



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université d'Ain-Temouchent - Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil & Travaux Publics



Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master  
Filière : GENIE CIVIL  
Spécialité : structures

Thème :

**Modélisation et analyse paramétrique d'une poutre en  
béton armée réparée par des matériaux composites**

PRESENTE PAR :

Nabila SAKRANE

Fatima Zohra BEN MAACHOU

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

Président : GUENANECHÉ Boucif	Pr	Université d'Ain Témouchent
Examineur : Fathi MOUACI	dr	Université d'Ain Témouchent
Encadrante : Amina LAZIZI	dr	Université d'Ain Témouchent
Co-encadrante : Salima ABDELBARI	dr	Université d'Ain Témouchent

Année universitaire: 2024-2025

# *Remerciements*

Nous remercions Allah, Le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et la clarté d'esprit nécessaires à l'achèvement de ce mémoire.

Nos remerciements les plus profonds et les plus chaleureux vont à **Madame Dr. Salima ABDELBARI**, notre co-encadrante, dont le rôle a été déterminant dans l'élaboration de ce travail. Son accompagnement attentif, sa générosité intellectuelle, sa rigueur scientifique et son immense bienveillance ont marqué chacune des étapes de cette recherche.

Nous exprimons également nos sincères remerciements à **Madame Dr. Amina LAZIZI**, pour son encadrement méthodologique, ses orientations précieuses et sa confiance tout au long de notre progression.

Nos pensées reconnaissantes s'adressent à tous les enseignants du **Département de Génie Civil** pour leur contribution à notre formation, ainsi qu'aux personnels administratifs et techniques pour leur soutien discret mais essentiel.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles, pour leur amour, leur soutien moral inébranlable, et leurs prières, sans lesquels cette étape n'aurait pu être franchie.

# *Dédicaces*

Je dédie ce mémoire :

À moi-même,

Pour avoir persévéré malgré les difficultés, cru en mes capacités, et tenu bon jusqu'au bout.  
Cette réalisation est le fruit d'un long chemin d'efforts, de résilience et de foi.

À mes chers parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux, leurs prières continues, et leur confiance profonde qui ont été le socle de ma réussite.

À mes frères,

Pour leur présence rassurante, leur soutien moral et leur encouragement dans chaque étape de ma vie.

À mes enseignants et encadrants,

Pour la richesse des connaissances transmises, la rigueur académique et l'accompagnement bienveillant tout au long de ma formation.

À mes camarades et amis,

Avec qui j'ai partagé les moments d'effort, d'entraide et de réussite, et dont la compagnie m'a été précieuse durant ce parcours.

Et avec tout mon respect,

**Aux étudiants palestiniens,**

Symbole vivant de courage, de persévérance et de dignité. Malgré l'oppression, ils poursuivent la voie de la science et du savoir. Que ce mémoire soit un hommage à leur combat silencieux, leur résistance intellectuelle, et leur foi en un avenir meilleur.

Fatima Zohra

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

À ma défunte mère, que Dieu t'accorde Sa miséricorde autant que je t'ai aimée et que tu me manques... Je te dédie cette réussite, en reconnaissance de ton amour et en hommage à tes sacrifices. Tu as été ma motivation et mon soutien, même après ton départ. Tes prières continuent de m'accompagner. Que Dieu te fasse miséricorde et t'accorde une place au paradis.

À moi-même,

Pour tous les efforts accomplis, les nuits de doute, les moments de fatigue et de persévérance. Ce mémoire est l'aboutissement d'un engagement personnel, d'une volonté de réussir et d'un rêve que j'ai su poursuivre jusqu'au bout.

À mon cher père,

Source d'inspiration et de sagesse. Pour son soutien constant, ses sacrifices silencieux, et sa confiance qui m'ont toujours portée. Ce travail est aussi le fruit de son amour, de sa patience et de ses prières.

À mes frères,

Pour leur affection, leur soutien discret mais sincère, leur présence rassurante et leurs encouragements qui m'ont aidée à garder espoir dans les moments difficiles.

À tous ceux qui croient en moi,

Merci d'avoir été là, chacun à votre manière.

Nabila

## Résumé

Ce travail porte sur l'évaluation de l'efficacité des matériaux composites, en particulier les polymères renforcés de fibres (FRP), dans la réparation des poutres en béton armé endommagées par des fissures. Face à la nécessité croissante de solutions de réhabilitation durables, les matériaux composites apparaissent comme une alternative prometteuse grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques, leur légèreté et leur résistance à la corrosion. L'objectif principal de cette étude est de modéliser le comportement structurel d'une poutre fissurée renforcée par des bandes de FRP, afin d'évaluer l'amélioration de ses performances après réparation. Une approche analytique fondée sur des modèles théoriques issus de la littérature a été adoptée, complétée par des simulations numériques à l'aide du logiciel ABAQUS, permettant de suivre l'évolution des contraintes et des déformations. Les résultats ont démontré que le renforcement par FRP contribue efficacement à l'augmentation de la capacité portante, à la réduction de l'ouverture des fissures et à l'amélioration de la rigidité. Cette étude confirme ainsi que les composites représentent une solution fiable et durable pour prolonger la durée de vie des structures en béton armé dégradées.

**Mots-clés :** béton armé, réparation, matériaux composites, FRP, fissuration, renforcement, modélisation, ABAQUS

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة فعالية المواد المركبة، وخاصة البوليمرات المسلحة بالألياف (FRP)، في إصلاح العتبات الخرسانية المسلحة المتضررة بفعل التشققات. في ظل تزايد الحاجة إلى حلول ترميم موثوقة ودائمة، أصبحت المواد المركبة خياراً واعداً بفضل خصائصها الميكانيكية المتميزة وخفة وزنها ومقاومتها العالية للتآكل. يركز هذا البحث على نمذجة السلوك الإنشائي لعتبة خرسانية متشققة تم تعزيزها باستخدام صفائح FRP، بهدف تقييم مدى تحسين الأداء بعد الترميم. تم الاعتماد على مقارنة تحليلية مدعومة بنماذج نظرية من الأدبيات، بالإضافة إلى محاكاة عددية باستخدام برنامج الترميم ABAQUS لتتبع تطور الإجهادات والتشوهات. أظهرت النتائج أن استخدام FRP يساهم بفعالية في تقوية العتبة، تقليل التشققات، وتحسين قدرتها على تحمل الأحمال. تؤكد هذه الدراسة أن تقنيات الترميم باستعمال المواد المركبة تمثل حلاً فعالاً ومستداماً لإطالة عمر المنشآت الخرسانية المسلحة المتدهورة.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المسلحة، الترميم، المواد المركبة، البوليمرات المسلحة بالألياف، التشققات، التدعيم،

النمذجة، أباكوس

## **ABSTRACT**

This work focuses on evaluating the effectiveness of composite materials, particularly fiber-reinforced polymers (FRP), in repairing reinforced concrete beams damaged by cracking. In response to the growing need for durable rehabilitation solutions, composite materials appear as a promising alternative due to their excellent mechanical properties, light weight, and high resistance to corrosion. The main objective of this study is to model the structural behavior of a cracked concrete beam strengthened with FRP sheets, in order to assess the improvement in performance after repair. An analytical approach based on theoretical models from the literature was adopted, combined with numerical simulations using ABAQUS software to monitor the evolution of stresses and deformations. The results demonstrated that FRP reinforcement significantly enhances load-bearing capacity, reduces crack openings, and improves structural stiffness. This study thus confirms that composite materials represent a reliable and sustainable solution for extending the service life of deteriorated reinforced concrete structures.

**Keyword:** reinforced concrete, repair, composite materials, FRP, cracking, strengthening, modeling, ABAQUS

## SOMMAIRE

Remerciements .....	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	IV
TABLE DES MATIERES.....	Erreur ! Signet non défini.
LISTE DES FIGURES .....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
Liste des notations.....	XV
Introduction.....	1

### Chapitre I : Généralités

<b>1. Introduction :</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Les constituants fondamentaux du béton :</b> .....	<b>4</b>
2.1. Le Liant Hydraulique :.....	5
2.2. L'Eau de Gâchage :.....	5
2.3. Les Granulats Fins: .....	5
2.4. Les Granulats Grossiers :.....	6
<b>3. Propriétés Mécaniques du Béton : Un Comportement Caractéristique.....</b>	<b>6</b>
3.1. Résistance a la compression : .....	6
3.2. Faible Résistance à la traction : .....	7
3.3. Comportement Mécanique Non linéaire et Fragile.....	8
<b>4. Les Aciers d'Armature : Complément Essentiel au Béton.....</b>	<b>8</b>
4.1. Rôle et Propriétés Fondamentales de l'Acier d'Armature .....	9
4.2. Types d'Aciers d'Armature et Leur Comportement Contrainte-Déformation.....	10
4.3. Modélisation Réglementaire du Comportement de l'Acier (BAEL).....	11
4.4. Caractéristiques Mécaniques Clés de l'Acier d'Armature.....	12

4.5. Phases de Comportement Réel de l'Acier sous Traction .....	13
<b>5. Le Béton Armé et l'Adhérence : Un Pilier de la Performance Structurale... 14</b>	
5.1. Le Rôle Crucial de l'Adhérence Acier-Béton .....	14
5.2. Origine Et Causes De Dégradation Du Ciment : .....	15
5.3. Dégradations d'Origine Chimique et causes de dégradation du béton :.....	16
5.4. Dégradations d'Origine Physique .....	18
5.5. Dégradations d'Origine Mécanique .....	20
5.6. 5.6 Erreurs de Conception : .....	20
<b>6. Les matériaux composites : .....</b>	<b>21</b>
6.1. Les renforts : .....	22
6.1.1. Les fibres :.....	23
6.1.2. Type de fibres :.....	23
6.2. Les matrices .....	29
6.2.1. Résines thermodurcissables : .....	30
6.2.2. Résines thermoplastiques : .....	31
6.2.3. Matrices métalliques et céramiques : .....	33
6.3. Comportement mécanique des composites :.....	33
6.4. Modélisation des composites : .....	33
6.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites : .....	34
<b>7. Conclusion : .....</b>	<b>35</b>

## **Chapitre II :**

### **Approche analytique : Contraintes et Fissures**

<b>1. Introduction : .....</b>	<b>37</b>
<b>2. Revue de solutions existantes sur les contraintes d'interfaces.....</b>	<b>38</b>
2.1. Cadre Théorique et Typologie des Solutions Analytiques .....	38

2.2. Variantes des Solutions Basées sur la Compatibilité des Déformations.....	38
2.3. Démarche en Deux Étapes de la Solution de Roberts et Haji-Kazemi (Charge UDL) .....	38
2.4. Généralisation de l'Analyse avec la Solution de Roberts.....	39
2.5. Identification des Limites des Solutions Existantes et Motivation d'une Nouvelle Approche .....	39
<b>3. Formulation et Hypothèses Constitutives de la nouvelle Solution de Smith et Teng, 2020 .....</b>	<b>40</b>
<b>4. Approche méthodologique proposée par Xue Jun He, 2019.....</b>	<b>40</b>
4.1. Synthèse : Adaptation Nécessaire pour un Renforcement en Extradossés .....	41
4.2. Points Clés Expliquant la Non-Applicabilité Directe : .....	41
4.3. Adaptations Nécessaires pour un Renforcement en Extradossés : .....	41
4.4. Le modèle théorique formulé dans le cadre de ce travail .....	42
<b>5. Formulation Mathématique du Comportement des Contraintes de Cisaillement Interfaciales : L'Équation Différentielle.....</b>	<b>43</b>
5.1 Contraintes normales d'interface :.....	48
<b>6. Méthodologie de Calcul des Fissures dans le Béton Armé Renforcé :.....</b>	<b>51</b>
6.1. Méthodes d'évaluation de la fissuration .....	51
<b>7. Intégration de la Mécanique de la Rupture.....</b>	<b>52</b>
7.1. Concepts Clés de la Mécanique de la Rupture Pertinents :.....	52
7.2. Formulation mathématique des champs de contraintes (à la proximité de la fissure) : .....	52
<b>8. Conclusion : .....</b>	<b>54</b>

### Chapitre III :

#### Présentation du logiciel

2.1. Présentation du logiciel:.....	57
-------------------------------------	----

2.2. Le CAE (Complete ABAQUS Environnement) : .....	58
2.3. Définition du modèle à simuler : .....	60
2.3.1. Présentation des étapes suivies dans la simulation : .....	60
<b>3. Conclusion : .....</b>	<b>69</b>

## **Chapitre IV :**

### **Résultats et Discussions**

<b>1. Introduction : .....</b>	<b>72</b>
<b>2. Propriétés des matériaux utilisés : .....</b>	<b>72</b>
2.1. Propriétés du béton : .....	72
2.2. Propriétés du béton équivalent : .....	72
2.3. Propriétés du composite FRP : .....	73
2.4. Propriétés de l'adhésive : .....	73
2.5 Propriétés de l'acier : .....	73
<b>.3 Modélisation numérique : .....</b>	<b>73</b>
<b>4. Etapes de modélisation : .....</b>	<b>74</b>
4.1. Géométrie des éléments : .....	74
<b>5. Présentation des modèles appliqués: .....</b>	<b>75</b>
5.1. Premier Modèle: .....	75
5.2. Deuxième modèle: .....	75
5.3. Troisième modèle : .....	76
5.4. quatrième modèle : .....	76
5.5. Cinquième modèle : .....	77
5.6. Maillage: .....	77
<b>6. Résultats et discussion : .....</b>	<b>78</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>96</b>
<b>Références bibliographique .....</b>	<b>96</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire .....	4
Figure 2 Essai de compression uni axile .....	7
Figure 3 Comportement du béton en traction simple .....	8
Figure 4 Loi de comportement d'un acier naturel .....	10
Figure 5 Loi de comportement d'un acier écroui .....	10
Figure 6 Diagramme contrainte-déformation selon le BAEL .....	12
Figure 7 Diagramme charge-déformation (comportement réel de l'acier) .....	13
Figure 8 Comportement d'une barre d'acier soumis à un essai d'arrachement .....	15
Figure 9 Dégradation schématique des armatures au cours du temps selon le diagramme de Tuuti .....	16
Figure 10: Carbonatation .....	17
Figure 11: Conditions d'apparition de l'alcali-réaction .....	17
Figure 12: Béton dégradé par l'alcali-réaction .....	18
Figure 13: Exemple de fissuration due au retrait du béton .....	18
Figure 14 : Les types de retrait .....	19
Figure 15: Effets des cycles de gel-dégel .....	19
Figure 16: dégradation due aux sels de déverglaçage .....	20
Figure 17 : Matériau composite .....	21
Figure 18 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort. Principaux matériaux de renforts .....	23
Figure 19: Différentes armures utilisées pour les matériaux composites tissées .....	24
Figure 20 : Exemple de fibre de verre .....	25
Figure 21 : Exemple de fibre d'aramide .....	26

Figure 22 :Les différentes formes des fibres métalliques .....	27
Figure 23 :Fibres de polypropylène .....	28
Figure 24 :Les caractéristiques principales des fibres.....	29
Figure 25 :Les différentes familles de Matrice .....	30
Figure 26 :Confrontation du comportement des composites et de l'acier.....	33
Figure 27 ::Couche de matériau composite orthotrope .....	34
Figure 28 : Illustration du renforcement d'un élément en porte-à-faux en béton armé à l'aide de laminés PRF collés sur la face tendue .....	43
Figure 29 : Forces dans un élément infinitésimal d'une poutre en porte-à-faux en béton armé renforcée par PRF.....	44
Figure 30 :les trois modes .....	52
Figure 31 :Contraintes près de l'extrémité d'une fissure .....	53
Figure 32 : Présentation de l'interface ABAQUS .....	59
Figure 33 : Les modules du logiciel .....	60
Figure 34 : Module Part .....	61
Figure 35 : Modélisation des matériaux .....	62
Figure 36 : Instance et assemblage.....	63
Figure 37 : Détail d'assemblage du modèle .....	63
Figure 38 : Création de step .....	64
Figure 39 : module interaction .....	65
Figure 40 : Création des chargements .....	66
Figure 41 : chargement de poutre en béton .....	67
Figure 42 : Création du maillage.....	68
Figure 43 : géométrie des éléments modélisés.....	75
Figure 44 : Assemblage de la poutre modélisée en béton armé .....	75
Figure 45 : Assemblage de la poutre modélisée en béton renforcée par FRP.....	76

Figure 46 : Assemblage de la poutre modélisée en béton non armé .....	76
Figure 47 : Assemblage de la poutre modélisée en béton armé fissuré et renforcée par FRP .	77
Figure 48 : Assemblage de la poutre modélisée en béton fissuré et renforcée par FRP .....	77
Figure 49 : Maillage de la poutre renforcée .....	78
Figure 50 : courbe contrainte-longueur d`une poutre en béton non armé réparé par fibre de FRP .....	81
Figure 51 : courbe contrainte- longueur d`une trois types de poutre .....	83
Figure 52 : comparaison de deux poutres en béton répare par FRP.....	84
Figure 53 : courbe contrainte- longueur de trois modèles de fissures dans une poutre en béton non armé réparé par fibre de FRP .....	85
Figure 54 courbe contrainte- longueur d`une poutre en béton armé avec et sans fissure réparé par fibre de FRP .....	86
Figure 55 courbe contrainte- longueur d`une deux types de poutre avec et sans armature fissuré et réparé par FRP .....	87
Figure 56 courbe contrainte- longueur de trois positions de fissure dans une poutre en béton réparé par fibre de FRP .....	88
Figure 57 courbe contrainte- longueur d`une pouter en beton seul réparé par fibre de FRP ...	89
Figure 58 courbe contrainte- longueur d`une trois types de poutre .....	90
Figure 59 comparaison de deux poutres en béton répare par FRP.....	91
Figure 60 courbe contrainte- longueur de trois modèles de fissures dans une poutre en béton seul réparé par fibre de FRP .....	92
Figure 61 courbe contrainte- longueur d`une deux types de poutre avec et sans armature fissuré et réparé par FRP .....	93
Figure 62 courbe contrainte- longueur d`une poutre en béton armé avec et sans fissure réparé par fibre de FRP .....	94
Figure 63 courbe contrainte- longueur de trois positions de fissure dans une poutre en béton réparé par fibre de FRP .....	95

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :les différents types de composites (Badour.S, 2018) .....	22
Tableau: 2 : Propriétés des fibres de carbone (Koizumi.M, 1993) .....	24
Tableau 3:Propriétés des fibres de Verre (M.Berthelot, 2005) .....	25
Tableau 4:Propriétésdes fibres d'aramides (M.Berthelot, 2005) .....	26
Tableau 5 :Caractéristiques des résines thermodurcissables (Biron, 2004) .....	30
Tableau 6 :Comparaison entre les deux types de résine (PERROT.Y, 2006).....	32
Tableau 7 :Tableau des unités correspondant à ABAQUS .....	58
Tableau 8 :Caractéristiques de la phase élastique du béton. Au-dessus.....	72
Tableau 9 Caractéristiques de la phase élastique du béton équivalent.....	72
Tableau 10 Caractéristiques mécaniques du renfort (carbone) .....	73
Tableau 11 Caractéristiques mécaniques du l'adhésive .....	73
Tableau 12 Caractéristiques mécaniques du l'acier .....	73
Tableau 13 Variation des contraintes normales par rapport à la longueur .....	78
Tableau 14 Variation des contraintes normales par rapport à la longueur .....	79
Tableau 15: variation des contraintes tangentielle par rapport a la longueur. ....	80
Tableau 16: variation des contraintes tangentielle par rapport à la longueur.....	80

## Liste des notations

$\tau(x)$  : Contrainte de cisaillement interfaciale (Pa)

$\sigma(x)$  : Contrainte normale interfaciale (Pa)

$E_b$  : Module d'élasticité du béton (Pa)

$E_s$  : Module d'élasticité de l'acier (Pa)

$E_f$  : Module d'élasticité de la fibre composite (Pa)

$G$  : Module de cisaillement de l'adhésif (Pa)

$t_s$  : Épaisseur de la plaque FRP (m)

$t_a$  : Épaisseur de la couche adhésive (m)

$b$  : Largeur de la poutre ou de la plaque (m)

$L$  : Longueur de la zone renforcée (m)

$L_p$  : Longueur de collage de la plaque composite (m)

$u(x)$  : Déplacement longitudinal de la plaque FRP (m)

$\delta(x)$  : Glissement différentiel plaque-béton (m)

$V_{ap}(x)$  : Déplacement vertical de la plaque FRP (m)

$V_{ac}(x)$  : Déplacement vertical du béton armé (m)

$\varepsilon$  : Déformation unitaire (sans dimension)

$\gamma$  : Déformation angulaire (rad)

$f_c$  : Résistance à la compression du béton (Pa)

$f_t$  : Résistance à la traction du béton (Pa)

$f_y$  : Limite d'élasticité de l'acier (Pa)

$\sigma_{max}$  : Contrainte maximale admissible (Pa)

$\beta$  : Paramètre d'interface (lié à  $G$ ,  $t_a$ , etc.)

