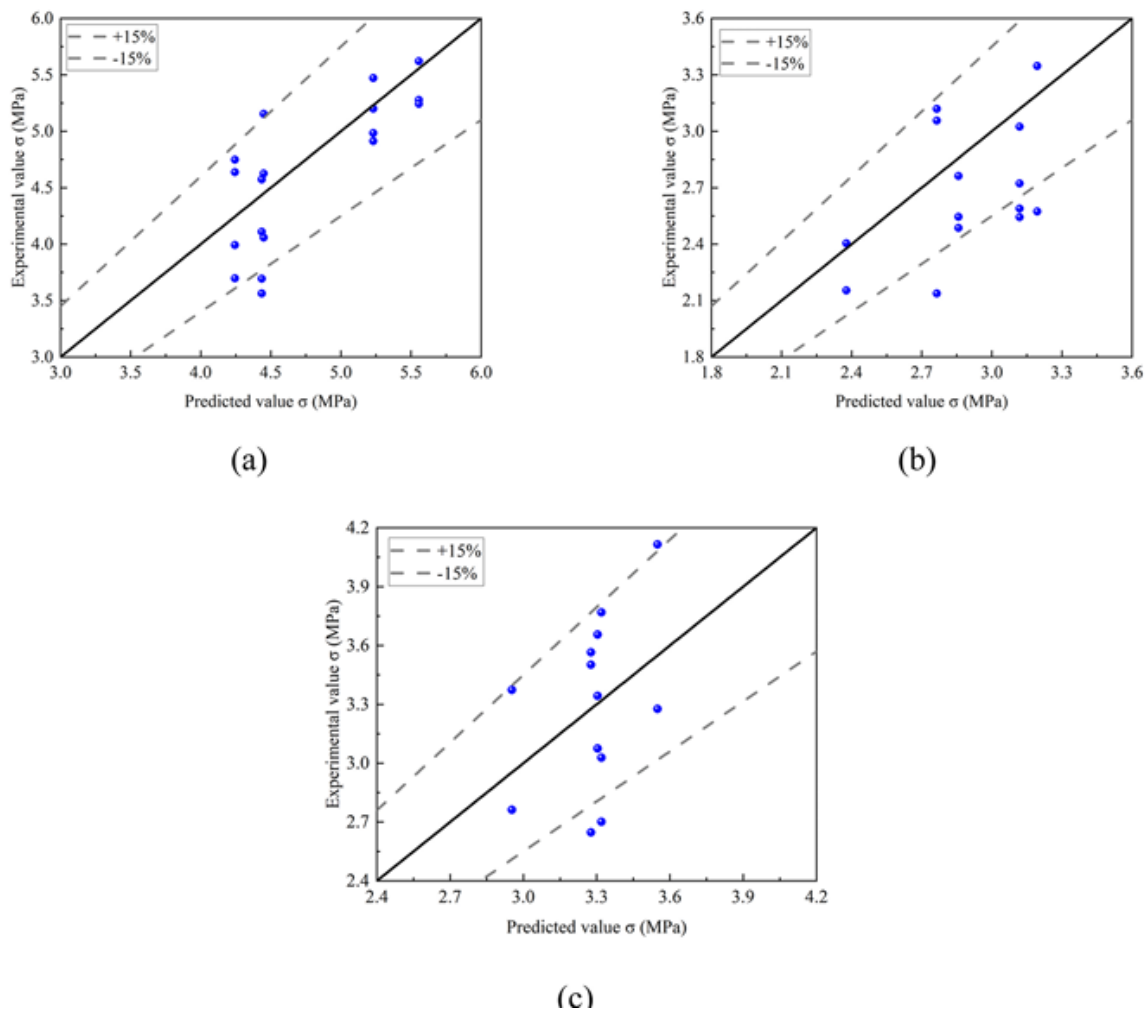
**Figure I.26 :** Comparaison des courbes contrainte-déformation entre l'essai de traction uniaxiale et les courbes prédites pour le béton renforcé de fibres d'acier (SFRC) avec différentes fractions volumiques. [Jike. T, 2025]

- a)  $V_f = 0.8 \%$ .
- b)  $V_f = 1.0 \%$ .
- c)  $V_f = 1.2 \%$ .
- d)  $V_f = 1.4 \%$ .
- e)  $V_f = 1.6 \%$ .

Cette observation est appuyée par la recherche de [Bernardi .P, 2013], qui a cherché à élaborer une modélisation numérique non linéaire pour la phase post-fissuration des éléments en béton renforcé de fibres d'acier (SFRC). La validation s'est faite par le biais d'une

comparaison avec les résultats expérimentaux, attestant ainsi de sa fiabilité dans l'analyse structurale avancée.

Selon [Jike. T, 2025] comme illustré dans la Figure I.27, le modèle suggéré dépeint fidèlement la courbe de contrainte-déformation en traction unidimensionnelle du béton renforcé de fibres. Elle a signalé que les écarts aux points critiques A, B et C ont atteint  $\pm 15\%$ , une variation qu'elle a attribuée à une distribution inégale des fibres dans la matrice du béton.

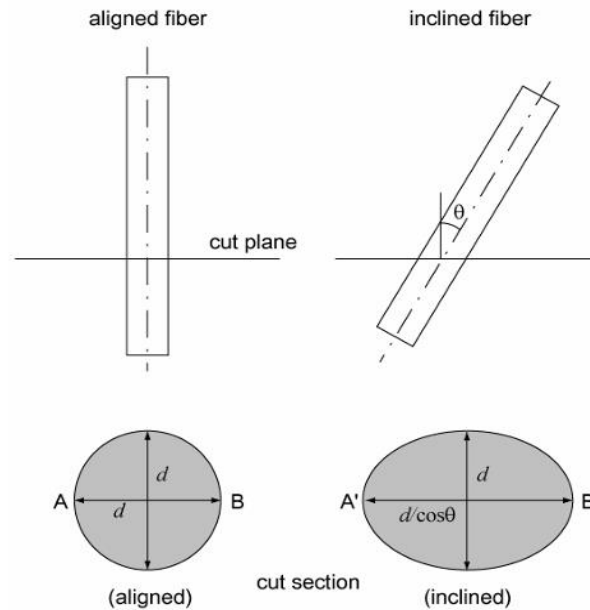


**Figure I.27 :** Diagramme d'erreur entre les valeurs prédites et expérimentales aux points clés des courbes contrainte-déformation en traction uniaxiale du SFRC. [Jike. T, 2025]

- a) Erreur au point A .
- b) Erreur au point B .
- c) Erreur au point C.

L'étude de [Choi , M.S, 2016], qui visait à élaborer un modèle numérique reflétant fidèlement le comportement du béton renforcé par des fibres d'acier sous traction uniaxiale et

à estimer l'impact de la répartition des fibres, a confirmé ces résultats. La Figure I.28 a démontré une correspondance solide entre les courbes issues des expériences et celles prévues théoriquement, dans une marge de fluctuation identique de  $\pm 15\%$ .