$M_0$  : Moment appliqué à l'encastrement (Nm)

$q$  : Charge répartie (N/m)

$a, b$  : Coefficients d'intégration dans les solutions analytiques

$x$  : Position le long de la poutre (m)

$\theta$  : Rotation ou courbure (selon le contexte)

$\Phi(x)$  : Fonction de distribution des contraintes

KI, KII, KIII : Facteurs d'intensité de contrainte (modes I, II, III)

$G_c$  : Ténacité critique à la rupture ( $J/m^2$ )

$t_{max}$  : Contrainte de cisaillement maximale à l'interface (Pa)

$V_0$  : Force tranchante totale (N)

$\nu$  : Coefficient de Poisson

$B_1, B_2, B_3, B_4$  : Coefficients dans les solutions analytiques spécifiques

$\theta_0$  : Angle initial ou paramètre géométrique de fissure

# **Introduction**

## Introduction

---

Face à l'augmentation du vieillissement prématuré des structures en béton armé et aux contraintes budgétaires croissantes dans le secteur du génie civil, la réparation et le renforcement des ouvrages existants s'imposent comme des solutions incontournables. Parmi les techniques les plus innovantes figure l'utilisation de matériaux composites, notamment les polymères renforcés de fibres (FRP), qui permettent de restaurer la capacité portante des structures tout en prolongeant leur durée de vie.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique. Il porte sur la modélisation et l'analyse paramétrique d'une poutre en béton armé fissurée, réparée à l'aide de matériaux composites, avec pour objectif de mieux comprendre les interactions mécaniques au sein de la structure et d'optimiser les méthodes de renforcement.

Pour ce faire, le travail s'articule en quatre chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre pose les généralités nécessaires à la compréhension du sujet. Il présente les propriétés fondamentales des matériaux utilisés : le béton, l'acier d'armature, ainsi que les matériaux composites. Une attention particulière est accordée aux mécanismes de dégradation du béton armé et aux avantages qu'apportent les composites dans un contexte de réparation.
- Le deuxième chapitre aborde l'approche analytique du comportement des poutres en béton armé renforcées. Il traite en détail des contraintes interfaciales et des mécanismes de fissuration, en s'appuyant sur des modèles théoriques issus de la littérature, tels que ceux de Roberts, Smith et Teng, ainsi que des hypothèses de la mécanique de la rupture.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation du logiciel ABAQUS, un outil de calcul par éléments finis utilisé pour simuler le comportement mécanique de la poutre dans différents scénarios de renforcement. Ce chapitre décrit la démarche de modélisation adoptée, les hypothèses numériques, les caractéristiques des matériaux, le maillage et les conditions aux limites.

Le quatrième chapitre présente les résultats et discussions issus des simulations numériques. L'analyse permet d'évaluer l'effet des paramètres géométriques, mécaniques et

## **Introduction**

---

de positionnement des fissures sur la résistance structurelle et la distribution des contraintes. Ce travail vise ainsi à fournir une base scientifique et technique pour améliorer les stratégies de renforcement des éléments en béton armé, en combinant des approches analytiques éprouvées et des outils numériques performants. Les conclusions tirées permettront de proposer des recommandations utiles aux ingénieurs et concepteurs œuvrant dans le domaine de la réhabilitation structurelle.

# **Chapitre I :**

# **Généralités**

## 1. Introduction :

Le béton s'est imposé comme un matériau de construction incontournable grâce à ses atouts majeurs, à savoir : d'excellentes performances mécaniques, une durabilité éprouvée et une grande adaptabilité aux formes souhaitées. En sa qualité de matériau composite, ses propriétés sont le fruit de l'assemblage de divers éléments. L'histoire de l'industrie du ciment, marquée par l'invention du ciment Portland au XIXe siècle, illustre son évolution constante. Les propriétés physiques du matériau en question, à savoir sa résistance à la compression, la disponibilité de ses constituants et sa polyvalence d'application dans des domaines variés (infrastructures, bâtiments, environnements agressifs), en font un choix privilégié. Cependant, afin de bénéficier d'un rendement optimal en termes de résistance et de longévité, une analyse détaillée de sa composition s'avère nécessaire, de même qu'une mise en œuvre méticuleuse.

## 2. Les constituants fondamentaux du béton :

La formulation d'un béton standard repose sur l'interaction de quatre éléments principaux : le liant hydraulique, l'eau de gâchage, les granulats fins et les granulats grossiers. Le rôle et les caractéristiques de chacun sont détaillés ci-dessous, (CHANVILLARD G., 1994)

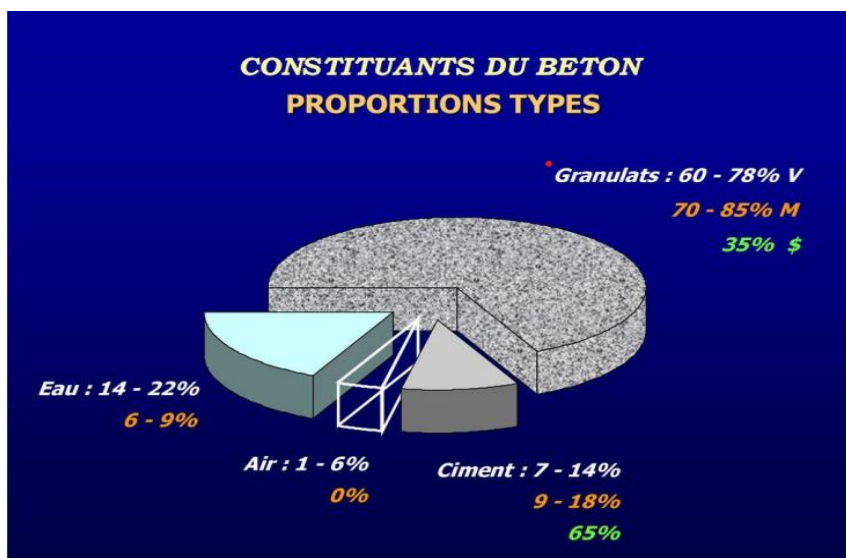


Figure 1 Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire (Youcef, 2004)

### **2.1. Le Liant Hydraulique :**

Le liant hydraulique, principalement le ciment Portland (CEM I, selon la norme EN 197-1), agit comme l'élément cohésif du béton. Il s'agit d'une poudre fine qui, au contact de l'eau, initie une réaction chimique exothermique appelée hydratation. Ce processus forme des produits hydratés (silicates et aluminates de calcium hydratés) qui sont responsables du développement de la résistance mécanique du béton.

Il est important de noter que d'autres types de ciments peuvent être utilisés, intégrant des ajouts minéraux tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau ou la fumée de silice. Ces ajouts peuvent conférer des avantages spécifiques au béton, notamment en termes de durabilité accrue ou de réduction de son impact environnemental.

### **2.2. L'Eau de Gâchage :**

L'eau de gâchage remplit une double fonction cruciale au sein du mélange béton. Premièrement, elle est indispensable pour déclencher la réaction d'hydratation du ciment. Deuxièmement, elle confère au béton frais son ouvrabilité, c'est-à-dire sa capacité à être facilement mis en place, compacté et lissé avant son durcissement.

Le rapport eau/ciment (E/C) est un paramètre fondamental qui influence directement les propriétés du béton durci, notamment sa résistance mécanique, sa porosité, sa durabilité et sa susceptibilité à la fissuration. Un excès d'eau améliore certes la maniabilité du mélange frais, mais il conduit inévitablement à une diminution de la résistance et à une augmentation de la perméabilité du béton une fois durci.

### **2.3. Les Granulats Fins:**

Les granulats fins, généralement constitués de sable siliceux dont la dimension maximale est de 4 mm (désignation typique 0/4 mm), jouent un rôle de remplissage des vides entre les granulats grossiers. Leur présence contribue significativement à améliorer la compacité globale du béton.

La granulométrie (répartition des tailles), la forme des grains, leur propreté (absence d'impuretés) et leur nature minéralogique sont des facteurs qui influencent la cohésion du béton à l'état frais, ainsi que sa résistance et sa stabilité dimensionnelle une fois durci. Un sable présentant une bonne gradation granulométrique permet une distribution homogène de la pâte de ciment au sein du mélange et assure une finition de surface satisfaisante.

## **2.4. Les Granulats Grossiers :**

Les granulats grossiers, tels que le gravier roulé ou la pierre concassée, avec des dimensions typiques comprises entre 4 et 20 mm (par exemple, en fractions 4/20 mm), constituent la phase la plus volumineuse du mélange béton. Ils sont les principaux responsables de la résistance mécanique du béton, en particulier sa résistance à la compression, et contribuent de manière significative à sa stabilité dimensionnelle.

La taille, la forme (angulaire ou arrondie), la rugosité de la surface et la distribution granulométrique des granulats grossiers ont un impact important sur l'enrobage par la pâte de ciment et sur l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire. Une bonne adhérence est essentielle pour assurer le transfert efficace des contraintes au sein du matériau.

## **3. Propriétés Mécaniques du Béton : Un Comportement Caractéristique**

Le béton, en tant que matériau de construction, se distingue par un comportement mécanique spécifique, marqué par une performance asymétrique en compression et en traction, ainsi que par une réponse non linéaire et fragile sous sollicitation.

### **3.1. Résistance a la compression :**

Le béton excelle particulièrement en résistance à la compression. Cette capacité à supporter des forces d'écrasement est une de ses caractéristiques fondamentales, lui permettant de reprendre des charges importantes dans les structures. La résistance à la compression du béton, mesurée en mégapascals (MPa), peut atteindre des valeurs considérables, variant en fonction de la composition du mélange (notamment le rapport eau/ciment, la qualité des granulats et le dosage du ciment), de l'âge du béton et des conditions de cure. Des bétons courants peuvent présenter des résistances allant de 20 à 50 MPa, tandis que des bétons à hautes performances peuvent dépasser les 100 MPa. Cette performance en compression est ce qui rend le béton idéal pour les éléments structuraux tels que les poteaux, les fondations et les dalles comprimées.

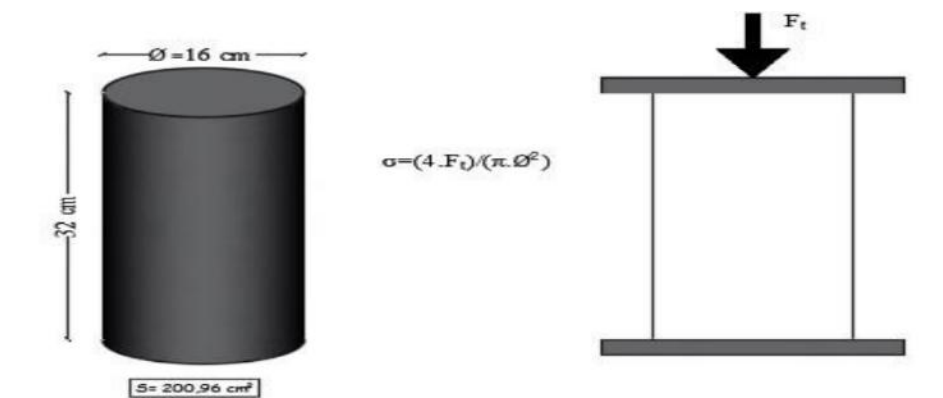


Figure 2 Essai de compression uni axiale (MESSAOUDENE, 2019)

### 3.2. Faible Résistance à la traction :

Contrairement à sa performance en compression, le béton présente une résistance à la traction intrinsèquement faible. Cette résistance, qui représente la capacité du matériau à s'opposer à des forces d'étirement ou de traction, est généralement inférieure à 10 % de sa résistance à la compression. Ce déséquilibre significatif constitue une limitation majeure dans la conception des structures en béton soumises à des efforts de traction, tels que ceux induits par la flexion (où une partie de l'élément est en traction).

Pour pallier cette faiblesse en traction, il est courant d'incorporer des armatures dans le béton, donnant naissance au béton armé ou au béton précontraint. Ces armatures, généralement constituées d'acier (mais aussi de matériaux composites plus récents), possèdent une résistance à la traction beaucoup plus élevée et sont conçues pour reprendre les efforts de traction auxquels le béton seul ne pourrait résister. L'adhérence entre l'armature et le béton est cruciale pour assurer un transfert efficace des forces. (DUPAIN R., 2000, p. 236)

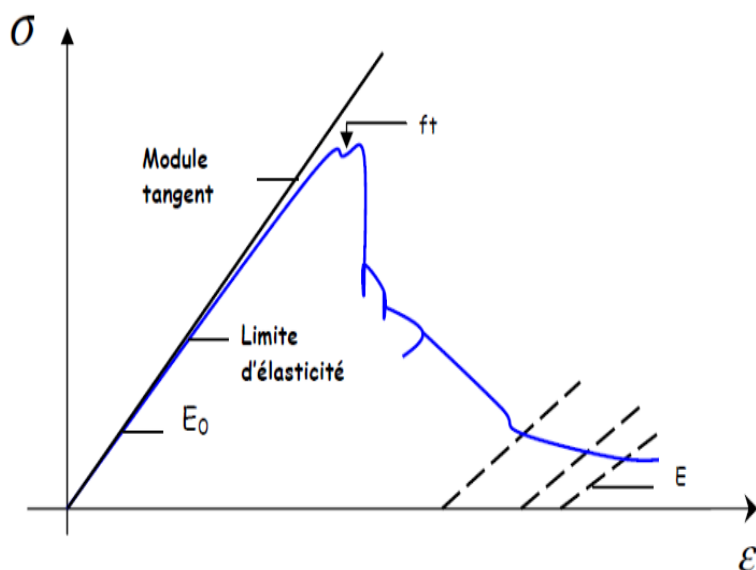


Figure 3 Comportement du béton en traction simple (DUPAIN R., 2000)

### 3.3. Comportement Mécanique Non linéaire et Fragile

Le comportement mécanique du béton se caractérise par une non-linéarité, particulièrement observable au-delà de sa limite élastique et en phase de post-fissuration. Contrairement à des matériaux ductiles comme l'acier, le béton ne présente pas de palier de déformation plastique significatif avant la rupture. Sa rupture survient de manière abrupte, avec peu ou pas de déformation permanente visible. On qualifie ce comportement de fragile ou quasi-fragile.

Cette fragilité est particulièrement marquée en traction et en flexion. Lorsque la contrainte de traction dépasse la résistance du béton, des fissures se forment et se propagent rapidement, conduisant à la rupture sans avertissement notable. Cette caractéristique souligne l'importance d'une conception rigoureuse et d'une mise en œuvre de qualité pour éviter de solliciter le béton au-delà de ses limites en traction. La présence d'armatures permet de contrôler la fissuration et d'assurer une certaine ductilité à la structure globale en béton armé, en permettant une redistribution des efforts après l'apparition des premières fissures dans le béton

## 4. Les Aciers d'Armature : Complément Essentiel au Béton

Dans le domaine de la construction, l'introduction d'acier sous forme de barres d'armatures avant le bétonnage d'un élément marque la naissance d'un matériau composite aux

performances structurelles optimisées : le béton armé. Cette association stratégique permet de pallier les limitations intrinsèques du béton, notamment sa faible résistance à la traction et sa nature fragile.

#### **4.1. Rôle et Propriétés Fondamentales de l'Acier d'Armature**

L'acier, utilisé comme armature dans le béton, apporte une contribution significative en termes de résistance mécanique. Il possède une excellente résistance à la traction, atteignant couramment des valeurs de l'ordre de 500 MPa, et offre également une bonne résistance à la compression pour des éléments peu élancés (c'est-à-dire dont la longueur est faible par rapport à leur section transversale). Cette capacité à résister aux efforts de traction est cruciale pour les éléments structuraux soumis à la flexion ou à d'autres types de sollicitations qui induisent des tensions de traction.

Cependant, une vulnérabilité de l'acier réside dans sa susceptibilité à la corrosion en l'absence de protection adéquate. Cette corrosion peut compromettre l'intégrité de l'armature et, par conséquent, la durabilité de la structure en béton armé. Des mesures de protection, telles qu'un enrobage suffisant de béton de qualité et parfois des traitements spécifiques des aciers, sont donc indispensables.

Sur le plan du comportement mécanique, l'acier se distingue par sa ductilité. Cette propriété se manifeste par sa capacité à subir des déformations importantes avant de rompre, pouvant atteindre plusieurs dizaines de pourcents d'allongement. Cette ductilité est essentielle pour la sécurité des structures, car elle permet une redistribution des contraintes en cas de surcharge et offre une certaine marge avant la rupture finale.

Contrairement au béton, dont le comportement en compression et en traction est nettement différent, l'acier présente une loi contrainte-déformation considérée comme identique dans les deux modes de sollicitation. La forme précise de cette loi dépend du type d'acier utilisé.

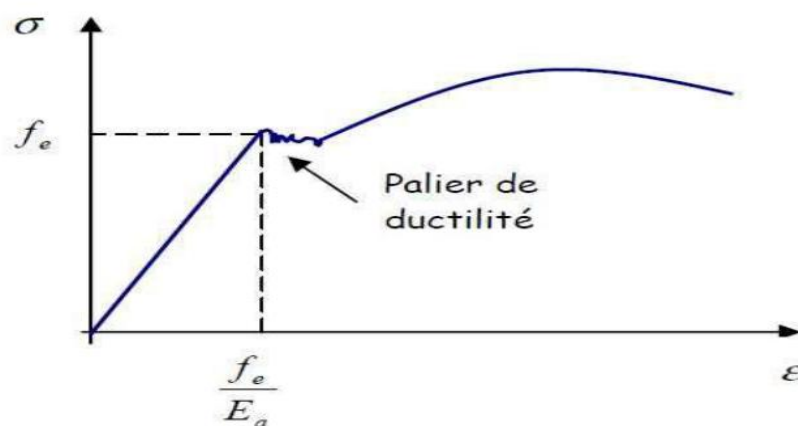


Figure 4 Loi de comportement d'un acier naturel (IGUETOULENE.F, 2011)

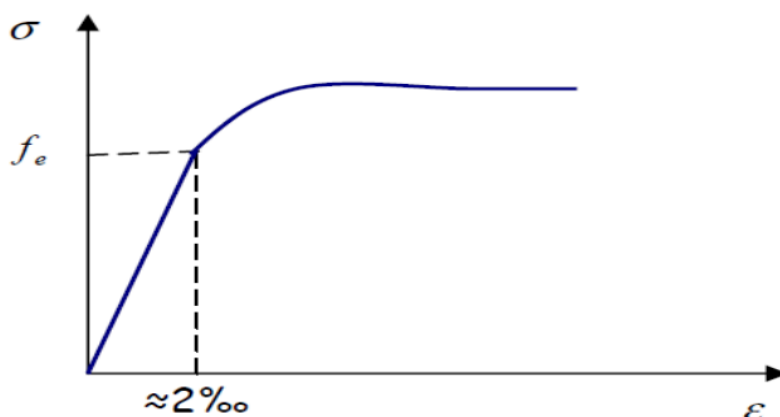


Figure 5 Loi de comportement d'un acier écroui (IGUETOULENE.F, 2011)

#### 4.2. Types d'Aciers d'Armature et Leur Comportement Contrainte-Déformation

Deux catégories principales d'aciers sont couramment employées pour le renforcement du béton : l'acier naturel (ou acier doux) et l'acier écroui.

**Acier Naturel:** La courbe contrainte-déformation typique d'un acier naturel (Figure 4) se caractérise par une phase élastique linéaire suivie d'un palier de ductilité bien marqué après l'atteinte de la limite élastique. Ce palier, où la déformation augmente considérablement sans augmentation significative de la contrainte, permet une redistribution des contraintes au sein de la structure et une meilleure capacité d'absorption de l'énergie en cas de sollicitations extrêmes (comme les séismes).

**Acier Écroui:** L'écrouissage est un traitement mécanique appliqué à l'acier pour augmenter sa limite d'élasticité. La courbe contrainte-déformation d'un acier écroui (Figure 5) diffère de celle de l'acier naturel en ce qu'elle ne présente pas de palier de ductilité aussi prononcé après la limite élastique. Bien que sa limite d'élasticité soit plus élevée (atteinte pour une déformation de l'ordre de 2%), son allongement à rupture et sa ductilité globale sont généralement réduits par rapport à l'acier naturel

### 4.3. Modélisation Réglementaire du Comportement de l'Acier (BAEL)

Pour simplifier les calculs et les justifications des structures en béton armé, les règlements, comme le BAEL (Béton Armé aux États Limites) en France, adoptent un modèle de comportement idéalisé pour l'acier : le modèle élastoplastique parfait (Figure 6).

Selon ce modèle, l'acier est supposé avoir une réponse linéaire et élastique jusqu'à l'atteinte de sa limite élastique ( $f_e$ ). Au-delà de cette limite, le comportement est considéré comme parfaitement plastique, c'est-à-dire que la déformation augmente sans aucune augmentation de la contrainte jusqu'à la rupture. Ce modèle ne prend pas en compte l'écrouissage ni la striction observée dans le comportement réel de l'acier.

La déformation ultime admissible de l'acier ( $\epsilon_{su}$ ), c'est-à-dire la déformation maximale avant rupture, est fixée par le BAEL à 10‰ (10 pour mille). Cette valeur, relativement élevée, intègre un coefficient de sécurité et tient compte de la ductilité intrinsèque de l'acier, essentielle pour assurer la capacité de déformation des structures en béton armé sous des charges importantes ou accidentelles.

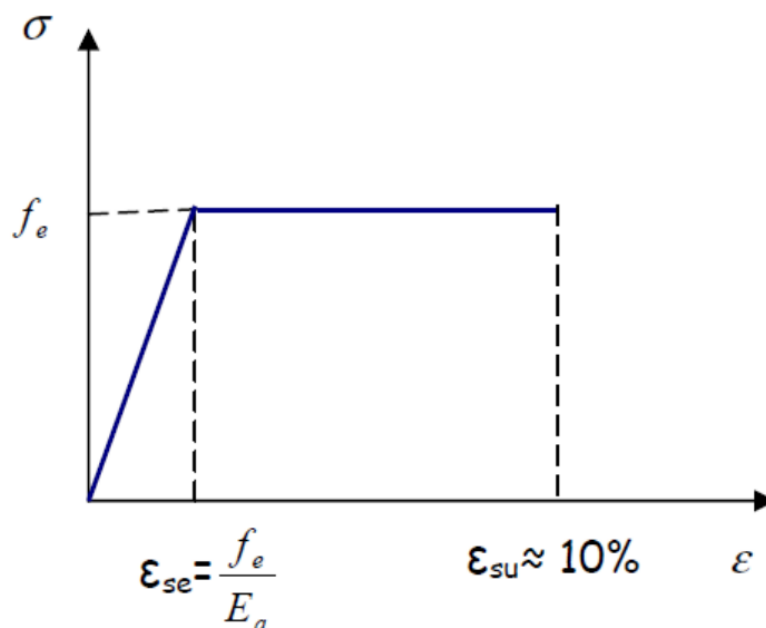
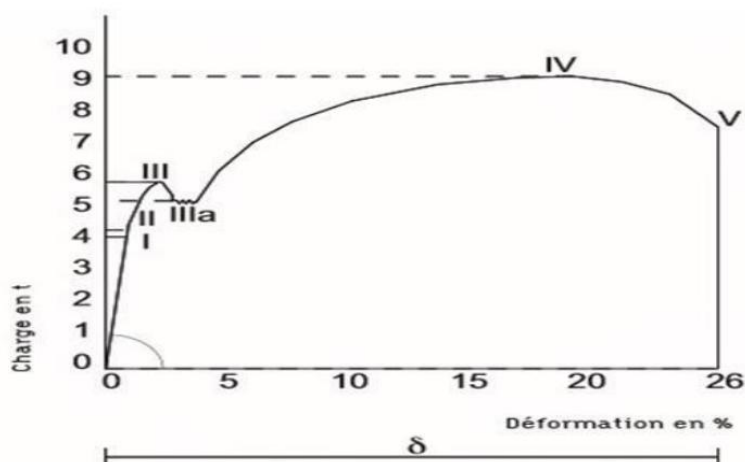


Figure 6 Diagramme contrainte-déformation selon le BAEL (BAEL, 2000)

#### 4.4. Caractéristiques Mécaniques Clés de l'Acier d'Armature

Plusieurs caractéristiques mécaniques de l'acier sont fondamentales pour la conception et la justification des structures en béton armé :

- **La Limite d'Élasticité ( $f_e$ ):** C'est la contrainte à partir de laquelle l'acier commence à se déformer de manière permanente (plastique). Elle constitue la base des calculs de résistance et varie en fonction du type d'acier utilisé.
- **Le Module d'Élasticité Longitudinale (E):** Il représente la rigidité de l'acier dans la phase élastique et est pratiquement constant pour tous les types d'acier de construction, avec une valeur conventionnelle de 200 000 MPa.
- **Propriétés d'Usage Garanties:** Les aciers de construction métallique, utilisés comme armatures, sont définis par leurs propriétés d'usage, qui font l'objet de garanties de la part des fabricants.
- **Comportement en Traction et Compression:** Contrairement au béton, le comportement de l'acier est considéré comme similaire en traction et en compression. La loi contrainte-déformation est intrinsèque à la nature de l'acier.



**Figure 7** Diagramme charge-déformation (comportement réel de l'acier) (Glannoum, 1998)

#### 4.5. Phases de Comportement Réel de l'Acier sous Traction

Le diagramme charge-déformation réel de l'acier sous traction (Figure 7) met en évidence trois phases distinctes :

- **Phase Élastique (Phases I et II):** Dans cette phase initiale, lorsque l'acier est soumis à une traction, il s'allonge de manière uniforme et proportionnelle à la charge appliquée. Si la charge est retirée avant d'atteindre la limite d'élasticité, l'acier retrouve sa longueur initiale sans déformation résiduelle.
- **Phase Plastique (Phases III et IV):** Au-delà de la limite d'élasticité, l'allongement de l'acier continue d'augmenter même avec une faible augmentation de la charge. Les déformations deviennent alors irréversibles (plastiques). Le phénomène d'écrouissage, qui se produit dans cette phase, modifie les propriétés de l'acier en augmentant sa limite d'élasticité mais en réduisant sa ductilité et son allongement à rupture..
- **Phase de Rupture (Phase V) :** Après la phase d'allongement plastique, la charge que l'acier peut supporter commence à diminuer en raison de la réduction de sa section transversale (striction). Cette réduction localisée de la section conduit finalement à la rupture.

## 5. Le Béton Armé et l'Adhérence : Un Pilier de la Performance Structurelle

Le béton armé, matériau composite de premier plan dans la construction, résulte de l'association du béton et de barres d'acier. Cette combinaison astucieuse permet de conjuguer la résistance à la compression du béton avec la résistance à la traction de l'acier, optimisant ainsi la performance structurelle des ouvrages, notamment en génie civil.

### 5.1. Le Rôle Crucial de l'Adhérence Acier-Béton

Le principe fondamental du béton armé repose sur une distribution efficace des efforts entre ses deux constituants :

- Le béton est principalement sollicité en compression, tirant parti de sa robustesse face à ce type de charge. L'acier peut également contribuer à la reprise des efforts compressifs dans certaines configurations.
- L'acier, quant à lui, prend en charge les efforts de traction, compensant la faiblesse inhérente du béton dans ce domaine.

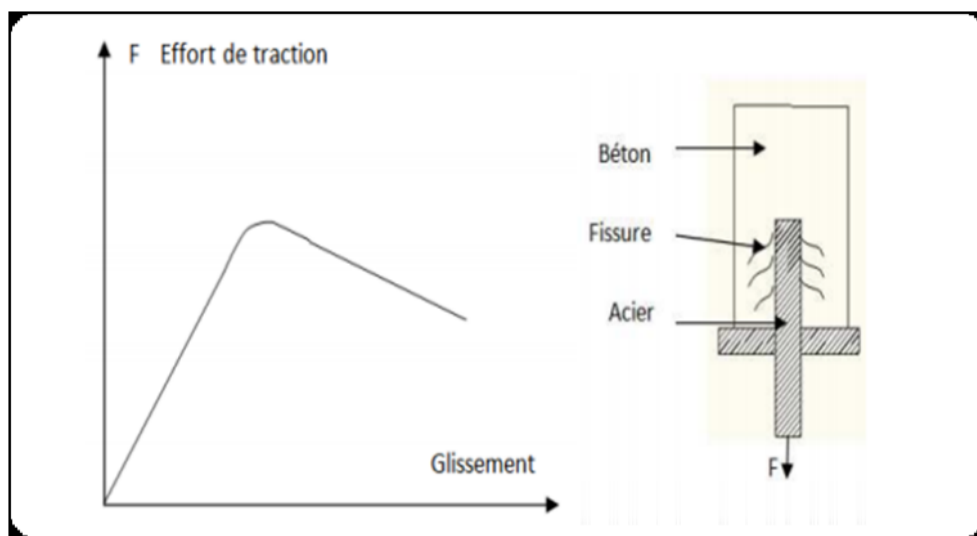
Cette synergie n'est possible que grâce à une interaction étroite entre l'acier et le béton, facilitée par plusieurs facteurs déterminants :

- **L'Adhérence Acier-Béton** : Véritable interface mécanique, l'adhérence permet la transmission des efforts entre l'acier et la matrice de béton. Elle assure une solidarité structurelle, garantissant que les deux matériaux travaillent conjointement pour résister aux sollicitations. La Figure I.12 illustre le comportement d'une barre d'acier lors d'un essai d'arrachement, une méthode courante pour évaluer la qualité de cette adhérence.
- **L'Analogie des Coefficients de Dilatation Thermique** : La similitude des coefficients de dilatation thermique de l'acier et du béton (environ  $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) minimise les contraintes internes susceptibles d'apparaître en raison des variations de température.
- **L'Absence de Réactions Chimiques Nuisibles et la Protection contre la Corrosion** : La pâte de ciment ne réagit pas chimiquement de manière néfaste avec l'acier. De plus, l'enrobage de béton autour des armatures joue un rôle protecteur essentiel en isolant l'acier de l'environnement extérieur et en le préservant de la corrosion.

Ces caractéristiques confèrent au béton armé sa performance et sa durabilité, expliquant son emploi généralisé dans le secteur de la construction.

L'adhérence acier-béton est favorisée par plusieurs aspects :

- **a) L'État de Surface et la Forme des Barres d'Acier :** Les barres d'armature modernes sont dotées de nervures saillantes qui augmentent considérablement la surface de contact mécanique avec le béton, améliorant ainsi l'ancrage. Une surface rugueuse contribue également à une meilleure adhérence.
- **b) La Qualité du Béton d'Enrobage :** Une résistance à la compression élevée du béton d'enrobage, obtenue par un dosage et une classe de ciment appropriés ainsi qu'une bonne vibration lors du coulage, favorise une adhérence optimale.
- **c) La Position des Barres :** La position et l'inclinaison des barres dans le coffrage par rapport à la direction de bétonnage peuvent influencer l'adhérence.
- **d) Le Diamètre des Barres :** L'adhérence tend à diminuer avec l'augmentation du diamètre des barres.



**Figure 8** Comportement d'une barre d'acier soumis à un essai d'arrachement (S.DRIZI, 2012)

## 5.2. Origine Et Causes De Dégradation Du Ciment :

Avant d'examiner les mécanismes de dégradation, il est essentiel de définir ce que l'on entend par dégradation du béton. Il s'agit d'une diminution des performances initiales du

matériau, se manifestant par une détérioration, une déformation ou une altération de ses propriétés. Les fissures sont souvent les premiers signes visibles, mais d'autres manifestations comme les éclats ou les traces de rouille peuvent également apparaître.

### 5.3. Dégradations d'Origine Chimique et causes de dégradation du béton :

- **La Corrosion des Armatures :** La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement, entraînant une modification de ses propriétés et souvent une perte de fonctionnalité. Dans le béton armé, elle se traduit par des éclats de l'enrobage, des épaufures et l'apparition de taches de rouille, conduisant à une réduction de la section des barres d'acier, à leur rupture potentielle et à une diminution de la capacité portante de la structure. La dégradation est progressive mais s'accélère après la détérioration de l'enrobage, comme illustré par le diagramme de Tuutti (Figure I.1). La corrosion débute lorsque des agents agressifs (diminution du pH due à la carbonatation ou pénétration d'ions chlorure) atteignent les armatures. (MAI-NHU, 2015)

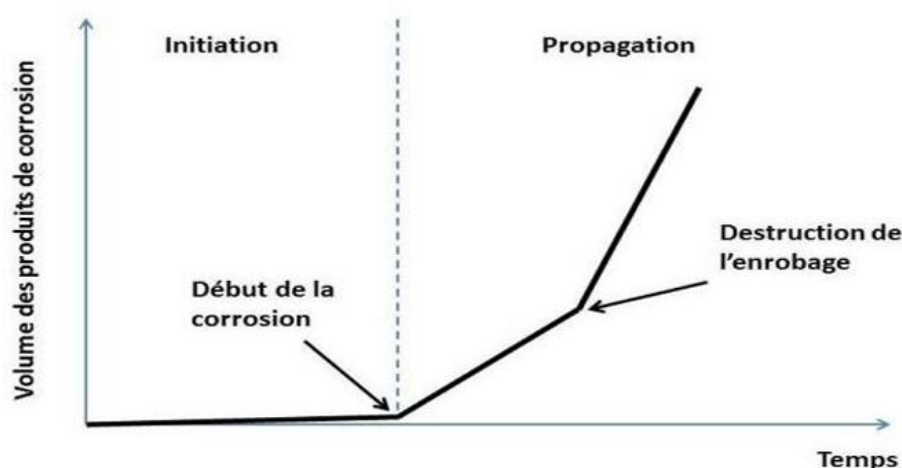


Figure 9 Dégradation schématique des armatures au cours du temps selon le diagramme de Tuutti (MAI-NHU, 2015)

- **La Carbonatation du Béton :** La carbonatation est un processus chimique résultant de la réaction entre le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) atmosphérique et l'hydroxyde de calcium  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  présent dans le béton. Cette réaction entraîne une baisse du pH de la solution interstitielle, réduisant la protection naturelle contre la corrosion des armatures (Figure 10). Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures, le film passivant protecteur

disparaît, amorçant la corrosion, réduisant le diamètre des armatures et pouvant provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.(LAKHAL, 2010)

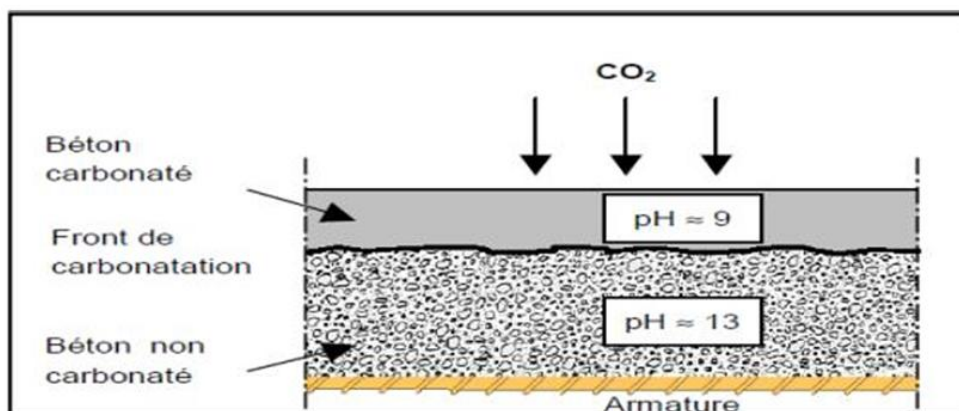


Figure 10:Carbonatation

- **La Pénétration des Ions Chlorures** : Les ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), provenant de sources internes (eau de gâchage, adjuvants, granulats) ou externes (embruns marins, sels de déverglaçage), peuvent également détruire la couche de passivation des armatures et induire la corrosion.
- **L'Alcali-réaction (RAG)** : La RAG est une réaction chimique entre certains granulats réactifs et les alcalins du ciment, en présence d'humidité et de chaux. Elle produit un gel silico-alcalin expansif qui provoque des contraintes internes, des gonflements et des fissurations progressives (Figure 11 et 12). Trois types principaux existent (alcali-silice, alcali-silicate, alcali-carbonate), affectant davantage la résistance à la traction et le module d'élasticité.(LAKHAL, 2010)

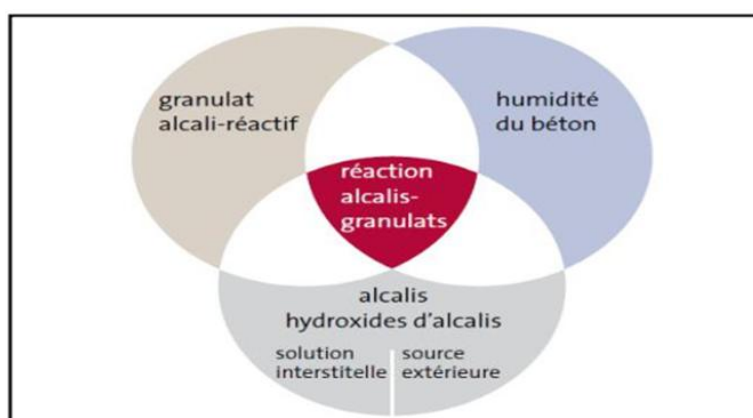


Figure 11:Conditions d'apparition de l'alcali-réaction



**Figure 12: Béton dégradé par l'alcali-réaction**

- **Les Réactions Sulfatiques** : Des températures élevées au jeune âge du béton peuvent retarder la formation d'ettringite. Dans un environnement sulfaté, une formation différée d'ettringite expansive peut se produire, entraînant des fissurations similaires à celles de la RAG. (pathologies-beton, s.d.)

#### **5.4. Dégradations d'Origine Physique**

Le béton, matériau hydraulique et poreux, est sensible aux altérations physiques liées à l'eau et aux échanges hydriques avec son environnement. (GADRI.K, 2007)

- **Retrait** : Phénomène physico-chimique inévitable, le retrait se manifeste sous différentes formes (plastique, thermique, endogène, de séchage, de carbonatation) et peut induire des fissurations (Figure 13 et 14). Le retrait de séchage est souvent critique lors de réparations en termes de compatibilité des déformations.



**Figure 13: Exemple de fissuration due au retrait du béton**

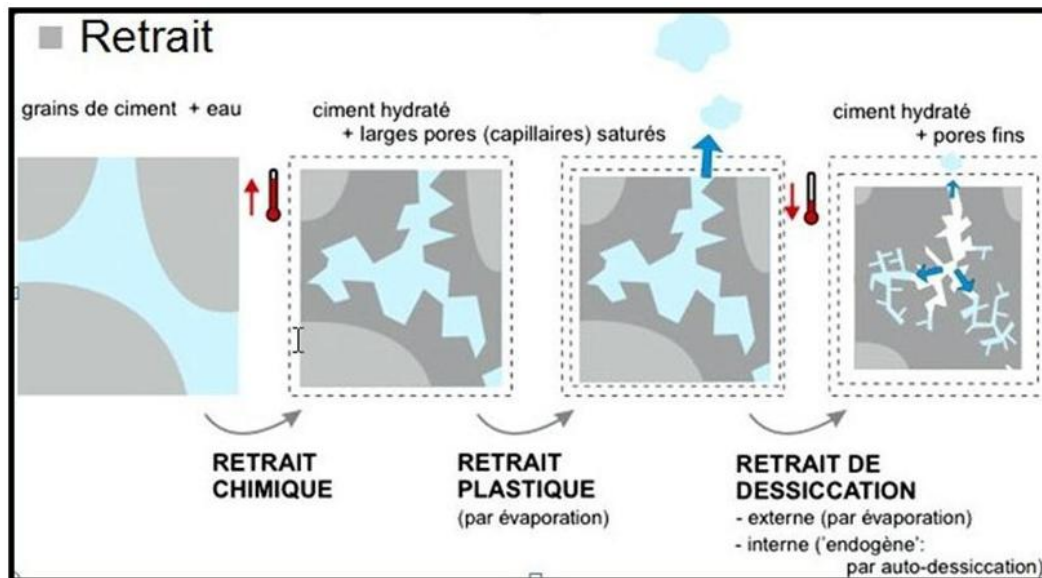


Figure 14: Les types de retrait

- **Gel-Dégel :** La formation de glace dans les pores du béton lors des cycles de gel-dégel provoque une augmentation de volume, générant des pressions internes qui peuvent dépasser la résistance à la traction et entraîner des microfissures, un feuilletage ou un écaillage de la surface (Figure 15).(holcim, s.d.)



Figure 15: Effets des cycles de gel-dégel

- **Sels de Déverglage :** En plus de leur contribution en ions chlorure à la corrosion, les sels de déverglage provoquent un refroidissement brutal de la surface du béton (réaction endothermique), induisant un choc thermique et un écaillage (Figure 16).(W. De Caluwé (FEREB), 2007)



**Figure 16: dégradation due aux sels de déverglaçage**

- **Délamination** : La combinaison des sollicitations climatiques, des sels de déverglaçage et du trafic peut entraîner une délamination du béton, notamment sur les hourdis d'ouvrages d'art.(GADRI.K, 2007)
- **Incendie** : Les incendies provoquent une élévation rapide de la température, entraînant la vaporisation de l'eau, des microfissures, des écaillages et une perte de résistance des armatures.(BENARBIA, 2017)
- **Séisme** : Même un séisme léger peut endommager les structures en béton, notamment au niveau des fondations et des liaisons.

### **5.5. Dégradations d'Origine Mécanique**

- **Tassements et Mouvements des Appuis** : Les tassements différentiels des fondations ou les mouvements de terrain peuvent induire des fissurations importantes dans la structure.(BENARBIA, 2017)
- **Chocs** : Les chocs accidentels (collisions) peuvent provoquer des épaufrures, des éclats et même la rupture des armatures.
- **Abrasion, Érosion** : L'écoulement d'eau intense ou les sollicitations mécaniques répétées peuvent entraîner une abrasion ou une érosion du béton.

### **5.6. Erreurs de Conception :**

Des erreurs de conception (sous-évaluation des charges) ou des défauts d'exécution (formulation incorrecte du béton, coffrages défectueux, mauvais positionnement des

armatures, conditions de transport et de vibration inadéquates, mauvaise manutention) peuvent être à l'origine de diverses dégradations.