**Figure I.28 :** Schéma illustrant la méthode de calcul de l'angle d'inclinaison des fibres. [Choi, M.S., 2016]

De plus, la recherche de [Martinelli, P., 2021] centrée sur l'analyse de l'influence statistique de la répartition des fibres sur les caractéristiques mécaniques du béton armé et fondée sur l'étude de 192 échantillons, a corroboré que cette distribution inégale entraîne des fluctuations de performance jusqu'à  $\pm 15\%$ . Cela est illustré par le tableau I.8, mettant en évidence la nécessité d'incorporer les propriétés micromécaniques dans les modèles analytiques.

**Tableau I.8 :** Résistances nominales moyennes pour (UTTs), (DEWSTs) et (DPTs) avec le coefficient de variation (CV %) [Martinelli, P., 2021]

Test type (number of tests)	$f_{ct}$ (MPa)	$f_{R0.5}$ (MPa)	$f_{R1.5}$ (MPa)	$f_{R2.5}$ (MPa)
UTT ( $n_s = 7$ )	3.67 (7.73%)	1.49 (48.0%)	0.74 (36.7%)	0.44 (34.2%)
DEWST ( $n_s = 30$ )	3.00 (19.2%)	1.03 (47.9%)	0.78 (58.7%)	0.71 (65.6%)
DPT ( $n_s = 41$ )	3.15 (5.07%)	1.10 (24.6%)	0.54 (33.1%)	0.39 (40.6%)

- UTTs : les essais de traction uniaxiale
- DEWSTs : les essais de flexion à ouverture de fissure déformée
- DPTs : les essais de traction directe

[J, Tan, 2025] a mis l'accent sur la nécessité de vérifier l'exactitude des modèles structurels classiques [Guo., 2013, Carreira, Chu., 1985, Wee., Chin., 1996] dans la modélisation de la relation contrainte-déformation du béton armé de fibres d'acier (SFRC), en utilisant ces



mêmes modèles pour les courbes expérimentales, comme indiqué dans le [tableau I.9](#). Elle a souligné les contraintes de ces modèles lorsqu'ils sont employés pour étudier le comportement de matériaux composites complexes.

**Tableau I.9 :** Modèle constitutif typique en compression du béton. [\[J,Tan.,2025\]](#)

Model	Equations of compressive constitutive model
Guo's model	$\begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, & (0 \leq x < 1) \\ \frac{x}{b(x - 1)^2 + x}, & (x \geq 1) \end{cases}$
Carreira and Chu's model	$y = \frac{\beta x}{\beta - 1 + x^\beta}$
Wee's model	$y = \frac{k_1 \beta x}{k_1 \beta - 1 + x^{k_2 \beta}}$

Cette perspective correspond aux résultats de [\[Abbas ,Y.,2022\]](#) qui ont examiné la capacité des modèles classiques à illustrer la relation de compression du béton renforcé par des fibres hybrides. L'analyse qu'ils ont menée a révélé que ces modèles ne réussissent pas toujours à représenter fidèlement l'effet réel de l'interaction des fibres dans la matrice cimentaire. Cela met en évidence le besoin de concevoir des relations structurelles spécifiques qui prennent en compte la variabilité des caractéristiques des fibres.

Selon l'étude de [\[Jike .T, 2025\]](#) les trois modèles analysés ont tendance à surestimer la portion ascendante de la courbe contrainte-déformation du béton armé de fibres d'acier (SFRC). Elle a particulièrement noté que le paramètre « a » dans le modèle de Guo (2013) ne se trouvait pas dans la plage suggérée, allant de 1,5 à 3, ce qui restreint l'exactitude de ce modèle pour illustrer le comportement structurel du béton sous compression.

En revanche, l'étude de [\[Zhong, A .,2021\]](#) présenté des résultats contradictoires, où le modèle proposé pour prédire la capacité en flexion du béton renforcé de fibres a été jugé précis, en particulier dans la partie ascendante de la courbe contrainte-déformation, sans indiquer de déviation significative dans la représentation des paramètres mécaniques. Cela suggère l'efficacité de certains modèles traditionnels lorsqu'ils sont correctement adaptés aux propriétés matérielles du béton utilisé.

# Partie expérimentale

## II.1. Introduction

Dans cette partie nous avons étudié le comportement du béton fibré soumis à un essai de traction par fendage. L'objectif principal est de décrire les étapes suivies pour collecter des données et, ensuite, les utiliser pour développer un modèle prédictif basé sur les réseaux neuronaux artificiels (RNA).

Nous détaillerons d'abord la préparation des éprouvettes de béton fibré, en précisant leur composition et leurs caractéristiques physiques initiales (densité, masse). Ensuite, nous expliquerons le déroulement des essais de traction par fendage, y compris la mesure de la force appliquée et l'évaluation du nombre de fibres dans la zone de rupture.

Enfin, nous décrirons comment ces données (nombre de fibres, force, densité, masse) ont été intégrées dans un réseau neuronal artificiel afin de prédire la contrainte du béton fibré. Cette partie vise à clairement présenter la méthodologie qui a permis de relier les observations expérimentales aux capacités de modélisation des RNA.

## II.2. Fondements des réseaux de neurones artificiels :

On forme le réseau de neurones en lui fournissant un lot de données (Entrées et sorties correspondantes). L'algorithme de formation est utilisé au cours du processus d'apprentissage, où le RNA (réseaux de neurones artificiels) établit une relation entre les données d'entrée et de sortie .

Au cours de l'apprentissage, les neurones traitent des informations reçues de leur environnement externe (les entrées pour le réseau  $E_1, E_2, \dots, E_n$ ) et communiquent avec le neurone situé dans les couches cachées. Ce dernier est chargé d'effectuer des calculs mathématiques simples basés sur les poids de connexion (indiqués par  $w_{1,1} w_{2,1} \dots w_{nm}$ ) et les biais (représentés par  $b_1, b_2, \dots, b_n$ ).

Le produit de ces neurones dissimulés a traversé une fonction d'activation ou de transfert. Chaque neurone qui reçoit la sortie engendre le mouvement et le mouvement autorisé. Le choix de la nature de cette fonction est crucial, et il est fréquent qu'il faille recourir à des fonctions non linéaires [Haykin S.2005.].

Après l'application de la fonction, les résultats définitifs sont générés. Par la suite, ces résultats servent d'entrées pour tous les neurones de la couche subséquente et le processus de calcul est réitéré. Les valeurs de sortie, notées  $y_1, y_2, \dots, y_k$  et correspondant à l'équation des neurones de sortie (3.3), sont générées en passant par les différentes couches jusqu'à atteindre

la couche finale. À ce point, une valeur d'erreur de sortie est déterminée en comparant la sortie générée avec la sortie désirée (cible). Typiquement, le processus d'apprentissage itératif se termine lorsqu'une déviation jugée acceptable est obtenue.

$$I_k = \sum_{i=1}^n w_{ik} E_i + b_i \quad (3)$$

- Où  $I_k$  est l'Intrant Net ou Somme Pondérée du Neurone  $k$ ,  $w_{ik}$  est le Poids Synaptique,  $E_i$  est l'Entrée ou L'Activation du Neurone Précédent et  $b_i$  est le Biais

$$F(I_k) = \text{tansig}(I_k) = \frac{2}{1 - \exp^{-2I_k}} - 1$$

$$Y_k = F(I_k) \quad (4)$$

- $F(I_k)$  ou  $\text{tansig}(I_k)$ : est la fonction d'activation tangente hyperbolique appliquée à l'intrant net  $I_k$ .