Ce développement met en lumière l'importance cruciale de l'adhérence dans le comportement du béton armé et introduit un large éventail de causes potentielles de dégradation, qu'elles soient d'origine chimique, physique ou mécanique, ainsi que celles liées à des erreurs humaines lors de la conception ou de l'exécution. La compréhension de ces mécanismes est essentielle pour la mise en œuvre de stratégies de réparation et de renforcement efficaces, qui seront abordées dans la section suivante.(Aitcin, 1998, p. 41)

## 6. Les matériaux composites :

Un matériau composite est formé par la combinaison de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est synergique, conduisant à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants individuels. Généralement, un matériau composite se compose d'une ou plusieurs phases discontinues intégrées dans une phase continue. La phase discontinue, souvent désignée sous le nom de renfort ou de matériau renforçant, possède des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.(M.Berthelot, 2005)

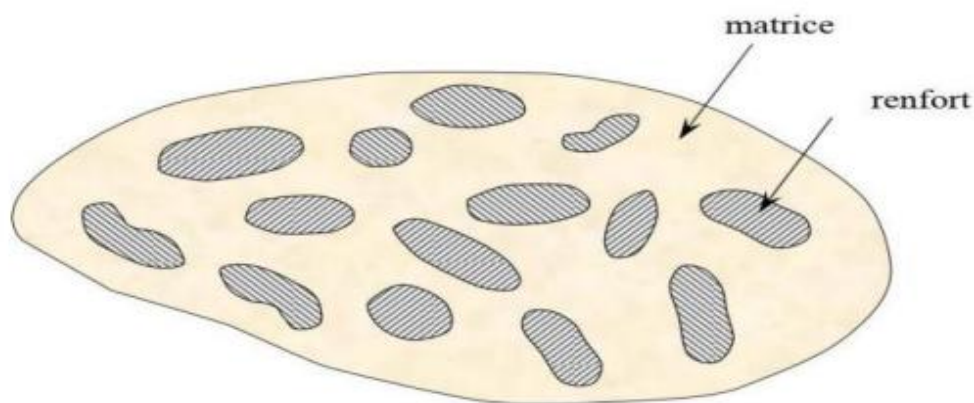


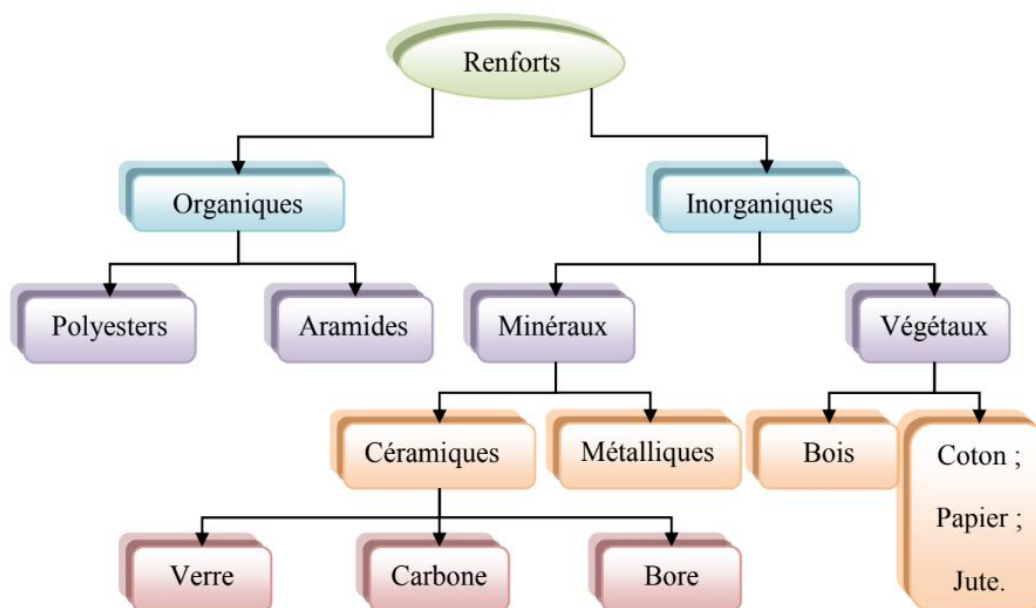
Figure 17 :Matériau composite(M.Berthelot, 2005)

Tableau1 :les différents types de composites (Badour.S, 2018)

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
Composites matrice organique - papier - carton - panneaux de fibres toiles enduites - matériaux d'étanchéité et pneumatiques	- Résine/fibre cellulosique - Résine /copeaux - Résine / tissus - Elastomère - Caoutchouc/ acier	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
composites à matrice minérale - bidon - Composite - carbone	- Ciment/sable /granulats - Carbone / fibres	- Génie civil - aviation - espace
Composites à matrice métallique	- Aluminium /fibres de bore - Aluminium /fibres de carbone	- aérospatial

### 6.1. Les renforts :

La résistance des matériaux composites vise principalement à renforcer leurs propriétés mécaniques, comme la rigidité, la résistance à la rupture et la durabilité, tout en améliorant leurs caractéristiques physiques et électriques. Parmi les autres propriétés essentielles figurent celles recherchées dans les renforts, telles qu'un faible volume, une bonne compatibilité avec les matrices et une facilité d'installation. Ces renforts peuvent provenir de diverses sources, qu'elles soient animales, végétales, synthétiques ou autres.(Berthelot)



**Figure 18 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort.**  
**Principaux matériaux de renforts(Koizumi.M, 1993)**

### 6.1.1. Les fibres :

Le béton fibré est un matériau composite composé d'une matrice, le béton, et d'un renfort, les fibres. Dans ce type de béton, les fibres ont pour rôle principal de reprendre les efforts générés par les fissures qui se forment dans la matrice. Autrement dit, les fibres ne deviennent utiles qu'en présence de fissures potentielles dans le matériau. L'une des propriétés mécaniques essentielles des fibres, qui permet de maîtriser la fissuration, est le module de Young. Ce paramètre caractérise la rigidité de la fibre : plus le module de Young est élevé, meilleur est le contrôle des fissures et plus la longueur des fissures est réduite. Cependant, cette efficacité dépend également d'un bon ancrage des fibres dans la matrice de béton.(ROSSI P. , 2010)

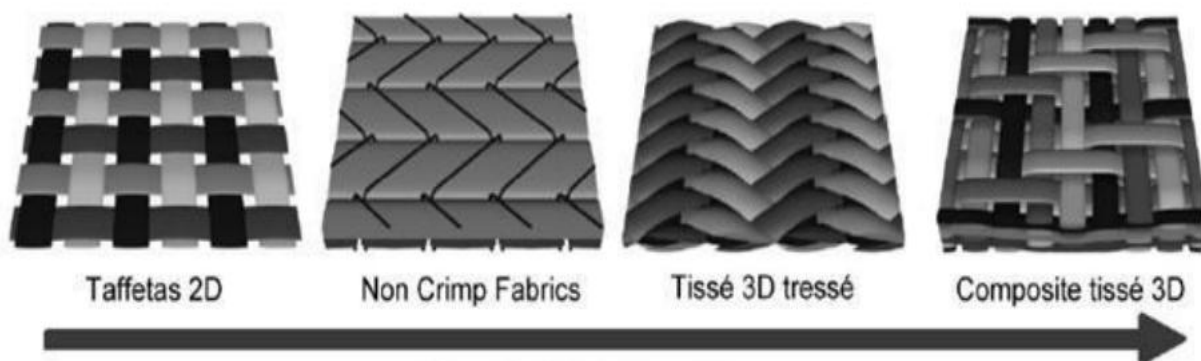
### 6.1.2. Type de fibres :

Il existe plusieurs types de fibres, ils sont classés selon leur origine (naturelles ou artificielles), leur diamètre et leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...). Leurs propriétés mécaniques, résistance à la traction et adhérence au béton, leur procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des

structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence) et de leur prix. Les différents types des fibres sont :

**i. Fibre de carbone :**

Les fibres de carbone sont reconnues pour leurs propriétés mécaniques remarquables et sont produites à partir d'un polymère de base innovant. Aujourd'hui, les fibres les plus couramment utilisées sont des fibres acryliques dérivées du poly acrylonitrile. La qualité des fibres de carbone obtenues dépend en grande partie des caractéristiques du matériau précurseur. Leur fabrication repose sur la décomposition thermique des fibres acryliques, sans fusion, un processus qui aboutit à leur graphitisation. Par ailleurs, le brai, un sous-produit issu du raffinage du pétrole ou de la houille, est également utilisé dans la production de fibres de carbone. (Gorent, 2008)



**Figure 19: Différentes armures utilisées pour les matériaux composites tissés**

**Tableau:1 : Propriétés des fibres de carbone(Koizumi.M, 1993)**

Propriétés en traction	HR		IM	HM	
	Rt (Mpa)	300 à 5000	4000 à 4500	47000 à 52000	2000 à 2500
EoT(MPa)	220000 à 240000	235000à 250000	275000 à 300000	350000 à 400000	450000à 500000
AR(%)	1.2 à1.5	1.6 à1.8	1.4à1. 6	0.5 à0.7	0.3 à0.5
Masse volumique (g/cm3)	1.75 à1.8	1.75 à1.8	1.7 à1.8	1.8 à1.85	1.9 à1.95

RT, EoT et AR sont respectivement la résistance à la rupture; le module de Young

Et l'allongement la rupture.

## ii. Fibres de verre :

La fibre de verre est le renfort le plus couramment utilisé dans la fabrication de matériaux composites, en raison de son excellent rapport performances mécaniques/coût, ce qui lui confère une position dominante dans ce domaine.

La production des fibres de verre implique la fusion d'un mélange à base de silice ( $\text{SiO}_2$ ) à une température de  $1200^\circ\text{C}$ , suivi d'un étirage à travers une filière en platine. Les filaments ainsi formés sont ensuite refroidis pour atteindre un diamètre variant entre 5 et 13  $\mu\text{m}$ , à une vitesse de 60 m/s. En ajustant la composition du mélange (silice, kaolin, chaux, etc.), il est possible d'obtenir différents types de verre. (M.Berthelot, 2005)



Figure 20 Exemple de fibre de verre (DORLOT J.M, 1986)

Tableau 2: Propriétés des fibres de Verre (M.Berthelot, 2005)

Propriétés traction	VerreE	VerreR	VerreS
Rt(MPa)	3400	4400	4900
EoT(MPa)	73000	86000	87000
AR (%)	4.9	5.2	-----
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.55	2.54

### iii. Fibre aramides :

La fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Elle se divise en deux catégories, caractérisées par des rigidités distinctes : les fibres de bas module, utilisées notamment dans la fabrication de câbles et de gilets pare-balles, et les fibres de haut module, employées pour renforcer les composites à hautes performances.[ GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES]

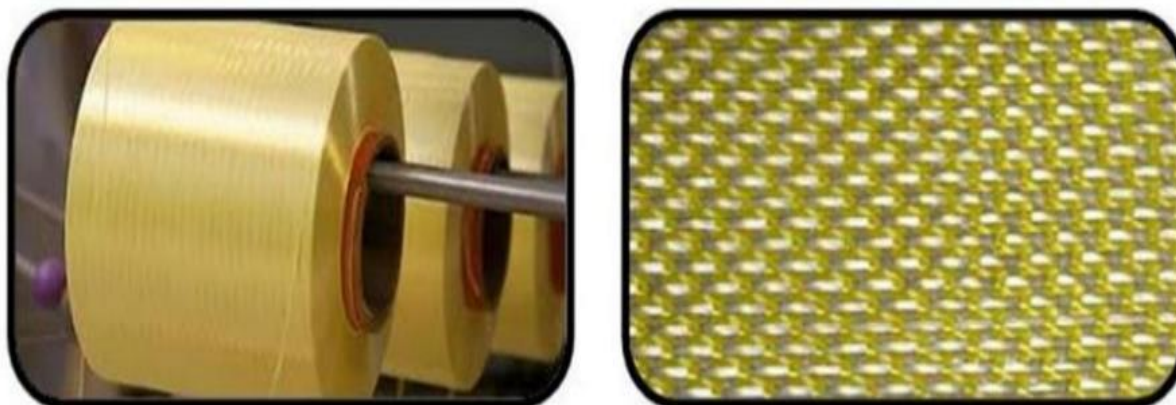


Figure 21 Exemple de fibre d'aramide (DORLOT J.M, 1986)

Tableau 3: Propriétés des fibres d'aramides (M.Berthelot, 2005)

Propriétés	Kevlar 29	Kevlar 49
<b>Rt(MPa)</b>	2700	3000
<b>EoT(MPa)</b>	60000	120000 à 130000
<b>AR(%)</b>	4	2.1
<b>Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.44	1.45

### iv. Fibres artificielles :

Cette famille de fibres comprend les fibres d'acier, les fibres de fonte, les fibres de verre, les fibres de carbone, l'amiante, entre autres. Ces matériaux sont largement utilisés dans le secteur industriel, et plus spécifiquement dans le domaine du génie civil.

### v. Fibres métalliques :

Selon la norme NF EN ISO 16120-2 et [Asquapro,2014], leur résistance à la traction doit dépasser 1000 MPa. La longueur de la fibre doit être au moins trois fois supérieure au diamètre du plus gros granulats. Par ailleurs, la géométrie de la fibre doit favoriser son ancrage dans la matrice béton. Par exemple, une forme symétrique en "crochet" (appelée baïonnette) optimise cet ancrage. Ce type de fibre est le plus couramment utilisé dans le génie civil et a fait l'objet de nombreuses recherches. (ROSSI P. A., 2005)

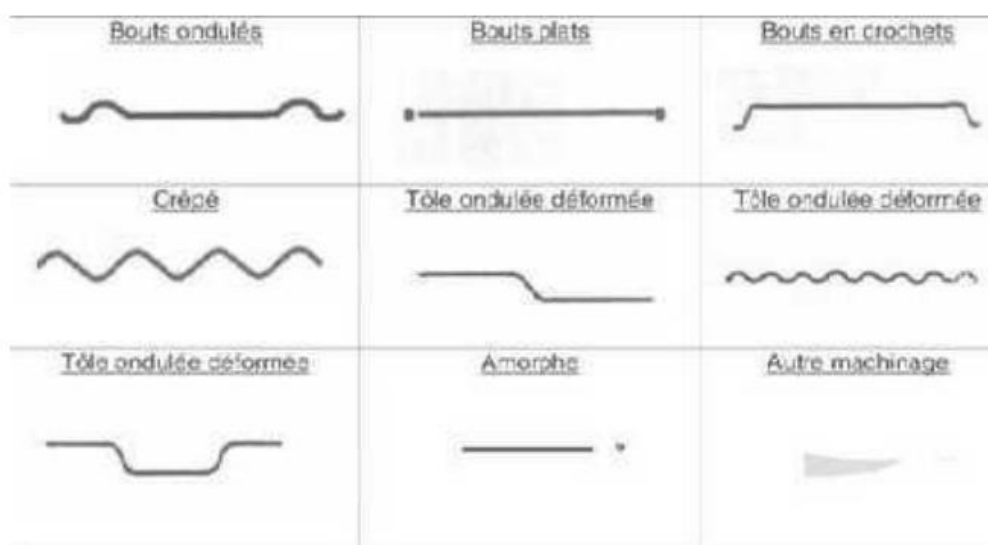


Figure 22 Les différentes formes des fibres métalliques (Jesse. F)

### vi. Les fibres de polypropylène :

Les fibres de polypropylène sont produites depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène, un polymère cristallisable appartenant à la famille des polyoléfines, a connu une expansion croissante dans ce domaine grâce à ses propriétés avantageuses : une déformabilité élevée et une bonne résistance en traction, pouvant atteindre 800 MPa. Ces fibres sont utilisées dans la construction de bâtiments, notamment pour la création de revêtements de façades (comme pour le Londonderry House Hôtel), ainsi que pour la fabrication de panneaux décoratifs de 33 cm d'épaisseur. Elles sont également employées dans la réalisation de canalisations et de pieux.



**Figure 23**Fibres de polypropylène (Guo YC, 2018)

**vii. Fibres naturelles :**

Les fibres naturelles sont utilisées depuis plus de 3000 ans dans les matériaux composites. Par exemple, dans l'Égypte antique, un mélange de paille et d'argile servait à construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont suscité un intérêt croissant, tant dans le milieu universitaire que dans diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles pouvant être utilisées comme renforts ou charges. Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute,...)
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier...
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok...
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco...
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, d'orge ou d'autres cultures les fibres naturelles contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. (Dalour, 2007)

**Propriétés mécaniques des composites «PRF» :**

Les propriétés mécaniques des matériaux composites présentent une grande variabilité. Ces caractéristiques sont influencées par plusieurs facteurs, notamment les fibres intégrées dans le composite (leur type, leur quantité et leur orientation), la matrice employée, ainsi que le rapport volume-fibre, qui correspond au volume des fibres par rapport au volume total du composite. De plus, le volume ou la dimension du composite lui-même joue également un

rôle [-Carolin, A.]. En règle générale, les composites à base de fibres de carbone offrent une résistance et une rigidité supérieures à ceux contenant des fibres de verre (M. Aчит-Henni1, 2010), La Figure 24 illustre les principales propriétés mécaniques des matériaux composites fréquemment utilisés dans le domaine du génie civil.

• **Caractéristiques et propriétés des fibres :**

Les fibres discontinues utilisées dans le béton peuvent être caractérisées de différentes manières comme la montre la figure suivant :

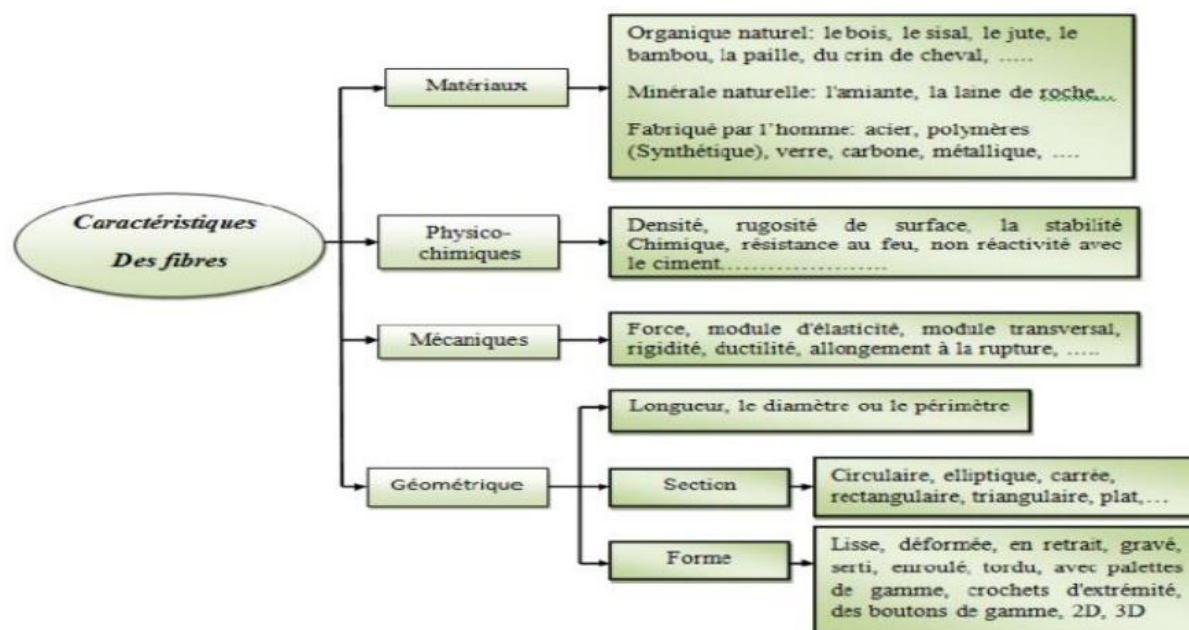
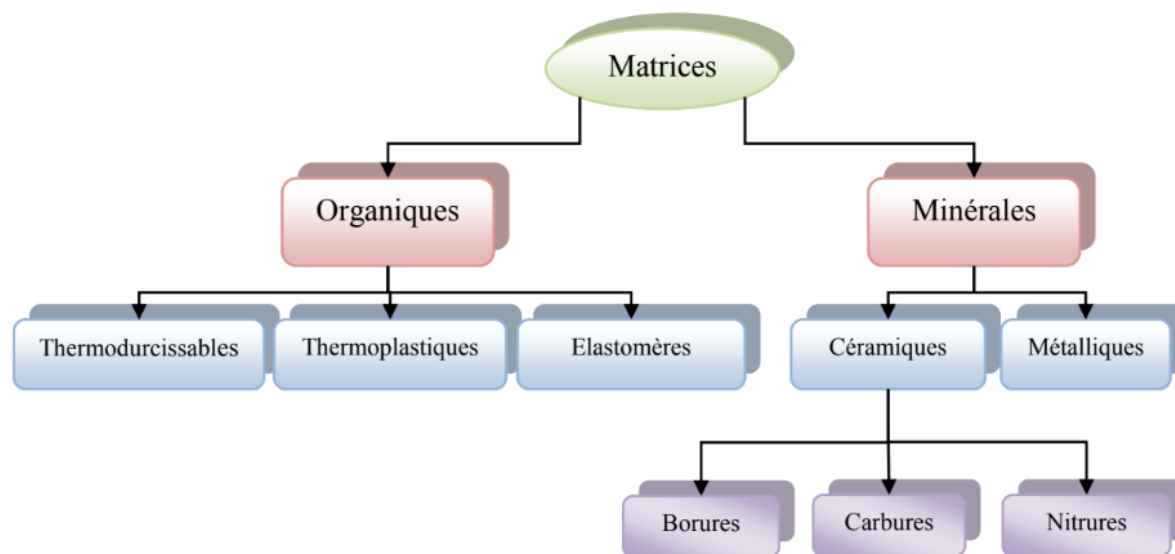


Figure 24 Les caractéristiques principales des fibres (COMMITTEE, 1984)

## 6.2. Les matrices

Cette étape est cruciale pour garantir la cohésion entre les différents éléments constitutifs. Elle implique l'utilisation d'une résine (polyester, époxy, etc.) et d'une charge (carbonate de calcium, graphite, etc.). Leur rôle principal est de lier les renforts, de répartir les charges (contraintes, résistance à la traction et rigidité), et d'offrir une protection chimique contre les agents extérieurs agressifs tels que les acides, l'humidité et la corrosion. En outre, elles confèrent au produit sa forme finale. Dans le cas des composites plastiques, la matrice est par définition un polymère ou une résine organique. Le choix de la matrice dépend des spécificités de l'application envisagée pour le matériau composite. (Koizumi.M, 1993)



**Figure 25** Les différentes familles de Matrice

### 6.2.1. Résines thermodurcissables :

Les résines les plus fréquemment employées pour le renforcement et la réhabilitation des ouvrages de génie civil sont le polyester, l'époxy et le phénolique. Ces résines thermodurcissables offrent des performances supérieures aux résines thermoplastiques en termes de résistance mécanique et chimique, de stabilité thermique et de durabilité. Dans le domaine du génie civil, et plus particulièrement pour le renforcement et la réhabilitation des structures, les résines époxy et phénoliques sont les plus couramment utilisées. (Mallick, 2007)

**Tableau 5 :**Caractéristiques des résines thermodurcissables(Biron, 2004)

Propriétés	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	1.2	1.24	1.2
Module d'élasticité (GPa)	4	2.5	3
Résistance à la traction (MPa)	65	40	90
Allongement (%)	2.5	1.2	8

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont les suivantes :

- **Résine polyester** : Elle offre une bonne adhérence aux fibres, est peu coûteuse, mais présente un retrait important et une faible résistance à l'humidité et à la chaleur.
- **Résine phénolique** : Bien que ses propriétés mécaniques soient inférieures à celles des résines époxydes, elle est utilisée lorsque des exigences de résistance au feu sont requises.
- **Résine polyamide** : Son utilisation est relativement complexe et onéreuse, mais elle se distingue par ses excellentes propriétés sur une large plage de températures, allant de -100 °C à +260 °C.
- **Résine époxyde** : Cette famille de résines se compose de plusieurs composants à mélanger :
  - Une **résine de base**, portant des groupes époxydes, généralement un liquide plus ou moins visqueux ou un solide soluble/fusible selon les conditions.
  - Un **diluant**, réactif (contenant des groupes époxydes) ou non réactif (souvent des solvants organiques), dont le rôle est de réduire la viscosité du mélange.
  - Un **flexibilisant**, qui peut être réactif ou non, destiné à améliorer la souplesse du produit final durci.
  - Un **durcisseur**, porteur de groupes chimiques réagissant avec les groupes époxydes pour former, en fin de polymérisation, un matériau solide. Il se présente sous forme liquide ou solide (poudre, paillettes, blocs).

La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées [RIGAL. J.C et NEGRIER. A. 2013].

### 6.2.2. Résines thermoplastiques :

La famille des résines thermoplastiques est très diversifiée et peut être classée en deux catégories principales : les plastiques courants et les plastiques techniques.

Les plastiques courants sont fréquemment utilisés dans des procédés tels que l'injection pour produire des objets moulés, ou l'extrusion pour fabriquer des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les résines thermoplastiques se distinguent par leur capacité à être remodelées plusieurs fois grâce à des cycles successifs de chauffage et de refroidissement, ce qui les rend recyclables et réutilisables. Leur structure est constituée de chaînes linéaires, nécessitant un chauffage pour les mettre en forme et un refroidissement pour les stabiliser. [Berthelot, J.M (2012),]

Parmi les principales résines thermoplastiques utilisées, on trouve :

- Le polyamide : apprécié pour sa résistance aux chocs, sa tenue à la fatigue et sa résistance aux hydrocarbures.
- Le polytéréphtalate d'éthylène et de butylène : connu pour sa rigidité.
- Le polycarbonate : réputé pour sa résistance aux chocs.
- Les polysulfures de phénylène : reconnus pour leur résistance à l'hydrolyse.
- Les polyoxyméthylènes : appréciés pour leur bonne tenue à la fatigue.
- Les polysulfones : valorisés pour leur stabilité chimique.
- Le polypropylène : relativement stable thermiquement, mais inflammable.

Les résines thermoplastiques présentent un avantage économique significatif en raison de leur coût relativement bas, lié à la disponibilité des matières premières et à des procédés de fabrication peu coûteux. Cependant, ce faible coût s'accompagne souvent de propriétés mécaniques et thermomécaniques moins performantes que celles des autres matériaux.

**Comparaison entre ces deux types de résines (PERROT.Y, 2006)**

**Tableau 4 : Comparaison entre les deux types de résine (PERROT.Y, 2006)**

Thermoplastiques	Thermodurcissables
Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Illimité	Réduit
Difficile	Aisée
Chauffage + refroidissement	Chauffage continue
Court	Long (polymérisation)
Assez bonne	Limitée

Réduite	Meilleure
Recyclables	Perdus ou utilisés en charges
Propreté	Emanations des solvants

### 6.2.3. Matrices métalliques et céramiques :

Ces matériaux sont utilisés respectivement pour des applications à hautes températures (moins de 500°C) et à très hautes températures (plus de 1000°C). Cependant, leur coût de fabrication est particulièrement élevé. (Teng, 2002, p. 245)

### 6.3. Comportement mécanique des composites :

Dans les matériaux composites, les fibres jouent un rôle essentiel en supportant principalement les efforts dans leur direction. La matrice, quant à elle, assure le transfert des contraintes vers les fibres et les protège. La Figure I.18 illustre des courbes typiques de contraintes-déformations pour différents composites soumis à un chargement de traction directe, en comparaison avec celles des aciers. (K.Saidani, 2013)

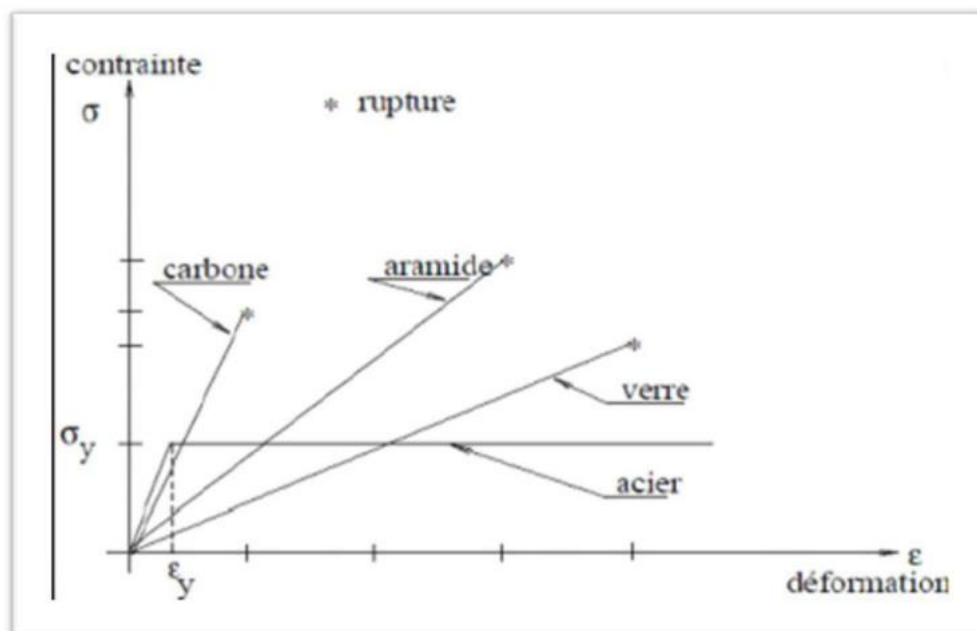
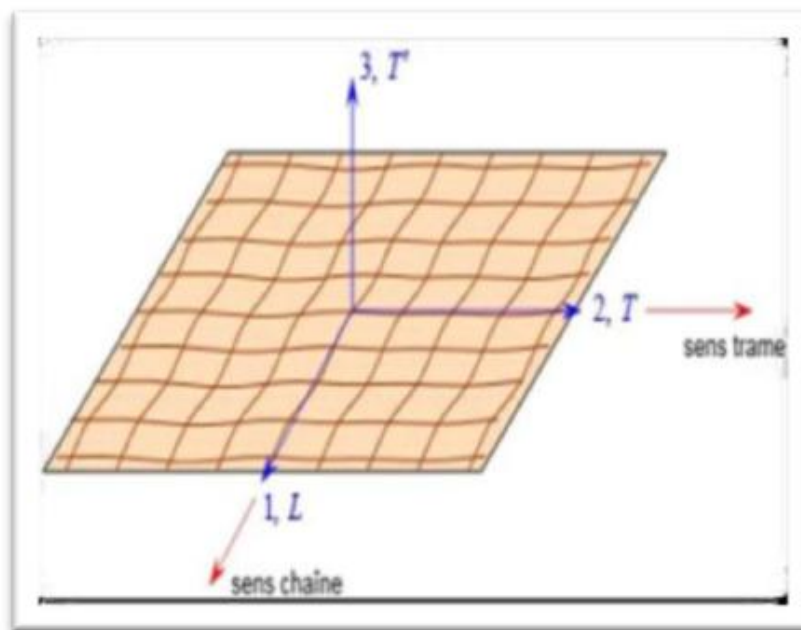


Figure 26 Confrontation du comportement des composites et de l'acier (WU, 2004)

### 6.4. Modélisation des composites :

Les matériaux composites sont formés de couches unidirectionnelles, certaines orientées dans le sens des chaînes et d'autres dans le sens des trames. Ces matériaux possèdent trois

plans de symétrie orthogonaux deux à deux et présentent un comportement élastique similaire à celui d'un matériau orthotrope. (M. Aчит-Henni, 2010)



**Figure 27** Couche de matériau composite orthotrope (Nekmouche A, 2014)

En effet, un matériau composite se distingue par la présence de deux plans de symétrie perpendiculaires et d'un troisième axe, ce qui le classe parmi les matériaux orthotropes. Un matériau orthotrope est défini par 9 constants élastiques indépendants, à condition que les plans de symétrie soient clairement identifiés.

### 6.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites :

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Une légèreté permettant de réduire le poids des structures ;
- Une excellente résistance à la corrosion et à la fatigue ;
- Une inertie chimique face à divers produits (graisses, solvants, liquides hydrauliques, peintures) ;
- Une grande flexibilité de conception, permettant la fabrication de formes complexes, l'intégration d'éléments fonctionnels et la réduction des nuisances sonores.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Coût élevé des matières premières et des procédés de fabrication ;

- Gestion complexe des déchets, accentuée par une réglementation environnementale stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que:

- la maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène;
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place;
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

Le recyclage reste très restreint, car les procédés actuels (comme le broyage) sont coûteux et produisent des matériaux de faible qualité, peu valorisables.

Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables. (Agoudjil.A, 2008 )

## **7. Conclusion :**

Le béton armé allie la résistance à la compression du béton à la résistance à la traction de l'acier, ce qui en fait un matériau de construction robuste et durable. Les matériaux composites, plus récents, offrent légèreté, résistance et performance, ouvrant la voie à des structures innovantes et plus efficaces.

## **Chapitre II :**

**Approche analytique : Contraintes et Fissures**

## 1. Introduction :

La fissuration du béton armé est un phénomène inévitable qui joue un rôle déterminant dans l'évaluation de la durabilité et de la sécurité des structures. Dans le contexte des sollicitations mécaniques, du retrait ou des conditions environnementales, l'apparition de fissures peut influencer deux aspects essentiels : l'esthétique et les performances à long terme. Ces dernières sont notamment affectées par la corrosion des armatures et la perte de rigidité. Les méthodes classiques de calcul, qui constituent le fondement de nombreuses études, sont basées sur des formulations empiriques. Celles-ci, comme celles de l'Eurocode 2, ont montré leurs limites face à des configurations complexes ou des renforcements spécifiques.

Dans ce contexte, le renforcement des structures en béton armé à l'aide de matériaux composites, constitue une solution innovante et performante. Lorsqu'ils sont appliqués sur les surfaces tendues des éléments (extrados ou intrados), ces matériaux permettent de réduire l'ouverture des fissures, de modifier leur distribution et d'accroître la résistance à la fissuration, en reprenant efficacement les efforts de traction.

Néanmoins, l'incorporation de ces matériaux entraîne une altération significative des mécanismes de fissuration, ce qui soulève de nouveaux enjeux, notamment en ce qui concerne l'interface béton-composite, une zone critique soumise à des contraintes de cisaillement et de décollement. Une analyse approfondie de cette interaction s'avère indispensable pour garantir l'efficacité du renforcement.

Afin d'appréhender de tels phénomènes de manière plus approfondie, il est proposé de se référer à la mécanique de la rupture, qui présente un cadre théorique rigoureux et plus général. En opposition avec les méthodologies conventionnelles qui se basent exclusivement sur les contraintes admissibles, cette approche novatrice prend en compte les paramètres énergétiques et géométriques des fissures. Cette intégration permet une modélisation avec une précision accrue du processus d'initiation et de propagation des fissures, y compris dans les matériaux composites et aux interfaces.

Ainsi, cette recherche s'inscrit dans une volonté de mieux comprendre, modéliser et prédire la fissuration dans les structures en béton armé renforcées par des composites. Pour ce faire, elle vise à intégrer les outils analytiques et numériques avancés issus de la mécanique de

la rupture. Une attention particulière est portée à la modélisation de l'interface béton-composite, dans le cadre des recherches actuelles.

## **2. Revue de solutions existantes sur les contraintes d'interfaces**

### **2.1. Cadre Théorique et Typologie des Solutions Analytiques**

Les modèles analytiques développés pour l'étude des structures renforcées à l'aide de plaques composites reposent généralement sur l'hypothèse que les matériaux présentent un comportement linéaire et élastique. Une simplification courante, bien que rarement explicitée, consiste à considérer les contraintes interfaciales aussi bien de cisaillement que normales comme uniformément réparties dans l'épaisseur de la couche d'adhésif. Deux grandes familles d'approches se distinguent dans la résolution de ces problèmes : l'analyse par étapes, représentée notamment par les travaux de Roberts et Haji-Kazemi, et l'approche fondée sur la compatibilité des déformations, adoptée par des auteurs tels que Vilnay, Liu et Zhu, Taljsten, ainsi que Malek et collaborateurs

### **2.2. Variantes des Solutions Basées sur la Compatibilité des Déformations**

Plusieurs solutions, notamment celles proposées par Vilnay, Liu et Zhu, Taljsten, et Malek et al., exploitent la compatibilité des déformations pour déterminer les contraintes à l'interface adhésive. Bien qu'elles partagent la prise en compte des déformations en flexion de la poutre et axiales de la plaque, ces solutions diffèrent principalement par :

- Les termes utilisés pour décrire les déplacements longitudinaux à l'interface.
- La formulation des contraintes normales et de cisaillement, qui dépend de la manière dont sont intégrés les effets de la déformation verticale ou de la contrainte normale à l'interface.

### **2.3. Démarche en Deux Étapes de la Solution de Roberts et Haji-Kazemi (Charge UDL)**

La méthode proposée par Roberts et Haji-Kazemi pour l'analyse du renforcement composite sous charge uniformément distribuée (UDL) comprend deux étapes distinctes. Initialement, la compatibilité des déformations est utilisée pour déterminer la contrainte de cisaillement à l'interface adhésive. Ensuite, la plaque de renforcement est modélisée comme une poutre flexible reposant sur un milieu élastique (représentant l'adhésif), avec l'application

d'un moment de flexion et d'une force de cisaillement à ses extrémités. La solution finale est obtenue en combinant les contraintes issues de ces deux étapes, en notant la faible contribution des contraintes normales interfaciales.

#### **2.4. Généralisation de l'Analyse avec la Solution de Roberts**

Contrairement à certaines solutions spécifiques, l'approche de Roberts offre une plus grande flexibilité face à diverses conditions de chargement. Elle se structure en trois étapes. La première consiste à déterminer la contrainte de cisaillement interfaciale pour une section composite infinie. La deuxième étape introduit l'effet d'une force axiale opposée appliquée aux extrémités de la plaque, traitée comme une poutre sur une fondation élastique de cisaillement. La troisième étape considère l'application d'un moment et de forces de cisaillement opposés aux extrémités de la plaque, modélisée comme une poutre sur une fondation élastique représentant l'adhésif. La combinaison des résultats des étapes 1 et 2 fournit les contraintes finales, tandis que les contraintes normales interfaciales sont spécifiquement évaluées lors de la troisième étape.

#### **2.5. Identification des Limites des Solutions Existantes et Motivation d'une Nouvelle Approche**

La revue des solutions existantes met en évidence des limitations significatives. Bien que la solution de Roberts et Haji-Kazemi soit jugée la plus précise pour les contraintes de cisaillement interfaciales grâce à la prise en compte des déformations axiales de la poutre et de flexion de la plaque, sa restriction à une charge uniformément distribuée et sa complexité constituent des freins. De plus, plusieurs modèles négligent des effets potentiellement importants tels que les déformations axiales ou la flexion de la plaque, particulièrement lorsque la rigidité de la plaque est non négligeable. Concernant les contraintes normales, la solution de Taljsten, bien que précise, est limitée à une charge ponctuelle. Ces limitations soulignent le besoin d'une solution plus générale et précise, capable d'intégrer les avantages de l'approche par compatibilité des déformations tout en s'adaptant à diverses configurations de chargement.

### **3. Formulation et Hypothèses Constitutives de la nouvelle Solution de Smith et Teng, 2020**

La méthodologie élaborée par Smith et Teng pour l'analyse des systèmes poutre-plaque collée, que la plaque soit en acier ou en matériau composite FRP, s'appuie sur un ensemble d'hypothèses fondamentales. Dans le cadre de cette étude, il est postulé que les matériaux constituant la poutre (adhérent 1), la plaque (adhérent 2) ainsi que l'interface adhésive se comportent de manière élastique linéaire. Les déformations des deux adhérents sont supposées être compatibles avec les sollicitations induites par le moment fléchissant, l'effort axial et l'effort tranchant. Une hypothèse simplificatrice essentielle est énoncée : l'état de contrainte dans la couche adhésive est uniforme sur son épaisseur, ce qui facilite le traitement analytique. Concernant les contraintes normales interfaciales, la méthode prend en compte la déformation de l'adhésif dans la direction de son épaisseur. Cette approche permet de modéliser la différence de courbure entre la poutre et la plaque. Dans le cadre des contraintes de cisaillement interfacial, il est communément admis, bien que cette hypothèse soit abandonnée lors de l'évaluation des contraintes normales, que la courbure de la poutre et de la plaque est identique. Cette hypothèse permet de simplifier les équations.

### **4. Approche méthodologique proposée par Xue Jun He, 2019**

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude analytique du renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites FRP, notamment dans le cadre de structures simplement appuyées. Dans ce contexte, l'approche de Smith et Teng (2020) est considérée comme une référence incontournable, bien qu'elle se limite aux systèmes poutre-plaque collée sous appuis simples. Dans le cadre de nos recherches, notre attention se porte spécifiquement sur la configuration en porte-à-faux, qui présente des particularités mécaniques importantes, notamment en termes de distribution des contraintes interfaciales. C'est dans ce contexte que les contributions de Xue-jun He se révèlent particulièrement pertinentes. En effet, l'auteur de cette étude a proposé une modélisation analytique détaillée des poutres en console renforcées par des laminés FRP. Cette modélisation a été élaborée en tenant compte de la concentration des contraintes aux extrémités libres et de l'effet de différents paramètres géométriques et mécaniques. L'approche méthodologique de Xue-jun He permet ainsi d'aborder plus

fidèlement les problématiques liées au décollement prématuré et d'optimiser les stratégies de renforcement pour ce type de structure.

#### **4.1. Synthèse : Adaptation Nécessaire pour un Renforcement en Extradados**

Le renforcement en extradados (plaque collée sur la face supérieure) nécessiterait des modifications substantielles en raison des différences fondamentales dans la distribution des contraintes, le comportement en flexion et les hypothèses de déformation.

#### **4.2. Points Clés Expliquant la Non-Applicabilité Directe :**

- **Positionnement et Sollicitation de la Plaque :** La plaque en sous-face est soumise à traction lors de la flexion de la poutre. En extradados, elle se trouve dans la zone de compression, inversant la nature des efforts normaux et influençant la distribution des contraintes dans l'adhésif.
- **Comportement en Flexion et Géométrie Composite :** Le positionnement de la plaque en extradados modifie la position du centre de gravité de la section composite et les courbures relatives entre la poutre et la plaque. Les hypothèses sur les déformations et les conventions de signe utilisées dans la méthode actuelle sont basées sur une configuration en sous-face.
- **Décollement Prématuré :** Le risque de décollement peut être plus élevé pour un renforcement en extradados, notamment sous charges cycliques, en raison du comportement en compression.