### II.3. Phases de mise en place d'un Réseau de Neurones Artificiels :

Il est nécessaire de fournir des efforts considérables pour définir l'architecture optimale pour les modèles neuronaux. Cela englobe l'identification des variables d'entrée et de sortie, le nombre de strates non visibles, ainsi que la quantité de neurones non visibles dans chaque strate non visible. Généralement, un réseau de neurones qui a trop peu de neurones cachés ne parvient pas à apprendre correctement sur l'ensemble des données d'entraînement, tandis qu'un réseau ayant une quantité excessive de neurones cachés aura tendance à mémoriser les données d'apprentissage plutôt qu'à généraliser les savoirs acquis [Hagan. MT, 1996] Selon [Haykin. S, 2005], il est conseillé d'employer deux couches cachées : la première pour l'obtention des caractéristiques locales, et la seconde pour celle des caractéristiques globales.

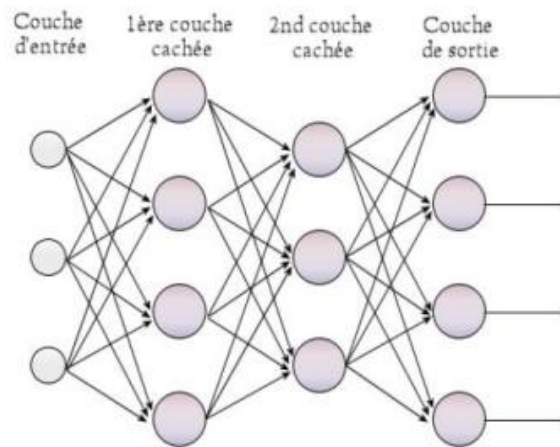
Toutefois, l'ajout de deux couches cachées pourrait entraîner une prolongation notable du temps de formation ou d'apprentissage, ainsi qu'une diminution consécutive de l'efficacité du processus de formation. Adeli et ses collaborateurs [Adeli H, Yeh C. 1989] ont démontré individuellement que toute fonction continue peut-être approximée avec un degré de précision arbitraire en se servant d'un réseau à trois couches. Donc, sur le plan théorique, un réseau à trois couches est adéquat pour l'approximation de la fonction.

En réalité, la majorité des applications de réseaux neuronaux se servent d'une unique couche cachée. Du fait de la connaissance encore imparfaite des effets de la modification de l'architecture du réseau, on recourt traditionnellement à la méthode d'essai et d'erreur pour déterminer le nombre idéal de neurones cachés dans la couche cachée pour une problématique

donnée. Un réseau de neurones artificiels est généralement construit à partir de trois éléments essentiels :

- ✓ L'arrangement des couches d'entrée et de sortie (architecture du réseau)
- ✓ La technique utilisée pour modifier les poids des connexions (stratégie d'apprentissage)
- ✓ La fonction qui active les neurones

La conception du réseau de neurones est cruciale pour son évolution, et des travaux supplémentaires sont requis pour définir l'architecture idéale. Le modèle RNA employé dans cette recherche est structuré en quatre niveaux : la couche d'entrée, deux couches intermédiaires et la couche de sortie, comme illustré dans la [figure II.1](#).



**Figure II.29:** réseau des neurones multicouches artificiels

Dans la couche d'entrée, les variables indépendantes associées à la couche de sortie constituent les entrées, chaque variable indépendante étant attribuée à un neurone spécifique. Le défi réside dans la détermination du nombre de neurones à inclure dans les couches cachées, car cette décision influence les performances du modèle. Par exemple, l'utilisation d'un trop grand nombre de neurones dans une couche cachée pourrait accroître la complexité du modèle [Adeli H.2001]. Il n'existe pas de procédure établie pour déterminer le nombre idéal de neurones, c'est pourquoi l'approche consistant à former le modèle RNA en utilisant un nombre progressif de neurones cachés, puis à choisir le nombre de neurones qui parvient au MSE minimal a été mise en œuvre.

## II.4. Sélection des variables d'entrée et de sortie pour le modèle RNA :

Au cours de cette étude, nous avons appliqué une traction par fendage sur vingt et un échantillons cylindriques de dimensions ( $\varnothing 16 \times 32$  cm) d'un béton fibré :



**Figure II.30 :** les échantillons cylindriques de dimensions ( $\varnothing 16 \times 32$  cm) du béton fibré

### II.4.1. Formulation :

Les échantillons ont été formulés au niveau du laboratoire de l'ENGOA (Entreprise Nationale de génie civil et d'ouvrages d'art, situé à Rouiba Alger en 2019), ils contiennent 1% de fibres d'acier, ils ont aussi les mêmes paramètres et la même formulation (ciment, eau, granulats...). Cependant, il y a 04 gachets dans la mise en œuvre



**Figure II.31 :** Béton fibré

### II.4.2. Caractéristiques des matériaux utilisés :

#### II.4.2.1. Le ciment :

Le ciment utilisé est le ciment portland CEM II /B42,5 N (MATINE), avec ajout de 18 % de décalcaire provenant de l'usine ACC de LAFARGE- Algérie. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont résumées dans les tableaux suivants ; La finesse de mouture de ciments

(SSB) est 3555 cm<sup>2</sup> /g. Ces caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé sont résumées dans les tableaux II.1 et II.2.

**Tableau II.10 : Caractéristique physiques de Ciment**

Caractéristiques physiques	
Début de prise minute	160 - 180 min
Fin de prise (heur)	4 h 00 ~ 4 h 30
Masse spécifique (g /cm <sup>3</sup> )	3,1
Chaleur d'hydratation (j/g)	456,60
Consistance normale (%)	25.81
Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	<5

**Tableau II.11 : Caractéristiques mécaniques du Ciment**

La résistance (MPa) à la		
Les jours	Compression	Flexion
2j	36,74	1,9
7j	41,09	4,76
28j	45,07	5.71

Ce ciment commercialisé en Algérie présente des caractéristiques normalisées plus au moins stables durant une longue durée.

#### II.4.2.2. Les granulats :

Les granulats, tels que le sable et le gravier, sont des éléments cruciaux dans la composition du béton, représentant une part prépondérante de son volume (60 à 75 %). Ils confèrent au béton sa résistance mécanique et contribuent à limiter ses variations de volume. La sélection et la proportion de ces granulats sont rigoureusement encadrées par des normes, notamment la norme XP P18 545, garantissant ainsi la qualité et la performance du mélange.