#### **4.3. Adaptations Nécessaires pour un Renforcement en Extradados :**

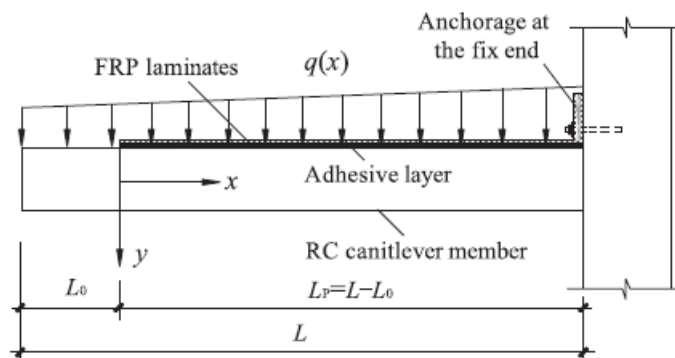
Pour adapter la méthode à un renforcement en extradados, les aspects suivants devraient être revus et modifiés :

- **Modélisation Géométrique :** Une nouvelle configuration géométrique tenant compte de la position de la plaque sur la face supérieure de la poutre est nécessaire.
- **Équations de Compatibilité :** Les équations de compatibilité des déformations devraient être reformulées en considérant l'inversion de la position relative des éléments.
- **Effets de Flexion et Adhérence :** La prise en compte des effets de flexion et de l'adhérence entre la poutre et la plaque doit être adaptée à la nouvelle configuration.

- **Hypothèses Géométriques :** La position relative de la plaque et de la poutre doit être mise à jour, ce qui impactera les expressions des moments fléchissants et des contraintes normales dans chaque élément. L'axe neutre composite se déplacera vers la plaque en extradados.
- **Courbures et Déplacements Relatifs :** Les expressions de courbure pour la poutre et la plaque devront être recalculées, et les déplacements relatifs entre les deux éléments seront inversés. La relation entre le cisaillement dans l'adhésif et les déplacements différentiels devra également être ajustée.
- **Contraintes de Cisaillement dans l'Adhésif :** Bien que le formalisme de la contrainte de cisaillement puisse rester similaire, la direction des forces exercées par la plaque sur l'adhésif passera de la traction à la compression, potentiellement modifiant le signe des contraintes interfaciales.
- **Polarité des Efforts et Bilan d'Équilibre :** La polarité des efforts axiaux et des moments fléchissants, ainsi que les équations de bilan d'efforts à l'interface poutre-plaque, devront être soigneusement vérifiées et adaptées à la nouvelle configuration.

#### 4.4. Le modèle théorique formulé dans le cadre de ce travail

Le modèle analytique proposé est un élément en porte-à-faux en béton armé renforcé par une plaque de PRF collée sur sa face tendue. L'extrémité gauche de la poutre est encastree, tandis que l'extrémité droite est libre. Conformément à la distribution classique du moment fléchissant dans un porte-à-faux soumis à une charge verticale répartie, le moment est maximal et négatif à l'encastrement, puis décroît rapidement vers l'extrémité libre, selon une loi cubique. Dans cette configuration, la plaque de PRF est collée à partir de l'encastrement, mais ne couvre pas nécessairement toute la portée, afin d'optimiser les coûts de renforcement. La figure 1 met en évidence deux zones critiques : d'une part, l'extrémité encastree, où un **ancrage fiable** est indispensable pour éviter un décollement prématuré sous faibles charges ; d'autre part, l'extrémité libre de la plaque, où une **concentration de contraintes interfaciales** (cisaillement et normales) peut apparaître si la longueur de collage est insuffisante. Ce schéma souligne l'importance de bien analyser la distribution des contraintes interfaciales dans les structures renforcées par PRF, en particulier dans les zones terminales du collage.



**Figure 28** Illustration du renforcement d'un élément en porte-à-faux en béton armé à l'aide de laminés PRF collés sur la face tendue

## 5. Formulation Mathématique du Comportement des Contraintes de Cisaillement Interfaciales : L'Équation Différentielle

La Figure 2 représente un élément différentiel d'une poutre en porte-à-faux composite (poutre en béton armé renforcée par une plaque PRF collée), sur lequel sont identifiées les contraintes interfaciales de cisaillement  $\tau(x)$  et normales  $\sigma(x)$ . La figure précise également le système de conventions de signe adopté pour les sollicitations internes (moment fléchissant, effort tranchant, effort axial) ainsi que pour les charges externes appliquées.

L'analyse des équilibres internes et des relations de compatibilité des déformations, appliquée à cet élément infinitésimal situé le long de la portée du porte-à-faux, conduit à une équation différentielle décrivant le comportement des contraintes interfaciales de cisaillement. Cette formulation prend en compte les particularités du schéma statique en porte-à-faux, où les effets de flexion et les distributions de contraintes diffèrent significativement de celles observées dans une poutre simplement appuyée.

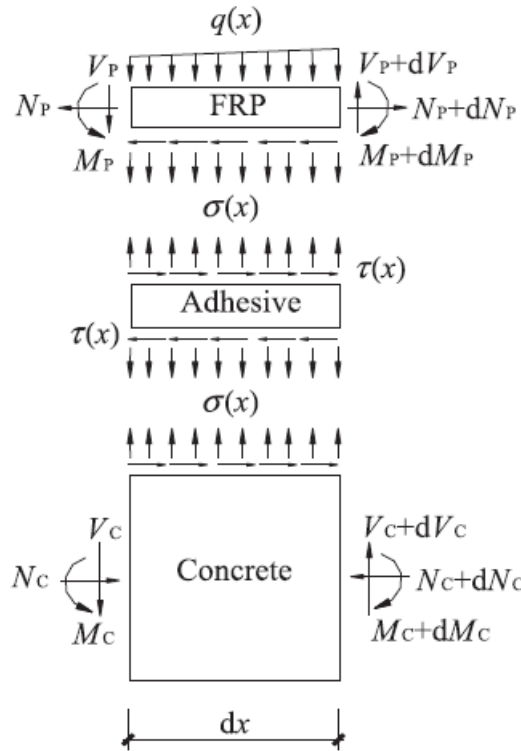
La contrainte de cisaillement interfaciale  $\tau(x)$  dans la couche adhésive à une section  $x$  quelconque définie dans la Figure 2 peut être exprimée par"

$$\tau(x) = \frac{G_a}{t_a} (u_{ap}(x) - u_{ac}(x)) \quad (1)$$

Où  $u_{ap}(x)$  et  $u_{ac}(x)$  désignent les déplacements horizontaux longitudinaux respectivement au bas des laminés en PRF (polymère renforcé de fibres) et au sommet de

l'élément en porte-à-faux en béton armé (BA), et où  $G_a$  et  $t_a$  représentent respectivement le module de cisaillement et l'épaisseur de la couche adhésive.

En dérivant l'équation (1) par rapport à  $x$ , les déformations au bas des laminés en PRF  $\varepsilon_{ap}(x)$  et au sommet de l'élément en porte-à-faux en BA  $\varepsilon_{ac}(x)$  peuvent être exprimées comme suit :



**Figure 29 Forces dans un élément infinitésimal d'une poutre en porte-à-faux en béton armé renforcée par PRF**

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} (\varepsilon_{ap}(x) - \varepsilon_{ac}(x)) \tag{2}$$

En tenant compte des déformations en flexion, en cisaillement et en traction des matériaux

(béton, PRF et couche adhésive), les déformations  $\varepsilon_{ap}(x)$  et  $\varepsilon_{ac}(x)$  peuvent être exprimées comme suit :

$$\varepsilon_{ap}(x) = \frac{du_{ap}(x)}{dx} = \frac{N_p(x)}{E_p A_p} - \frac{y_p}{E_p I_p} M_p(x) - \frac{y_p}{G_p \eta A_p} [q(x) + b_p \sigma(x)] \tag{3}$$

$$\varepsilon_{ac}(x) = \frac{du_{ac}(x)}{dx} = -\frac{N_c(x)}{E_c A_c} - \frac{y_c}{E_c I_c} M_c(x) - \frac{y_c}{G_c \eta A_c} [b_p \sigma(x)] \quad 4$$

Où  $E_p$ ,  $G_p$ ,  $E_c$  et  $G_p$  sont les modules d'élasticité et de cisaillement du PRF et du béton, respectivement ;  $M_p(x)$ ,  $M_c(x)$ ,  $N_c(x)$  sont les moments fléchissants et les efforts normaux dans le PRF et dans l'élément en porte-à-faux, respectivement ;  $b_p$ ,  $A_p$  et  $I_p$  désignent la largeur, la surface de la section transversale et le moment d'inertie du PRF, respectivement ;  $A_c$ , et  $I_c$  désignent la surface équivalente de la section transversale et le moment d'inertie de l'élément en porte-à-faux, respectivement ;  $y_p$  et  $y_c$  sont les distances depuis le bas des PRF et le sommet

de l'élément en porte-à-faux jusqu'à leurs centres de gravité respectifs ; et  $\eta$ , le coefficient de cisaillement de Timoshenko, est égal à 5/6 pour une section rectangulaire (Smith et Teng, 2001).

La condition d'équilibre statique de l'élément infinitésimal représenté dans la Figure 2, les relations entre les moments et les efforts normaux dans l'élément en porte-à-faux et les laminés en PRF peuvent être exprimés comme suit :

$$\frac{dy}{dx^2} = -\frac{M_c(x)}{E_c I_c} = -\frac{M_p(x)}{E_p I_p} \quad 5$$

$$M_T(x) = M_p(x) = M_c(x) = N_p(x)(y_p + y_c + t_a) \quad 6$$

$$\frac{dN_p(x)}{dx} = -\frac{N_c(x)}{dx} = -b_p \tau(x) \quad 7$$

Où  $M_T(x)$  est le moment fléchissant total en une section  $x$  quelconque de la structure en porte-à-faux renforcée par PRF.

En négligeant les effets des déformations en cisaillement à la fois dans l'élément en porte-à-faux et dans les laminés en PRF sur la contrainte normale interfaciale (Smith et Teng, 2001), l'équation différentielle gouvernant la contrainte de cisaillement interfaciale est obtenue en substituant les équations (3) à (7) dans l'équation (2), puis en dérivant l'équation obtenue.

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - \lambda^2 \tau(x) + \frac{G_a (y_p - y_c)}{t_a (EI)_e} \frac{dM_T(x)}{dx} + \frac{G_a y_p}{t_a \eta G_p A_p} \frac{dq(x)}{dx} = 0 \quad 8$$

Ou

$$\lambda^2 = \frac{G_a b_p}{t_a} \left( \frac{(y_p + y_c)(y_p + y_c + t_a)}{(EI)_e} + \frac{1}{(EA)_e} \right)$$

Avec

$$(EI)_e = E_c I_c + E_p I_p$$

$$\text{Et } \frac{1}{(EA)_e} = \frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{E_c A_c}$$

La solution générale de l'équation (8) est

$$\tau(x) = A_1 \cosh(\lambda x) + A_2 \sinh(\lambda x) + m_1 \tau_{pa}(x) \quad 9$$

Étant donné que les dérivées secondes et d'ordre supérieur de la charge linéaire arbitrairement répartie  $q(x)$  par rapport à  $x$  deviennent nuls, la solution particulière  $\tau_{pa}(x)$  de l'équation (9) peut être exprimée comme suit

$$\tau_{pa}(x) = \frac{1}{\lambda^2} \left[ \frac{G_a (y_p + y_c)}{t_a (EI)_e} \frac{dM_T(x)}{dx} + \frac{G_a (y_p + y_c)}{\lambda^2 t_a (EI)_e} \frac{dq(x)}{dx} + \frac{G_a y_p}{t_a \eta G_p A_p} \frac{dq(x)}{dx} \right] \quad 10$$

$A_1$  et  $A_2$  dans l'équation (9) sont des coefficients constants déterminés à partir de conditions aux limites appropriées. La première condition aux limites est que la courbure de section des deux côtés à l'extrémité libre du stratifié doit rester continue, ce qui peut s'exprimer comme suit :

$$\left. \frac{d^2 y}{dx^2} \right|_{x=0} = - \frac{M_0}{E_c I_c}$$

11

$M_0$  dans l'équation (11) est le moment total appliqué à la section où  $x = 0$ . En substituant les équations (2) à (7) dans l'équation (11) et en négligeant les effets des déformations par cisaillement, la première condition aux limites peut être réécrite comme suit :

$$\left. \frac{d\tau(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{G_a M_0}{t_a (y_p + y_c + t_a)(EA)_e} \left[ 1 - \frac{(EA)_t}{E_c I_c} \right]$$

12

Ou

$$(EA)_t = (EA)_c (y_p + y_c)(y_p + y_c + t_a)$$

La deuxième condition aux limites est que la déformation par cisaillement de la couche adhésive, au point de contrainte de cisaillement interfacial nulle, doit satisfaire à la compatibilité de déformation suivante :

Où  $L_s$  est la distance entre le point de contrainte de cisaillement interfacial nulle et l'extrémité libre du stratifié. Pour les éléments en porte-à-faux renforcés par PRF, la valeur de  $L_s$  est approximativement égale à la longueur de collage du PRF  $L_p L_p L_p$  illustrée dans la Figure 1.

Les coefficients  $A_1$  et  $A_2$  de l'équation (9) peuvent donc être déterminés par les équations (12) et (13).

$$\frac{\tau(x=L_s)}{G_a} = 0$$

13

$$A_1 = \frac{\tau_{pa}(x=L_s)}{\cosh(\lambda L_s)} - A_2 \tanh(\lambda L_s)$$

14

$$A_2 = \frac{G_a M_0}{\lambda t_a (y_p + y_c + t_a)(EA)_e} \left[ 1 - \frac{(EA)_t}{E_c I_c} \right] - \frac{1}{\lambda} \left. \frac{d\tau_{pa}(x)}{dx} \right|_{x=0}$$

15

Lorsqu'un élément en porte-à-faux renforcé par PRF est soumis à une charge uniformément répartie  $q$ , il existe un moment et une contrainte de cisaillement interfacial donnés respectivement par :

$$M_i(x) = \frac{q(L_0 + x)^2}{2} \quad \text{et} \quad \tau_{pa}(x) = \frac{G_a q(y_p + y_c)(L_0 + x)}{\lambda^2 t_a (EI)_e}$$

Ainsi, la contrainte de cisaillement interfacial d'un élément en porte-à-faux renforcé par PRF à toute section peut être exprimée comme suit :

$$\tau(x) = \frac{G_a q}{\lambda^2 t_a} \left[ \frac{[(EI)_i - E_c I_c] L_0^2}{2 E_c I_c (y_p + y_c + t_a) (EA)_e} + \frac{(y_p + y_c)}{\lambda^2 (EI)_e} \right] \frac{\sinh(\lambda L_s - \lambda x)}{\cosh(\lambda L_s)} - \frac{G_a q (y_p + y_c)}{\lambda^2 t_a (EI)_e} \left[ \frac{(L_0 + L_s) \cosh(\lambda x)}{\cos(\lambda L_s)} - (L_0 + x) \right]$$

16

### 5.1. Contraintes normales d'interface :

Lorsque le membre en porte-à-faux renforcé par matériau composite (FRP) est soumis à une charge, un déplacement vertical apparaît entre le stratifié et l'élément en béton, ce qui induit une contrainte normale d'interface dans la couche adhésive.

La contrainte normale d'interface, notée  $\sigma(x)$  peut être déterminée à partir de l'expression suivante

$$\sigma(x) = \frac{E_a}{t_a} [V_{ap}(x) - V_{ac}(x)] \quad 17$$

où  $E_a$  est le module d'élasticité de la couche adhésive, et  $V_{ap}(x)$  et  $V_{ac}(x)$  représentent respectivement les déplacements verticaux à la base des stratifiés FRP et au sommet de l'élément en porte-à-faux en béton armé (RC).

En négligeant les termes du second ordre, les relations suivantes peuvent être déduites de la théorie de la mécanique des matériaux et de l'équilibre des éléments infiniment petits des membres FRP et du porte-à-faux (voir Figure 2).

$$\frac{d^2 v_{ap}(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_p I_p} M_p(x) + \frac{1}{G_p \eta A_p} [q(x) + b_p \sigma(x)] \quad 18$$

$$\frac{d^2 v_{ac}(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_c I_c} M_c(x) - \frac{1}{G_c \eta A_c} [b_p \sigma(x)] \quad 19$$

$$\frac{dM_p(x)}{dx} = V_p(x) - y_p b_p \tau(x) \quad 20$$

$$\frac{dV_p(x)}{dx} = q(x) + b_p \sigma(x) \quad 21$$

$$\frac{dM_c(x)}{dx} = V_c(x) - y_c b_p \tau(x) \quad 22$$

$$\frac{dV_c(x)}{dx} = -b_p \sigma(x) \quad 23$$

Ainsi, les déplacements verticaux,  $V_p(x)$  et  $V_c(x)$  dans l'équation (18), peuvent être exprimés en fonction des contraintes de cisaillement et normales à l'interface. L'équation différentielle gouvernant la contrainte normale à l'interface dans une structure en porte-à-faux renforcée par un matériau FRP (polymère renforcé de fibres) peut donc être exprimée comme suit :

$$\frac{d^4 \sigma(x)}{dx^4} - \frac{E_a b_p}{\eta t_a} \left( \frac{1}{G_p A_p} + \frac{1}{G_c A_c} \right) \frac{d^2 \sigma(x)}{dx^2} + \frac{E_a b_p}{t_a} \left( \frac{1}{G_p A_p} + \frac{1}{G_c A_c} \right) \sigma(x) = \frac{E_a b_p}{t_a} \left( \frac{y_p}{E_p I_p} - \frac{y_c}{E_c I_c} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{E_a}{\eta t_a G_p A_p} \frac{d^2 q(x)}{dx^2} - \frac{E_a}{t_a E_p I_p} q(x) \quad 24$$

En négligeant les effets des déformations en cisaillement à la fois dans le matériau FRP et dans l'élément en porte-à-faux (Smith et Teng, 2001), l'équation différentielle gouvernant la contrainte normale à l'interface est simplifiée comme suit :

$$\frac{d^4 \sigma(x)}{dx^4} + 4\beta^4 \sigma(x) = \alpha \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{E_a}{t_a E_p I_p} q(x)$$

25

Ou

$$\beta^4 = \frac{E_a b_p}{4t_a} \left( \frac{1}{E_p I_p} - \frac{1}{E_c I_c} \right)$$

$$\alpha = \frac{E_a b_p}{t_a} \left( \frac{y_p}{E_p I_p} - \frac{y_c}{E_c I_c} \right)$$

Pour un élément en porte-à-faux renforcé par un matériau FRP soumis à une charge répartie linéaire arbitraire, la solution générale pour la contrainte normale à l'interface est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma(x) = [B_1 \cos(\beta x) + B_2 \cos(\beta x)] e^{-\beta x} + [B_3 \cos(\beta x) + B_4 \cos(\beta x)] e^{\beta x} + \sigma_{pa}(x)$$

26

$$\sigma_{pa}(x) = \frac{\alpha\lambda [A_1 \sinh(\lambda x) + A_2 \cosh(\lambda x)]}{4\beta^4 + \lambda^4} + \frac{\alpha}{4\beta^4} \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{E_a}{4\beta^4 t_a E_p I_p} q(x)$$

27

On suppose que la contrainte normale à l'interface tend vers zéro lorsque xxx devient grand, ce qui implique que  $B_3=B_4=0$ ,  $B_3 =B_4= 0$ ,  $B_3=B_4=0$ . Les coefficients  $B_1$  et  $B_2$  dans l'équation (26) peuvent être déterminés à partir des conditions aux limites imposant un moment de flexion nul et une force tranchante nulle dans les stratifiés en PRF (polymère renforcé de fibres) au point  $x=0$ , c'est-à-dire  $M_p(0)=0$  et  $V_p(0)=0$ .

$M_0$ ,  $V_0$  et  $t_{\max}$  représentent respectivement le moment de flexion total, la force tranchante totale et la contrainte de cisaillement à l'interface au point  $x=0$  dans l'élément en porte-à-faux renforcé par PRF.

Lorsque l'élément est soumis à une charge uniformément répartie (UDL), les coefficients  $B_1$  et  $B_2$  de l'équation (26) peuvent être déterminés à l'aide des expressions suivantes :

$$B_1 = \frac{1}{\beta^3} \left( \frac{E_a V_0}{t_a E_c I_c} + \alpha \tau_{\max} - \frac{\alpha \lambda^4 A_1}{4\beta^4 + \lambda^4} \right) - B_2$$

$$B_2 = \frac{1}{2\beta^2} \left( \frac{\alpha \lambda^3 A_2}{4\beta^4 + \lambda^4} - \frac{E_a M_0}{t_a E_c I_c} \right)$$

Ainsi, la contrainte normale à l'interface en toute section, et par conséquent sa valeur maximale dans l'élément en porte-à-faux renforcé par PRF, peut être exprimée comme suit.