Des analyses détaillées, menées en laboratoire, ont permis de caractériser les propriétés physiques de ces matériaux, confirmant leur conformité aux exigences normatives. Bien que l'approvisionnement puisse parfois être complexe, particulièrement en hiver ou lors de changements de sites d'extraction, les études menées ont démontré que le sable et les graviers utilisés, provenant notamment de la carrière d'AZROU KEDDARA, sont de qualité adéquate. Le sable, avec son module de finesse et sa faible teneur en fines, est jugé conforme et propice à l'obtention de bétons aux résistances satisfaisantes. De même, les graviers affichent des caractéristiques physiques qui répondent aux critères normatifs. Ces granulats, dont la

granulométrie est étudiée pour une répartition optimale des particules, sont ainsi employés dans la formulation de bétons fibrés, assurant la robustesse et la durabilité des ouvrages.

#### II.4.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau est un élément fondamental dans la fabrication du béton, jouant un rôle essentiel dans le processus d'hydratation du ciment et l'absorption par les granulats. Sa classification dépend du type de liaison qu'elle entretient avec la pâte de ciment (eau capillaire, adsorbée ou de constitution chimique). Pour les besoins de notre expérimentation, nous avons eu recours à l'eau potable fournie par l'Algérienne des Eaux de Reghaïa, Alger. Cette eau est en totale conformité avec les exigences des normes XP P 18-303 et NF EN 1008.

#### II.4.2.4. L'adjuvant :

Nous avons intégré l'ADVA flow 390, un superplastifiant haute performance d'ENGOA (Alger), reconnu pour ses capacités significatives de réduction d'eau.

En termes de propriétés, il s'agit d'un liquide clair et opaque, dont la densité à 20°C est de  $1.05 \pm 0.02$  et le pH de  $7.0 \pm 1.0$ . Sa composition révèle une faible teneur en ions  $\text{Cl}^-$  (inférieure ou égale à 0.09%) et une proportion d'équivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  ne dépassant pas 1.5%.

#### II.4.2.5. Les fibres métalliques :

Les fibres employées dans cette recherche sont des fibres métalliques de type DRAMIX RC-80/30-BP, caractérisées par leur haute teneur en carbone. Issues de fil d'acier étiré à froid, ces fibres intègrent une spécificité structurelle : chacune de leurs extrémités est façonnée en forme de "crochet" ou "baïonnette", un design qui optimise leur ancrage au sein de la matrice du béton. Leurs propriétés dimensionnelles et physiques essentielles sont détaillées dans le [tableau II.3](#).

**Tableau II.12 : Les Caractéristiques des fibres**

Type des fibres	F3
Longueur [mm]	$60 \pm 3$
Diamètre [mm]	$0.75 \pm 0.02$
Extrémités L [mm] des crochets	$1.5 \leq L \leq 4$
Amplitude de crochet [mm]	$h \geq 0,75$
Angle du crochet	$\alpha \geq 20^\circ$
R à la traction [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	$R_m \geq 1050$
Type d'ancrage	Avec 2 crochets
Conditionnement	Plaquette
Facteur d'élancement	$80 = L/d = 60/0.75$





**Figure II.32 :** des fibres d'aciers



**Figure II.33 :** La mise en œuvre des éprouvettes

#### **II.4.3. Ecrasement :**

La traction par fendage est une méthode indirecte utilisée pour évaluer la résistance à la traction de matériaux fragiles comme le béton, qui sont difficiles à tester directement en traction. Le but de cette méthode est de déterminer ces propriétés mécaniques (la contrainte par exemple) pour la conception des structures. La méthode consiste à appliquer une force de compression diamétrale sur une éprouvette cylindrique. Sous cette charge compressive, des contraintes de traction se développent perpendiculairement à la direction de la force appliquée, le long du plan diamétral de l'échantillon. La rupture de l'éprouvette par fendage se produit lorsque ces contraintes de traction internes dépassent la résistance à la traction du matériau, permettant ainsi de calculer cette dernière à partir de la charge maximale appliquée



**Figure II.34 :** la mise en œuvre de traction par fendage sur une éprouvette cylindrique

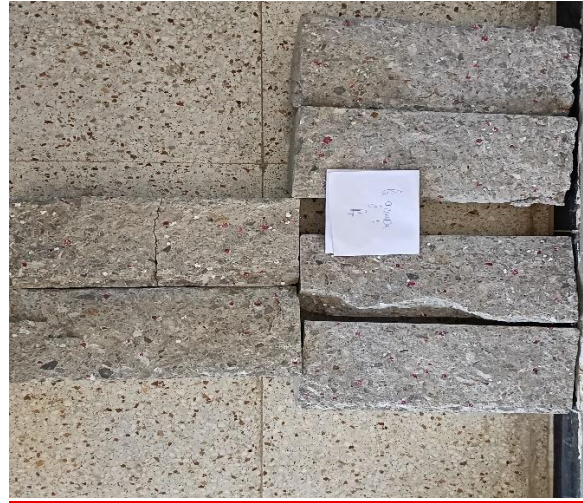
Après avoir effectué l'essai brésilien sur nos éprouvettes, nous avons obtenu ces résultats présentés dans le [tableau II.4](#).

**Tableau II.13 :** les noms et les contraintes résultantes des éprouvettes

Le nom de l'éprouvette	F(1)1	F(1)2	F(1)3		F(1)4	F(1)5
La contrainte MPA	$\sigma=4$	$\sigma=3.4$	$\sigma=2.9$		$\sigma=3.2$	$\sigma=2.8$
Le nom de l'éprouvette	F(2)2	F(2)3	F(2)6		F(2)7	F(2)1
La contrainte MPA	$\sigma=6$	$\sigma=3.9$	$\sigma=6.9$		$\sigma=3.1\text{MPa}$	$\sigma=5.6$
Le nom de l'éprouvette	F(4)1	F(4)2	F(4)4		F(4)5	F(4)6
La contrainte MPA	$\sigma=8.9$	$\sigma=5.3$	$\sigma=3.6$		$\sigma=3.4$	$\sigma=5.6$
Le nom de l'éprouvette	F(3)1	F(3)3	F3(2)	F(3)5	F(3)6	F(3)7
La contrainte MPA	$\sigma=3.3$	$\sigma=4.1$	$\sigma=4.1$	$\sigma=4.3$	$\sigma=9.6$	$\sigma=6.6$

#### II.4.3.1. Base de données :

Ensuite, nous avons procédé à la prise de photographies de ces échantillons, en indiquant systématiquement leurs noms ainsi que les axes (X, Y). A l'aide de Plotdigitizer (application qui fournit les coordonnées), nous avons obtenu les X, Y. D'un autre côté, nous avons pour chaque éprouvette le nombre total des fibres, la force appliquée, la contrainte, la masse et la densité.



**Figure II.35:** les groupes des éprouvettes après l'essai de traction par fendage

Pour modéliser nos bases de données dans le RNA nous avons normalisé les résultats entre 0,1 avec cette équation

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

Où  $X_{\text{norm}}$  : est la valeur normalisée de la donnée originale. Cette valeur sera comprise entre 0 et 1.

- $X$  : est la valeur originale de la donnée que vous souhaitez normaliser.
- $X_{\min}$  : est la valeur minimale de l'ensemble de données à partir de laquelle  $X$  est tiré.
- $X_{\max}$  : est la valeur maximale de l'ensemble de données à partir de laquelle  $X$  est tiré.

Pour cela nous avons obtenu les matrices suivantes :

1. La matrice (4×21) des masses, des forces appliquées, des densités et des nombres totaux des fibres pour tous les 21 éprouvettes :

```
0.4375 0 0.4063 0.5313 0.4063 0.5313 0.9375 0.5625 1 0.50 0.25 0.4688 0.8750 0.8125 0.8438 0.6875 0.3750 0.9063 0.7813 0.6563 0.5000
0.71 0.715 0.5252 0.76990 1 0.3227 0.4051 0.602 0 0.6880 0.3888 0.8842 0.9837 0.7512 0.8643 0.8166 0.7058 0.1222 0.3774 0.6809 0.634
0.185 0 0.0019 0.2243 0.172 0.2243 0.3943 0.2374 0.4205 0.2112 0.1066 0.1981 0.3682 0.342 0.3551|0.2897 1 0.3813 0.3289 0.2766 0.2112
0.7297 0.5676 0.4595 0.1351 0 0.8919 0.2432 0.4324 0.4865 1.00 0.1892 0.4595 0.3243 0.2703 0.2973 0.3243 0.2432 0.4054 0.6486 0.1351
```

2. La matrice (1×21) des contraintes des éprouvettes :

```
(0.7104 0.7127 0.5262 0.7697 1 0.3193 0.4065 0.5986 0 0.6842 0.39 0.8837 0.9835 0.7469 0.8643 0.817 0.7064 0.1243 0.3786 0.6784 0.63)
```

## II.5. Le choix des variables d'entrées et de sorties du modèles RNA

Après la normalisation de la base des données nous avons choisi les variables d'entrées et de sorties comme aperçues dans le [tableau II.5](#) suivant :

**Tableau II.14** : les variables d'entrées et de sorties

Les paramètres d'entrées	Le paramètre de sorties
La masse	La contrainte
La force appliquée	
La densité	
Le nombre total des fibres	

Alors, nous avons pris la première matrice comme une matrice d'entrée et la deuxième comme matrice de sortie.

## II.6. La division des données

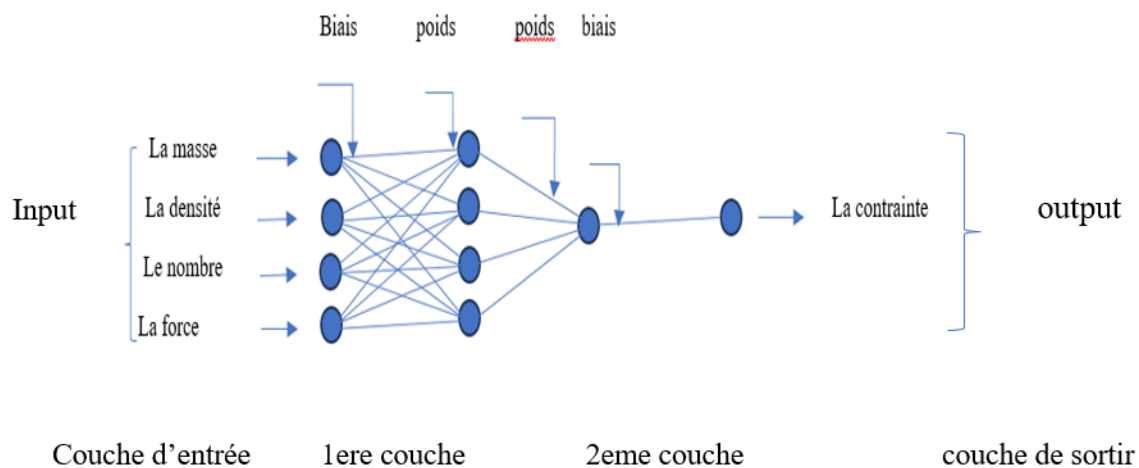
Il n'existe pas de méthode universelle pour partitionner la base de données dans les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA). Dans la majorité des cas d'application en génie civil, cette division des données est fréquemment effectuée de manière arbitraire. Pour cette étude, nous avons opté pour la technique de la « cross-validation ». Selon cette approche, les données ont été réparties aléatoirement en trois sous-groupes : un ensemble destiné à l'apprentissage (entraînement), un autre à la validation et un dernier au test.

La base de données d'apprentissage est employée pour ajuster les poids du modèle. L'ensemble des données de test sert à vérifier la performance du modèle à différents stades d'entraînement et à déterminer le moment où l'apprentissage doit être arrêté afin de prévenir le problème de surapprentissage. Quant aux données de validation, elles sont utilisées pour estimer la performance globale du modèle.



Sur les 21 éprouvettes de béton fibré, le logiciel Matlab a les devisé sur trois sous-groupes, 70% pour l'apprentissage, 15% pour le test et les autres 15% pour la validation où on se trouve que 15 éprouvettes pour l'apprentissage, 3 pour le test et 3 pour la validation.

Les poids et les biais sont les paramètres essentiels des réseaux de neurones. Les poids mesurent l'influence de chaque entrée sur le neurone, permettant au réseau d'identifier les motifs pertinents. Le biais, lui, est une valeur ajoutée qui décale la fonction d'activation, offrant une flexibilité pour modéliser diverses distributions de données. L'ajustement de ces poids et biais par optimisation (comme la descente de gradient) est le mécanisme clé qui permet aux réseaux de neurones d'apprendre et de généraliser à partir de données complexes. Voici une architecture du réseau de neurones maintenu explique le biais et le poids



**Figure II.36 :** Architecture du réseau de neurones maintenu.

Premiers Vecteurs des bias (couche cachée) (4×1):

-3.41733272865089  
1.02725754310397  
-1.45341109777792  
-1.22290206406105

Première matrice des poids (couche cachée) (4×4):

0.0797211721052018 1.55349693910381 0.0540334088849950 -0.376452721695937  
-0.220387534496509 0.843454514596457 0.529856029118536 -0.00957087110684128  
-0.967068520229720 0.869891687828557 1.75216416668964 -0.0120096059659711  
0.319963578571828 1.03004803178995 -0.756045631682860 0.00373393733897030

Deuxième matrice des poids (couche de sortie) (1×4):