Sous l'effet d'une charge uniformément répartie  $q$ , la contrainte normale à l'interface en toute section, ainsi que sa valeur maximale dans l'élément en porte-à-faux renforcé par PRF, sont :

$$\sigma(x) = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^2} \left[ \left( \frac{E_a q L_0}{t_a E_c I_c} + \alpha \tau_{\max} - \frac{\alpha \lambda^4 A_1}{4\beta^4 + \lambda^4} \right) \frac{\cos(\beta x)}{\beta} + \left( \frac{E_a q L_0^2}{2t_a E_c I_c} - \frac{\alpha \lambda^3 A_2}{4\beta^4 + \lambda^4} \right) [\cos(\beta x) - \sin(\beta x)] \right] + \frac{\alpha \lambda [A_1 \sinh(\lambda x) + A_2 \cosh(\lambda x)]}{4\beta^4 + \lambda^4} + \frac{q}{4\beta^4} \left[ \frac{\alpha G_a (y_p + y_c)}{\lambda^2 t_a (EI)_e} - \frac{E_a}{t_a E_p I_p} \right]$$

$$\sigma_{\max} = \sigma(x) \Big|_{x=0} = \frac{1}{2\beta^3} \left[ \frac{\alpha \lambda [A_2 (2\beta^3 - \beta \lambda^2) - A_1 \lambda^3]}{4\beta^4 + \lambda^4} + \frac{q}{2t_a} \left( \frac{E_a (\beta L_0^2 + 2L_0)}{E_c I_c} + \frac{\alpha G_a (y_p + y_c)}{\lambda^2 t_a (EI)_e} - \frac{E_a}{\beta E_p I_p} \right) + \alpha \tau_{\max} \right]$$

## 6. Méthodologie de Calcul des Fissures dans le Béton Armé R&enforcé :

Le calcul des fissures dans le béton armé renforcé à l'aide de matériaux composites est une problématique complexe. Elle dépend d'une multitude de paramètres, parmi lesquels :

- Les propriétés mécaniques des matériaux (béton, armatures en acier, composites),
- La géométrie de la structure (poutres, dalles, poteaux...),
- Les conditions de chargement (charges permanentes, variables, chocs...),
- La présence ou non de fissures préexistantes, qui influencent l'évolution de la fissuration.

### 6.1. Méthodes d'évaluation de la fissuration

Pour estimer ou prédire la fissuration dans ces structures renforcées, plusieurs approches sont disponibles :

#### a) Modèles analytiques

- Basés sur des adaptations des formulations des Eurocodes (notamment l'EN 1992-1-1).
- Intégration de la Mécanique de la Rupture.

#### b) Modélisation par éléments finis (MEF)

- Permet une simulation fine du comportement de la structure.
- Peut intégrer des lois de comportement non linéaires, le couplage béton/composite, et la propagation progressive des fissures.

#### c) Essais expérimentaux

- Réalisés en laboratoire pour valider les modèles numériques et théoriques.
- Incluent des tests de flexion, traction, cisaillement avec et sans renforcement.

#### d) Modèles basés sur la mécanique de l'endommagement

- Représentent l'évolution progressive de la fissuration par des variables internes.
- Adaptés aux simulations avancées des structures soumises à des sollicitations extrêmes.

## 7. Intégration de la Mécanique de la Rupture

La mécanique de la rupture offre un cadre théorique puissant pour analyser l'initiation et la propagation des fissures, en considérant non seulement les contraintes mais aussi l'énergie disponible pour la croissance de la fissure et la résistance du matériau à cette croissance. Son intégration dans l'étude des structures en béton armé renforcées par composites permet d'aller au-delà des approches basées uniquement sur la résistance des matériaux et d'obtenir une compréhension plus fine du comportement à la fissuration.

### 7.1. Concepts Clés de la Mécanique de la Rupture Pertinents :

- **Facteur d'intensité de contrainte (K) :** Ce paramètre quantifie l'intensité du champ de contraintes au voisinage de la pointe d'une fissure. Il dépend de la charge appliquée, de la géométrie de la structure et de la taille et de la forme de la fissure. Différents modes de sollicitation de la fissure (ouverture, glissement, arrachement) sont associés à des facteurs d'intensité de contrainte spécifiques (KI, KII, KIII).

### 7.2. Formulation mathématique des champs de contraintes (à la proximité de la fissure) :

La propagation d'une [fissure](#) dans un volume peut se décomposer en trois composantes appelées *mode* :

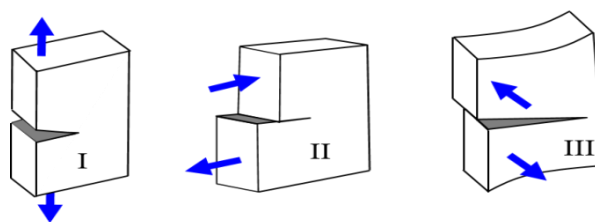


Figure 30 les trois modes

- I - Ouverture selon la normale au plan de la fissure ;
- $$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta) \quad (45)$$
- II - Ouverture parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure ;

- $$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{II}(\theta)$$
 (46)

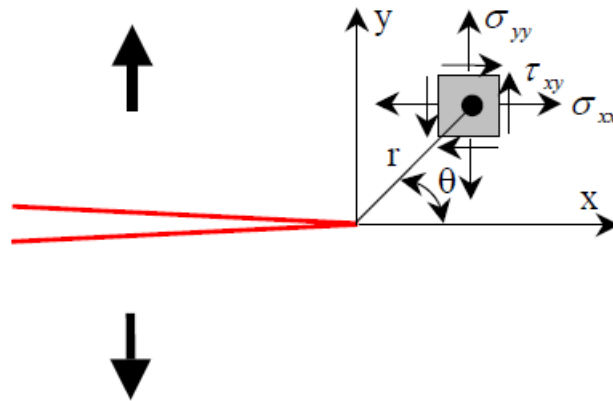
- III - Ouverture parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure ;

- $$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{III}(\theta)$$
 (47)

Avec  $r$  : distance à la pointe de la fissure

$\theta$  : angle par rapport à l'axe de la fissure

$f_{ij}^I(\theta), f_{ij}^{II}(\theta), f_{ij}^{III}(\theta)$ : fonctions angulaires caractéristiques de chaque mode



**Figure 31** Contraintes près de l'extrémité d'une fissure

Chaque mode est généralement caractérisé individuellement bien que la propagation réelle d'une fissure soit la combinaison de ces 3 modes.

- **Ténacité à la rupture (Kc ou Gc) :** C'est une propriété intrinsèque du matériau qui représente sa résistance à la propagation d'une fissure. Elle correspond à la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte (KIc, KIIc, KIIC) ou du taux de restitution d'énergie (Gc) au-delà de laquelle la fissure devient instable et se propage de manière incontrôlable.
- **Taux de restitution d'énergie (G) :** Ce paramètre représente l'énergie libérée lors de la propagation unitaire d'une fissure. La propagation de la fissure se produit lorsque le

taux de restitution d'énergie disponible (G) atteint ou dépasse la ténacité à la rupture du matériau ( $G_c$ ).

Pour un matériau isotrope et en comportement élastique linéaire :

$$G = \frac{K^2}{E'} \Rightarrow G_c = \frac{K_c^2}{E'} \quad (48)$$

avec :

$$E' = E \text{ en traction plane}$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \text{ en déformation plane}$$

E : module de young

$\nu$  coefficient de poisson

G : taux de restitution d'énergie (**énergie libérée par unité de surface de fissure créée**)

$G_c$  : **énergie par unité de surface** nécessaire pour propager la fissure

$K_c$  : **valeur limite** du facteur d'intensité que le matériau peut supporter sans fissuration instable.

### **Critère de propagation de fissure**

**Propagation instable** si :  $K \geq K_c$  ou  $G \geq G_c$

## **8. Conclusion :**

L'analyse de la fissuration dans le béton armé renforcé par composites est complexe et cruciale. L'utilisation de composites améliore la performance en limitant l'ouverture et en modifiant la répartition des fissures, augmentant la résistance globale. L'étude de l'interface béton-composite (cisaillement, décollement) est essentielle pour l'efficacité du renforcement. La mécanique de la rupture (facteur d'intensité de contrainte  $K_I, K_{II}, K_{III}$  et ténacité à la rupture  $K_c$  ou  $G_c$ ) permet une prédiction plus précise du comportement des fissures. Cependant, l'application à des configurations spécifiques comme les renforcements en extradados nécessite une adaptation des modèles existants (hypothèses, équations, comportement du béton en compression). Une approche rigoureuse combinant modélisation,

essais et mécanique de la rupture est indispensable pour la sécurité et l'optimisation de ces structures.

# **Chapitre III :**

## **Présentation du logiciel**

## 1. Introduction :

Dans le domaine de l'ingénierie, la simulation numérique constitue aujourd'hui un outil fondamental pour analyser et prédire le comportement des structures sous diverses sollicitations. Cette approche permet non seulement de limiter les essais physiques coûteux, mais aussi d'optimiser les conceptions en identifiant les zones critiques susceptibles de subir des contraintes élevées ou des déformations importantes.

Le logiciel ABAQUS, basé sur la méthode des éléments finis (MEF), est l'un des outils les plus puissants et les plus utilisés pour simuler des phénomènes mécaniques complexes, qu'ils soient linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques. Il offre un environnement complet permettant de modéliser des géométries variées, de définir des matériaux aux comportements spécifiques, d'appliquer des conditions aux limites réalistes, et d'exploiter des résultats avec une grande précision.

Dans ce chapitre, nous présentons la démarche de modélisation et de simulation menée à l'aide d'ABAQUS, dans le but d'évaluer le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par des matériaux composites sous un chargement triangulaire. Nous détaillerons les différentes étapes du processus : de la définition de la géométrie, des matériaux, du maillage, jusqu'à l'interprétation des résultats obtenus, en mettant l'accent sur les phénomènes de ruine et d'endommagement observés.

## 2. Simulation avec ABAQUS:

Avant de déployer un code informatique en environnement de production, il est essentiel d'évaluer ses fonctionnalités, en particulier ses contraintes, en s'appuyant sur les ressources pédagogiques existantes.

ABAQUS est un logiciel dédié à la simulation par éléments finis, spécialisé dans l'analyse de problèmes mécaniques et la modélisation de phénomènes physiques. Cette approche permet de reproduire fidèlement le comportement réel des matériaux et d'ajuster divers paramètres (tels que la géométrie ou les propriétés rhéologiques) afin d'optimiser les conceptions.

### 2.1. Présentation du logiciel:

ABAQUS est un logiciel de calcul par éléments finis (MEF), initialement développé en 1978 par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) (Karlsson & Sorensen, 2014)

Reconnu pour sa performance technologique, sa précision et sa robustesse, il propose des solutions avancées pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques.

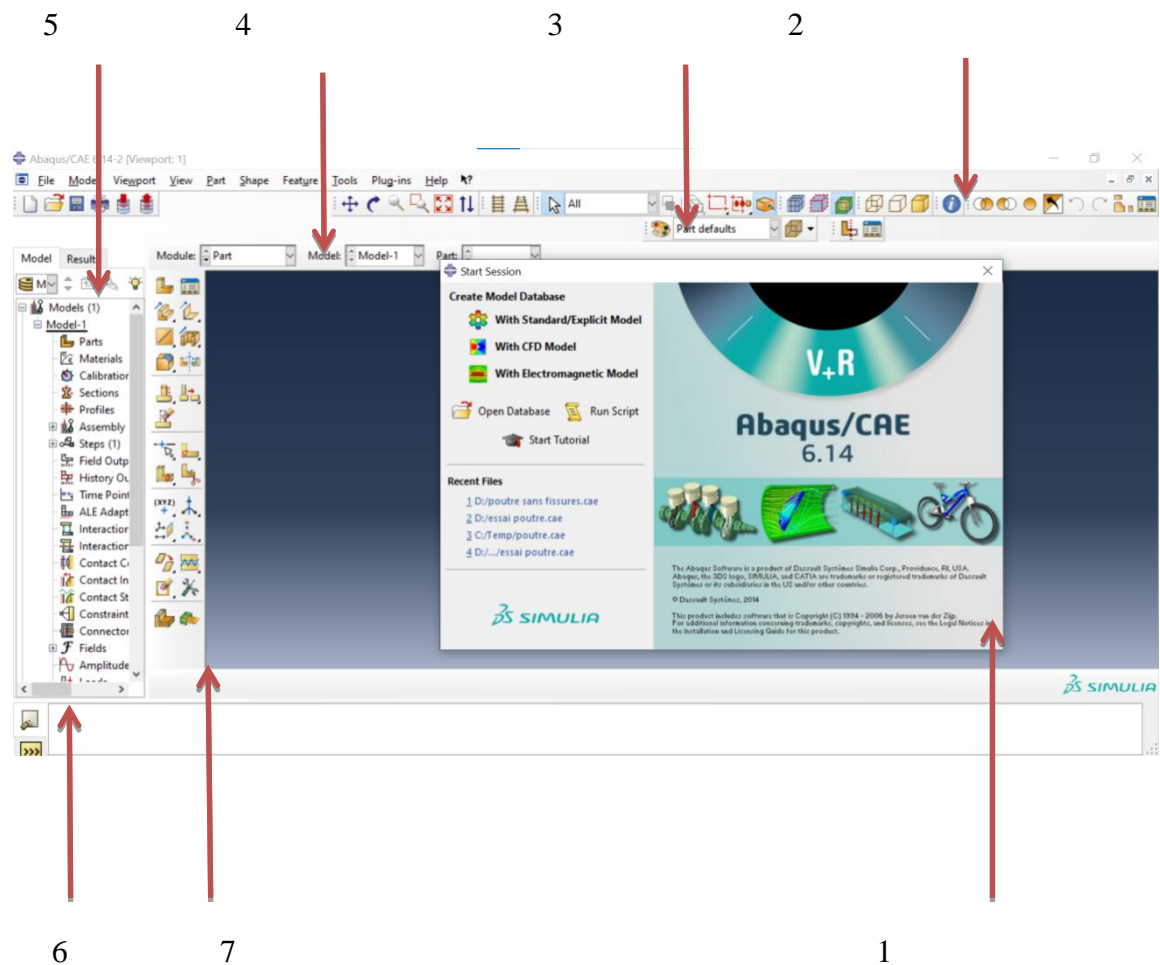
Cette plateforme de simulation polyvalente intègre un environnement d'analyse unifié, capable de modéliser des géométries complexes en 2D ou 3D : poutres, plaques, coques, ainsi que des éléments spécifiques (ressorts, masses concentrées, etc.) – voir Figure III.1. Contrairement à certains logiciels, ABAQUS ne gère pas automatiquement les unités ; l'utilisateur doit donc veiller à appliquer un système cohérent (Tableau III.1) (ABBAS, 2012).

**Tableau 5 : Tableau des unités correspondant à ABAQUS**

Masse	Langueur	Temps	Force	Pression	Energie
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPA	Mili joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPA	Mili joule
M	L	T	M.L.T-2	M.L-1.T-2	M.L2.T-2

## 2.2. Le CAE (Complete ABAQUS Environnement) :

Une interface idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles ABAQUS dans laquelle l'utilisateur peut effectuer la totalité de la mise en donnée, de la création ou l'import de pièce, du maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution)



**Figure 32** Présentation de l'interface ABAQUS

1. Fenêtre d'affichage graphique.
2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, etc.).
4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve

6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guidés dans les actions entreprises.
7. Enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

### 2.3. Définition du modèle à simuler :

Notre travail consiste à évaluer la performance et d'étudier le comportement d'une poutre en béton armé renforcé par des matériaux composites sous chargement triangulaire. L'objectif principal consiste à mettre en évidence l'effet de l'endommagement du béton et de l'acier sur les caractéristiques qui permettent d'améliorer le rapport de résistance des poutres en béton armé fissuré.

#### 2.3.1. Présentation des étapes suivies dans la simulation :

Le logiciel est divisé en des modules indépendants les uns des autres, à savoir :

Le module :

Part; Module Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job et Visualisation.

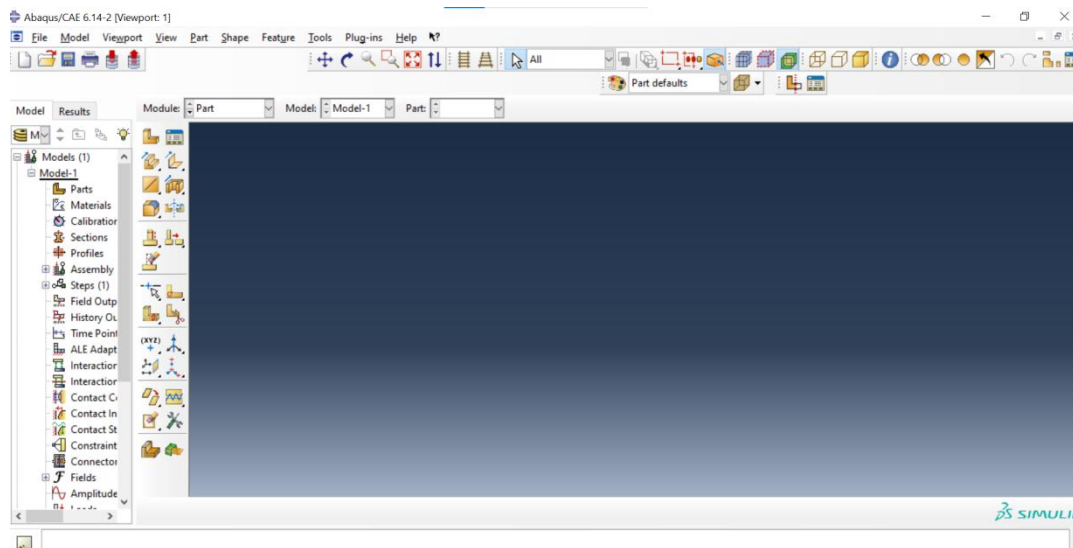


Figure 33 Les modules du logiciel

Les modules sont présentés comme suit :

- **Module Part :**

Dans cette première étape, l'ensemble des éléments constitutifs de la poutre a été modélisé à l'aide des outils du module « Part ». La géométrie a été définie en deux dimensions en utilisant les coordonnées des points, puis la troisième dimension a été obtenue par extrusion. Un solide déformable en 3D a été utilisé pour la modélisation. La création de ces éléments s'effectue via l'icône de création, située en haut à gauche de l'interface.

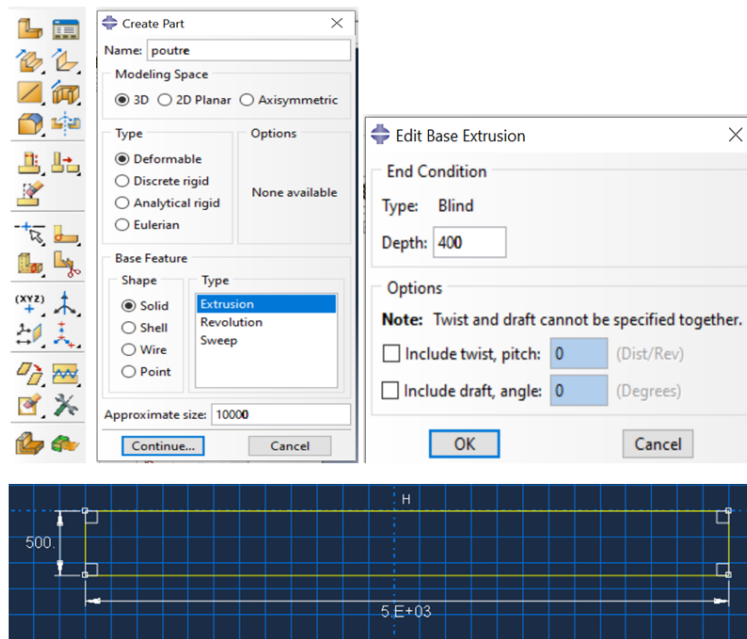



Figure 34 Module Part

- **Module Property :**

Ce module a pour fonction principale de définir les propriétés de l'objet à modéliser. Il permet également la création de matériaux et de sections, auxquels peuvent être associés des repères d'orientation ainsi que différents types de profilés.

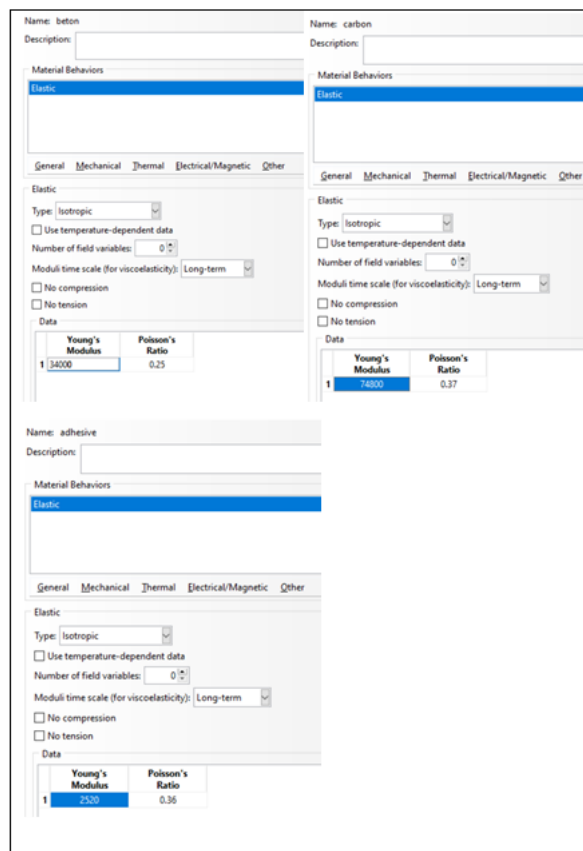
La création des matériaux s'effectue à l'aide de l'outil « Create Material »,  en spécifiant la loi de comportement du matériau, ainsi que ses propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques selon les besoins du modèle.

Dans le cadre de ce travail, les matériaux ont été définis : le béton, le carbone et l'adhésive.

### **Modèle pour le matériau béton, carbone, adhésive**

Nous distinguons trois modèles dans le logiciel Abaqus :

Pour modéliser notre modèle, il est nécessaire de caractériser le comportement élastique du matériau en introduisant le module de Young ainsi que le coefficient de Poisson.