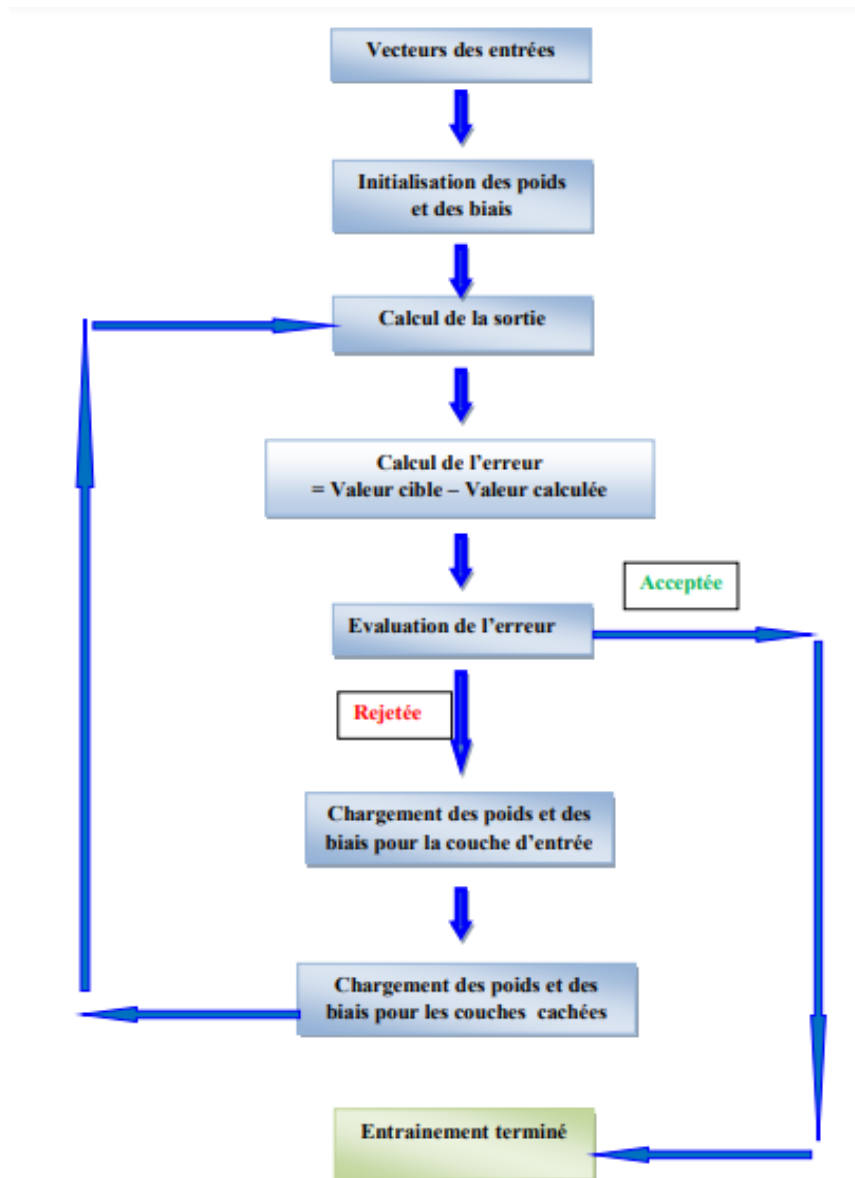
[ 0.275790995126608 1.05664675169126 0.146317164201030 0.731916286806140 ]

Vecteur Bias de la couche de sortie (scalaire):

[ 0.243372374984070 ]

## **II.7. Entraînement de réseau de neurones artificiels :**

Pour que les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) soient fonctionnels, ils doivent impérativement être entraînés afin d'ajuster leurs paramètres de connexion de manière progressive et itérative. Ce processus est le plus souvent réalisé grâce à l'algorithme de rétropropagation du gradient comme aperçu dans la figure. Cet algorithme fonctionne en calculant d'abord les poids de connexion initiaux, puis en propageant les erreurs de la couche de sortie vers les couches précédentes (cachées et d'entrée) via des dérivations partielles. Une fois ces dérivations calculées, les poids du réseau sont mis à jour dans le sens du gradient négatif, en utilisant une constante de pas de correction. Ce cycle de calcul et d'ajustement est répété jusqu'à ce que les valeurs de sortie du réseau soient conformes aux attentes, garantissant ainsi que les poids finaux du modèle sont optimisés.



**Figure II.37 :** Organigramme de l'algorithme de rétropropagation thèse Saoudi B, 2022.

## II.8. Le choix de la fonction d'activation :

L'élément fondamental d'un Réseau de Neurones Artificiels (RNA) est le neurone, qui intègre diverses entrées pour générer une sortie, comme illustré dans la figure 9. Bien que les neurones ne possèdent pas une grande puissance de calcul intrinsèque individuellement, leur interconnexion au sein de différentes couches leur permet d'établir les relations désirées entre les variables et de manifester leurs capacités de traitement. Chaque neurone situé dans une couche cachée dispose de ses propres fonctions, à savoir une fonction de sommation, décrite par l'équation 6, et une fonction de transfert, exprimée par l'équation 7, lesquelles sont appliquées aux valeurs d'entrée et de sortie. La fonction d'activation est celle qui définit la relation entre les couches d'entrée et de sortie du réseau.

$$Y = F_0 \left\{ B_0 + \sum_{l=1}^n W_l F_h \left[ B_k + \sum_{r=1}^m W_{rk} F_h \left[ B_i + \sum_{j=1}^s W_{ij} P_j \right] \right] \right\} \quad (6)$$

$$F_0(F_h) = \text{tansig} = \frac{2}{1 - \exp^{-2I_k}} - 1 \quad (7)$$

Dans cette architecture neuronale, Y représente la sortie finale du réseau. Les biais sont définis pour chaque couche :  $B_0$  pour la couche de sortie,  $B_k$  pour la deuxième couche cachée, et  $B_1$  pour la première. Les poids sont également spécifiés par couche :  $W_1$  est le vecteur des poids de la couche de sortie,  $W_{rk}$  la matrice des poids de la deuxième couche cachée, et  $W_{ij}$  la matrice des poids de la première couche cachée.  $P_i$  désigne le vecteur des entrées. Le nombre de neurones est de n (5) pour la deuxième couche cachée, m (10) pour la première couche cachée, et s pour la couche d'entrée.  $F_0$  et  $F_h$  sont les fonctions de transfert, identifiées comme des fonctions tansigmoïdes. La fonction tansigmoïde a été adoptée dans cette étude comme fonction d'activation en raison de sa capacité à gérer la non-linéarité et à prévenir des valeurs de sortie excessives. Sa forme est donnée par l'équation 9.

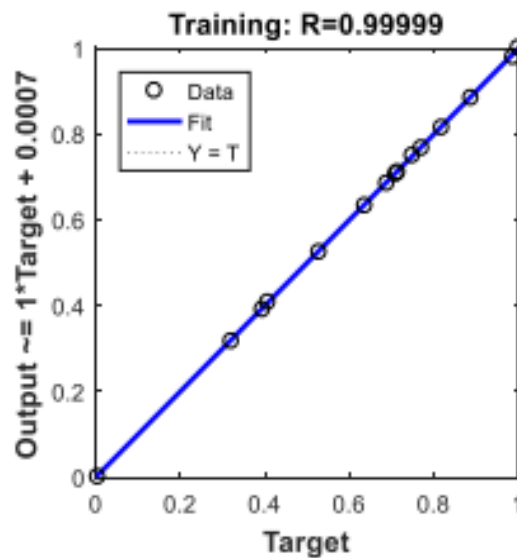


Figure II.38 : Phase d'entraînement



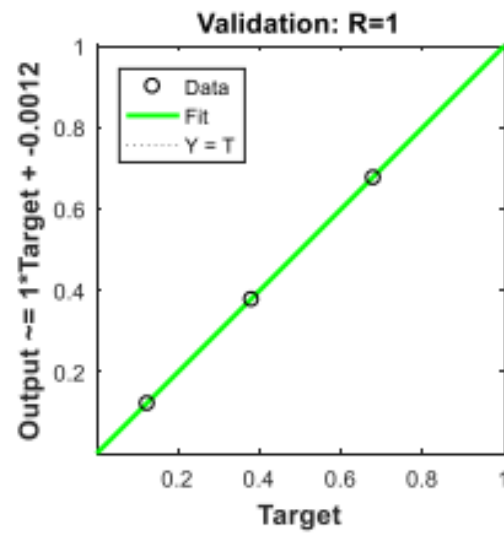


Figure II.39 : phase de validation

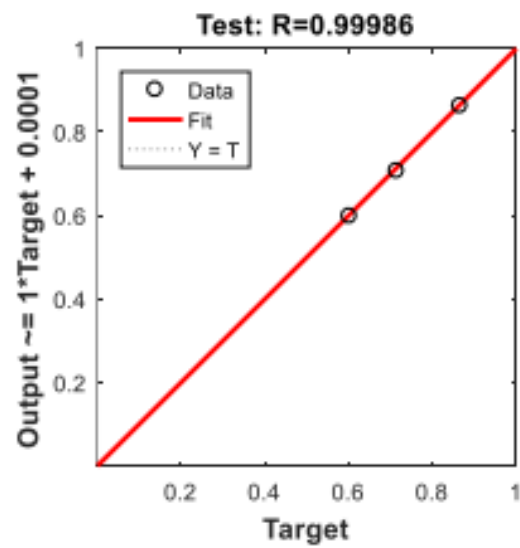


Figure II.40: phase de test

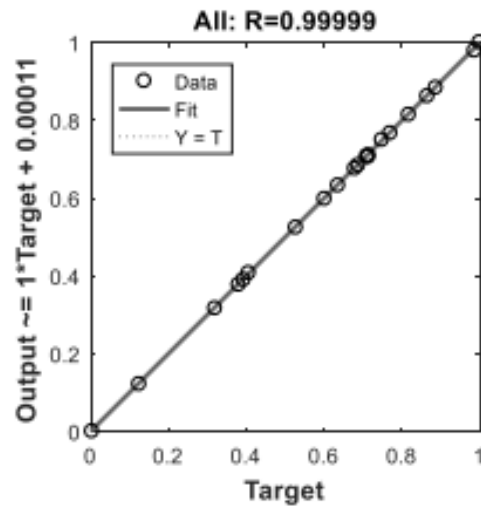


Figure II.41 : l'ensemble des données

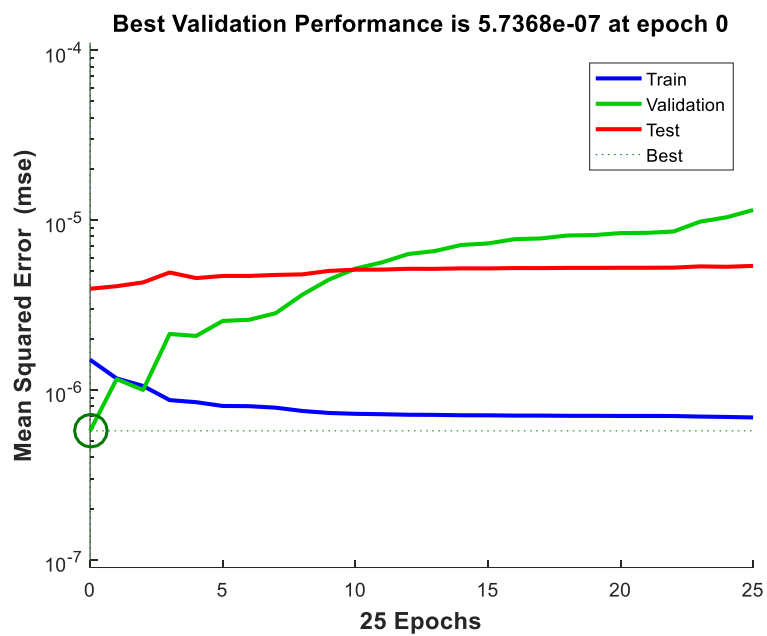


Figure II.42 : donnant la meilleurs époque (itérations) de validation (ici à 0)

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Le modèle neuronal développé pour la prédiction de la contrainte des Béton fibré démontre une performance exceptionnelle, atteignant des coefficients de corrélation (R) quasi parfaits, avec notamment un R global de 0.9999 et une erreur quadratique moyenne (MSE) extrêmement faible de  $5.7368 \times 10^{-7}$ . Cette précision remarquable, basée sur des paramètres d'entrée tels que la densité, la masse, la force appliquée et le nombre de fibres, confère au modèle un statut d'outil fiable et robuste pour l'ingénierie. Cette haute-fidélité est d'autant plus pertinente qu'elle corrobore les enseignements de la recherche bibliographique : l'importance cruciale de la distribution homogène des fibres dans le béton fibré pour optimiser sa résistance à la traction par fendage. En intégrant le "nombre de fibres", le modèle semble capturer implicitement les bénéfices d'une bonne répartition, validant ainsi l'impact fondamental de ce facteur microstructural sur la capacité du matériau à supporter la contrainte. Ce travail offre donc des perspectives significatives pour l'optimisation de la conception et le contrôle qualité des bétons fibré.

# Référence bibliographie

## Référence bibliographique :

**Abbas, Y. M., Hussain, L. A., & Khan, M. I.** (2022). Constitutive compressive stress– strain behavior of hybrid steel–PVA high-performance fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(1), 04021411.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1G43-5533.0004041](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1G43-5533.0004041)

**Abbas, Y. M., & Alsaif, A.** (2025). Hybrid machine learning models and simplified design formulations for predicting punching shear strength in internal SFRC slab-column connections. *Construction and Building Materials*, 478, 141383.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141383>

**Bai, W., Lu, X., Guan, J., Huang, S., Yuan, C., & Xu, C.** (2021). Stress–strain behavior of FRC in uniaxial tension based on mesoscopic damage model. *Crystals*, 11(6), 68G.

<https://doi.org/10.33G0/cryst1106068G>

**Berriot, A., Evin, M., Kerrouche, K., Laroche, E., Ward, E. G., & Wagnac, E.** (2024).

Exploring the effect of displacement rate on the mechanical properties of denticulate ligaments through uniaxial tensile testing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 162, 106824.

<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106824>

**Bernardi, P., Cerioni, R., & Michelini, E.** (2013). Analysis of post-cracking stage in SFRC elements through a non-linear numerical approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 108, 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.02.024>

**Carreira, D. J., & Chu, K. H.** (1985). Stress–strain relationship for plain concrete in compression. *Journal of the American Concrete Institute*, 82(6), 7G7–804.

<https://doi.org/10.1435G/103G0>

**Choi, M. S., Kang, S. T., Lee, B. Y., Koh, K. T., & Ryu, G. S.** (2016). Effect of fiber distribution on the post-cracking tensile behavior of ultra-high-performance cementitious composites (UHPCs). *Materials*, 9(10), 82G.

<https://doi.org/10.33G0/maG10082G>

**China National Standards.** (2009). Standard test methods for fiber reinforced concrete (CECS 13 :2009) [In Chinese].

**Dai, P., Yang, L., Yun, X., Wang, F., & Zhang, L.** (2024). Experimental study of concrete-filled stainless-steel tubular stub columns with circular and square cross-sections subjected to combined compression and bending. *Engineering Structures*, 305, 117773.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117773>

**Deasheng Yin, Zhang, M., Xiong, B., & Zhang, S.** (2023). Study on the physical and mechanical properties of concrete interfacial transition zones (ITZ) with Consideration of positional effects. *Construction and Building Materials*, 486, 141G85.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.141G85>

- Ding, X.**, Li, C., Zhao, M., Li, J., Geng, H., & Lian, L. (2021). Tensile behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete evaluated by different test methods. *Crystals*, 11(3), 251. <https://doi.org/10.33G0/cryst11030251>
- Fu, C.Q.**, Ma, Q.-Y., Jin, X.-Y., Shah, A. A., & Tian, Y. (2014). Fracture property of steel fiber reinforced concrete at early age. *Computers and Concrete*, 13(1), 31–47. <https://doi.org/10.12G8G/cac.2014.13.1.031>
- Guo, Z.** (2014). *Principles of reinforced concrete* (1st ed.). Oxford : Butterworth-Heinemann.
- Han, R.**, Zhao, S. B., & Qu, F. L. (2006). Experimental study on the tensile performance of steel fiber reinforced concrete. *China Civil Engineering Journal*, 3G, 63–67. (In Chinese).
- Hao Bao, Yu, W. C. M.**, Wang, R., Saafi, M., & Ye, J. (2025). Experimental study and numerical modeling of supercritical carbonation of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 476, 14124G. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.14124G>
- Ibrahim, S. M.**, Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y., Abadel, A. A., & Abbas, H. (2016). Strain-rate dependent behavior and modeling for compression response of hybrid fiber reinforced concrete. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(G), 16G5–1715. <https://doi.org/10.15G0/167G-7825312G>
- Jike Tan, Wang, M.**, Wang, Y., & Deng, Z. (2025). Effects of steel fiber volume fraction on the mechanical behaviour and damage index evolution of steel fibre-reinforced concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 6G, 10212G. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.004>
- Liao, W.C.**,perceka , W., & Lui, E.-J(2015). Compressive stress-stain relationship of high strength steel fibre reinforced concrete. *Journal of advanced concrete technology* 13(8), 379-392. <https://doi.org/10.3151/jact.13.379>
- Martinelli, P.**, Colombo, M., de la Fuente, A., Cavalaro, S. H. P., Pujadas, P., & di Prisco, M. (2021). Characterization tests for predicting the mechanical performance of SFRC floors : Identification of fibre distribution and orientation effects. *Materials and Structures*, 54(3), Article 100. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-015G3-7>
- Marcos-Meson, V.**, Fischer, G., Solgaard, A., Edvardsen, C., & Michel, A. (2021). Mechanical performance of steel fibre reinforced concrete exposed to wet–dry cycles of chlorides and carbon dioxide. *Materials*, 14(10), Article 2642. <https://doi.org/10.33G0/ma14102642>
- Mindess, S.**, Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2<sup>nd</sup> ed.). Prentice Hall.
- Mohamed M. Al Rifai, Sikora, K. S.**, & Hadi, M. N. S. (2024). Effect of micro steel fibers volume fraction on behavior of high-strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 450, 13870G. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.13870G>

**Nataraja, M. C.**, Dhang, N., & Gupta, A. P. (1999). Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 21(5– 6), 383–390. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00021-G](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00021-G)

**Purnell, P.**, Short, N. R., & Page, G. L. (2001). Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 1 : Mechanical testing and chemical analysis. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 32(12), 1777–1787. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00016-7)

**Pradhan, B.**, & Lee, S. (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*, 60(5), 1037–1054. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0245-8>

**Qing, L.**, Yu, K., Mu, R., & Forth, J. P. (2019). Uniaxial tensile behavior of aligned steel fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 52, 70. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1374-5>

**Rattanasak Hongthong**, Tadang, C., Tangchirapat, W., & Patura, C. (2025). Predicting influence of steel fibre geometry and dosage on compressive strength, shrinkage, and creep of high-performance concrete containing high volume ground bottom ash. *Results in Engineering*, 26, 105448. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105448>

**Rizzuti, L.**, & Bencardino, F. (2014). Effects of fibre volume fraction on the compressive and flexural experimental behaviour of SFRC. *Contemporary Engineering Sciences*, 7(8), 379–390. <https://doi.org/10.12688/ces.2014.4218>

**Rossi, P. E.**, Allenby, G. M., & McCulloch, R. (2005). *Bayesian statistics and marketing* (1st ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470863662>

**Saoudi, B.** (2022). *Modélisation du comportement mécanique des enrobés bitumineux modifiés : Utilisation des réseaux de neurones* (Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene).

**Wang, Z.**, Bi, J., He, R., Zhao, Y., Huo, L., & Duan, Y. (2021). A meso-mechanical model for post-cracking tensile constitutive behavior of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 296, 123625. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123625>

**Wee, T. H.**, Chin, M. S., & Mansur, M. A. (1996). Stress–strain relationship of high-strength concrete in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(2), 70–76. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1361\(1996\)8:2\(70\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1361(1996)8:2(70))



**Xiao Zhang**, Liu, K., Wang, J., Hao, J., Han, S., Wang, X., & Peng, Y. (2024). Characteristics of crack spacing and crack width movement of early-age partially continuous reinforced concrete pavement under environmental loading : full-scale field investigation. *Construction and Building Materials*, 38G, 135832.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135832>

**Xinyu Liu**, Liu, H., Yang, L., Li, Y., Zhu, H., Liu, G., & Wu, D. (2025). Corrosion behavior of steel bars embedded in steel fiber reinforced concrete (SFRC) under the condition of electro-accelerated chloride attack. *Journal of Building Engineering*, 106, 112701.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112701>

**Yang, M.**, Chengkui, H., & Jizhong, W. (2006). Characteristics of stress–strain curve of high-strength steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, 21(3), 132–137.

<https://doi.org/10.1007/BF02840G02>

**Zhao, Y.**, Bi, J., Zhou, J., Liu, X., Li, X., & Geng, W. (2023). The effect of fiber volume fraction on fiber distribution in steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Buildings*, 13(5), 1125.

<https://doi.org/10.33G0/buildings13051125>

**Zhong, A.**, Sofi, M., Lumantarna, E., Zhou, Z., & Mendis, P. (2021). Flexural capacity prediction model for steel fibre-reinforced concrete beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1), 45.

<https://doi.org/10.1186/s4006G-021- 00461-0>