**Figure 35** Modélisation des matériaux

- **Module Assembly :**

Dans ce modèle, toutes les pièces sont assemblées à l'aide de la commande « Create Instance ». Cette fonctionnalité permet de dupliquer chaque pièce autant de fois que nécessaire, en leur appliquant des translations ou des rotations afin d'obtenir la configuration souhaitée du modèle.

1. On commence par assemblage de poutre en béton avec le carbone.
2. Puis assemblage de poutre béton plus la plaque composite avec l'adhésive.

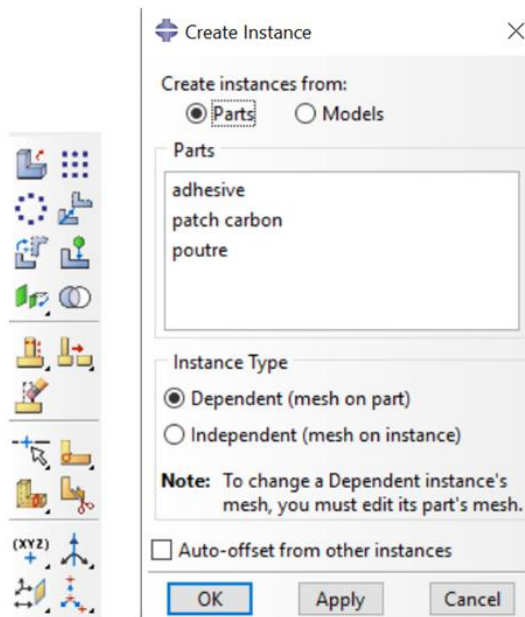


Figure 36 Instance et assemblage

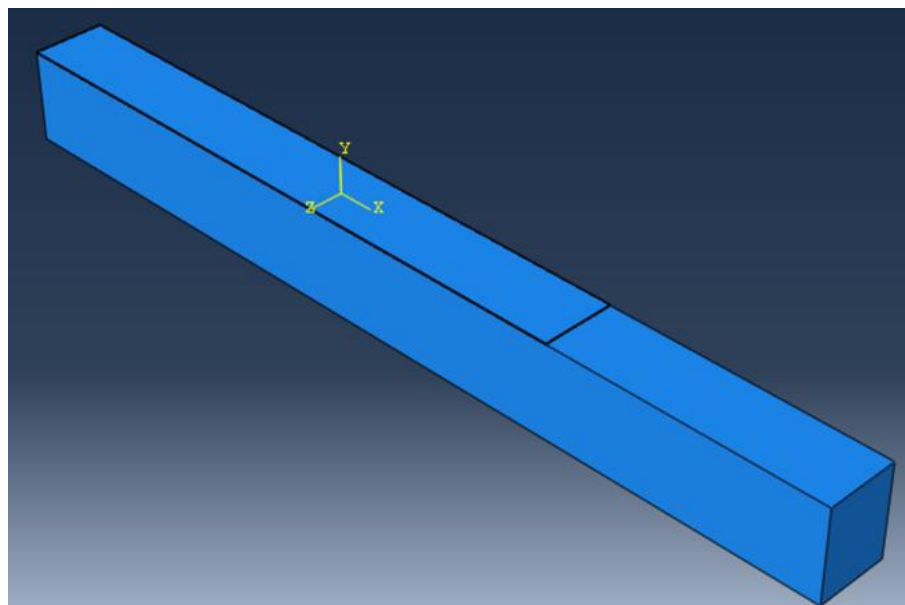


Figure 37 Détail d'assemblage du modèle

- **Module Step :**

Ce module permet de définir plusieurs paramètres essentiels à la simulation, tels que l'incrément, la durée du pas de temps et le temps final, qui correspond à une valeur virtuelle utilisée pour la progression de l'analyse. C'est également dans cette étape que l'on spécifie les variables de sortie souhaitées, afin de pouvoir les visualiser ultérieurement dans le module « Visualization ».

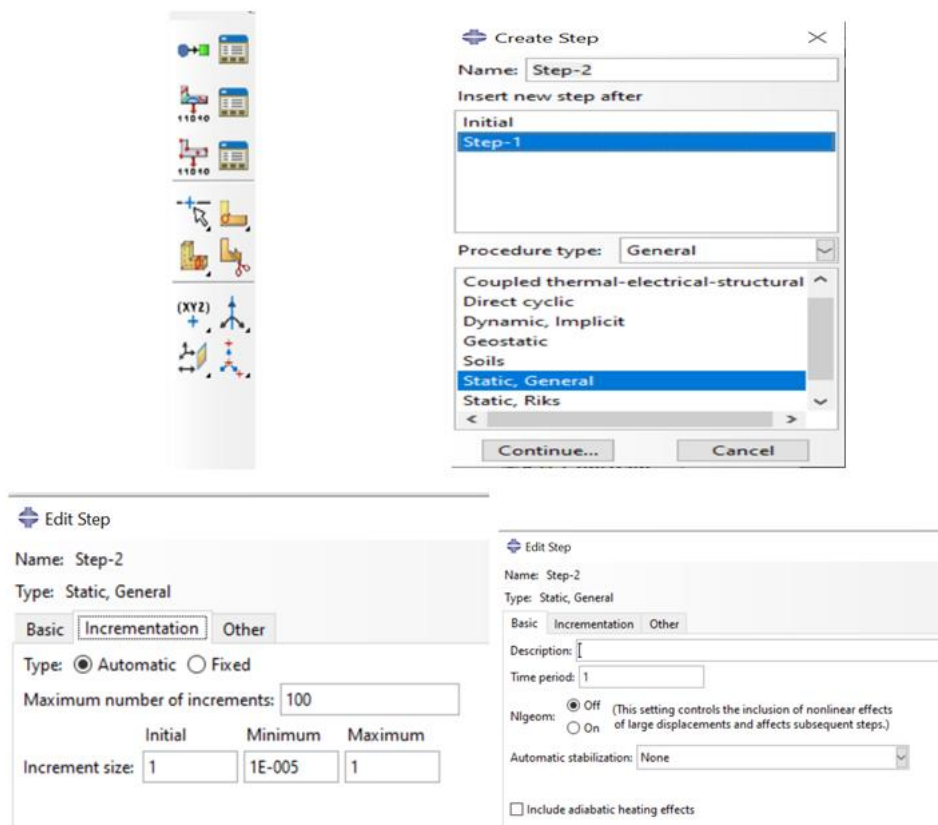


Figure 38Création de step

- **Module Interaction :**

Afin d’assurer que la poutre en béton fonctionne comme un élément monolithique, il est essentiel de définir précisément les interactions, c’est-à-dire l’ensemble des contacts et connexions entre les différentes parties et régions du modèle. Ces interactions doivent être spécifiées de manière explicite, car si elles ne le sont pas, le logiciel ne pourra pas les reconnaître automatiquement, ce qui compromettrait la validité de la simulation.

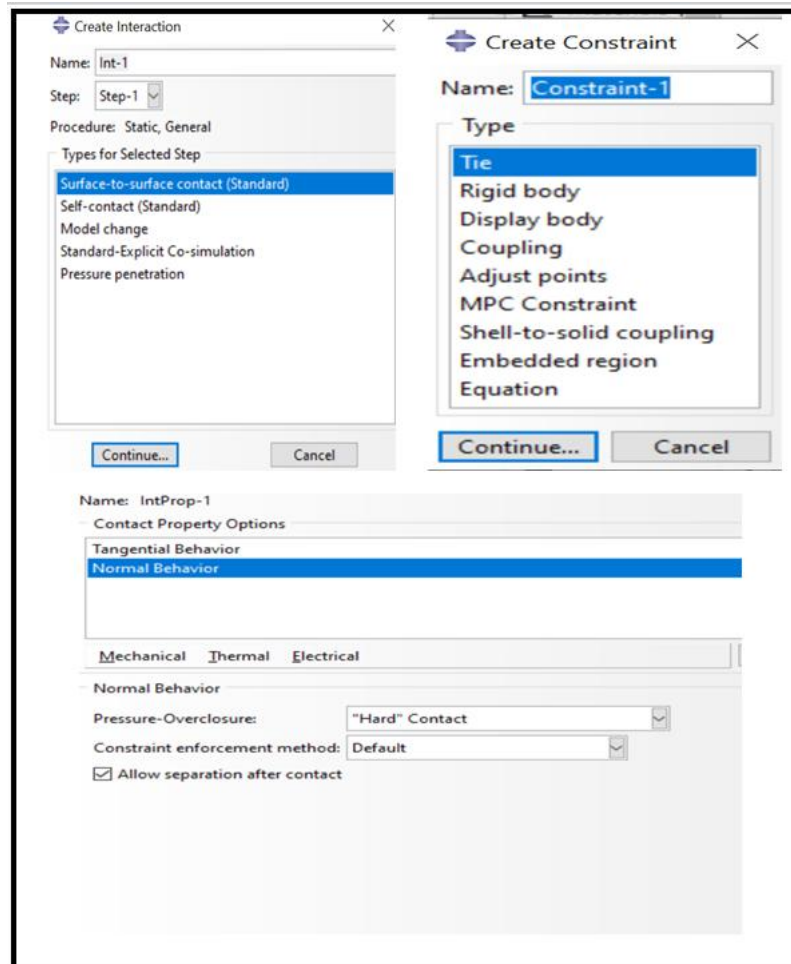


Figure 39 module interaction

- **Module Load :**

Cette étape concerne l'application des chargements et des conditions aux limites, qui sont définis en fonction des différentes étapes d'analyse (Steps). Par exemple, une force appliquée au cours du Step 1 peut être désactivée au Step 2.

Les conditions aux limites sont spécifiées à l'aide de l'outil « Create Boundary Condition ». Selon les objectifs de l'étude, il est possible d'imposer une condition fixe, une symétrie, ou encore un déplacement imposé.

Les chargements, quant à eux, sont définis via l'outil « Create Load ». Divers types de sollicitations peuvent être appliqués, comme des charges concentrées, des moments, des pressions, etc. Pour chaque chargement, il est nécessaire de définir une amplitude, qui peut être constante ou variable selon le temps ou l'étape de simulation.

Les conditions aux limites à appliquer comme suit :

1. Encastrement.

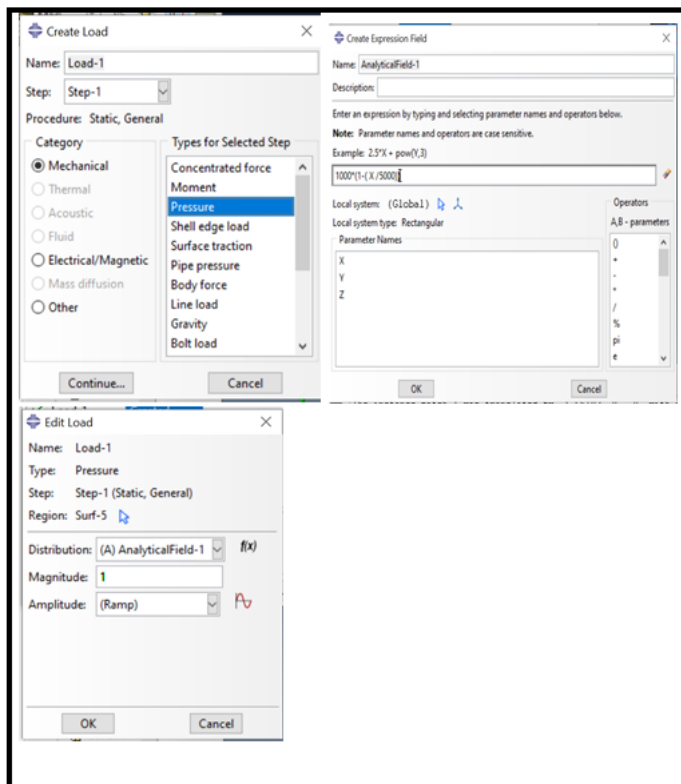
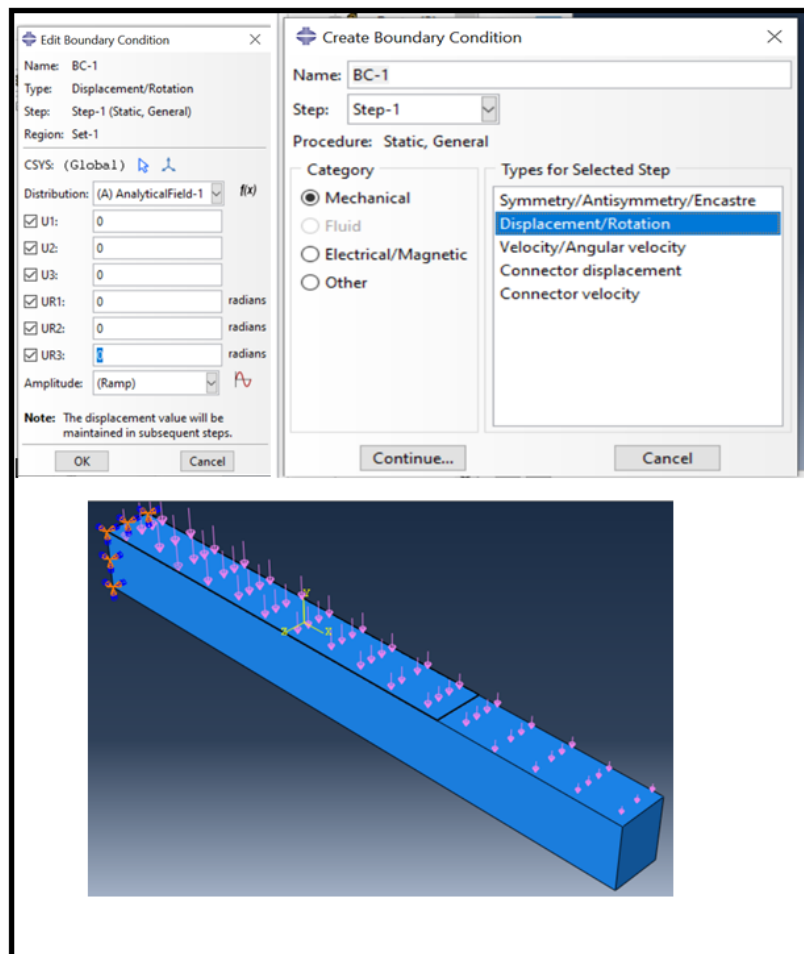


Figure 40Création des chargements



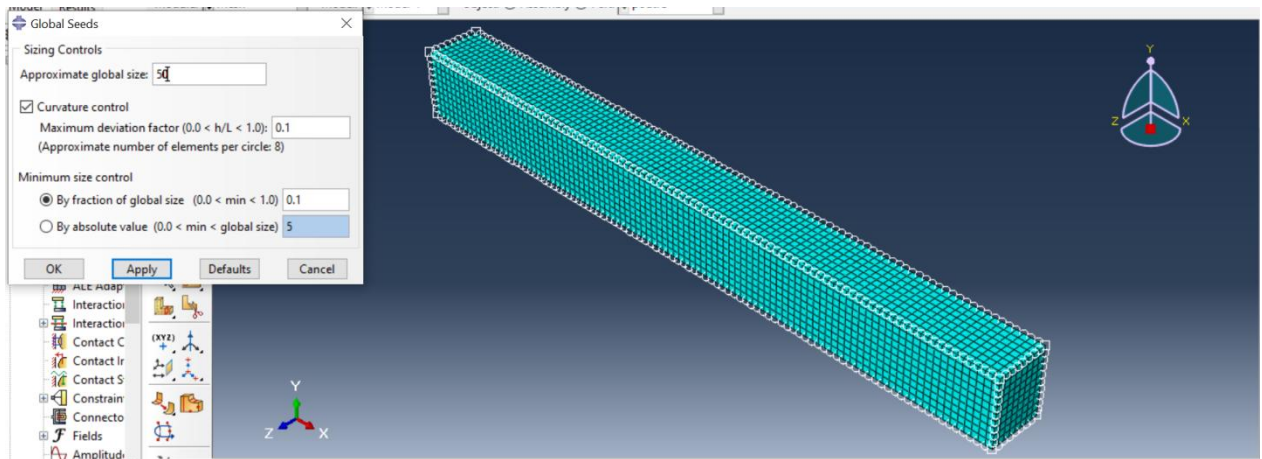
**Figure 41** chargement de poutre en béton

- **Module Mesh :**

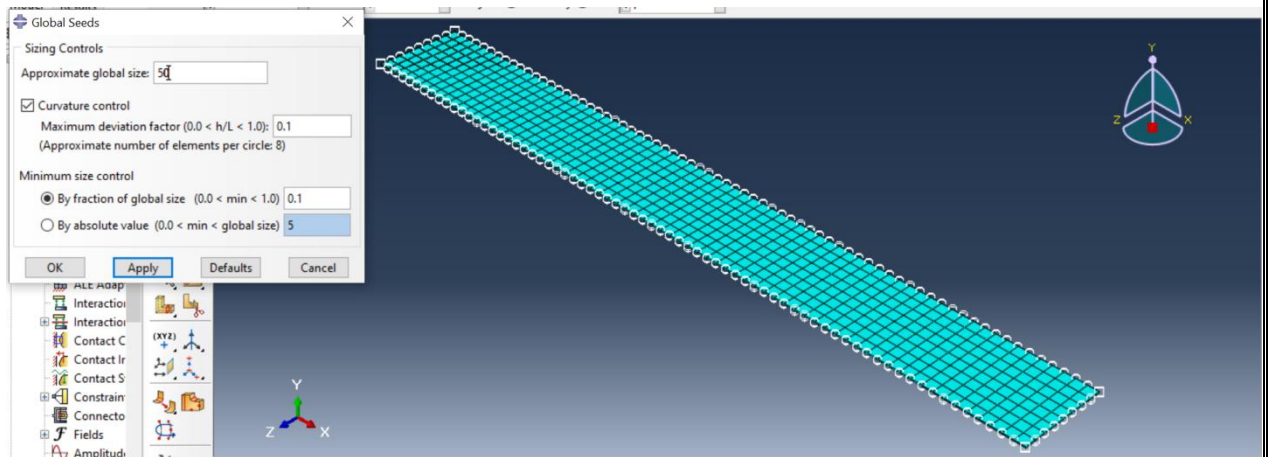
Créez le maillage du modèle en éléments finis. Pour cela, utilisez l'icône de création illustrée à la figure 30. Le module Mesh d'Abaqus/CAE permet de générer un maillage adapté sur les pièces ou assemblages modélisés.

Il offre plusieurs niveaux d'automatisation et de personnalisation afin de produire un maillage conforme aux exigences de l'analyse. La génération du maillage implique la définition de la taille des éléments, autrement dit la densité du maillage, que ce soit de manière globale ou localisée (sur des arêtes ou des faces).

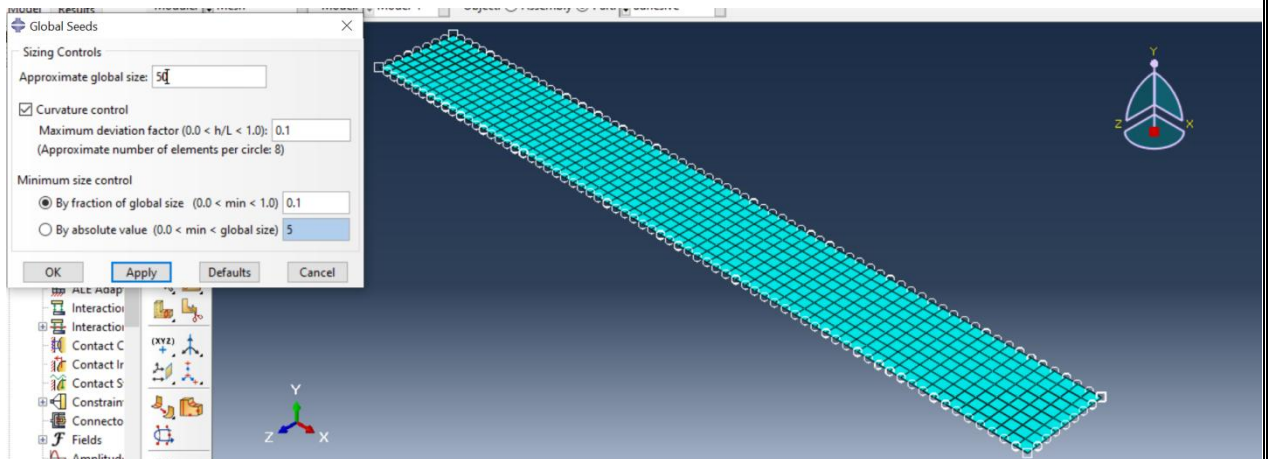
Une étape essentielle dans ce processus est le seeding, qui consiste à placer des « graines » (seeds) sur les bords ou surfaces sélectionnés, afin d'anticiper la position approximative des nœuds. Cela permet au concepteur de contrôler localement la répartition du maillage selon les zones critiques de la géométrie.



Présentation du maillage de la poutre



Présentation du maillage de la plaque carbone



Présentation du maillage de l'adhésive

Figure 42Création du maillage

- **Module Job :**

Le module « Job » reprend les paramètres de calcul définis précédemment, notamment ceux du module « Step ». Une fois le modèle entièrement configuré (géométrie, matériaux, lois de comportement, conditions aux limites et chargements) il est nécessaire de créer un *job* pour lancer la simulation. Cette opération s'effectue en définissant un nouveau job, puis en cliquant sur « Submit » pour démarrer le calcul.

Il est également possible de gérer plusieurs modèles et Jobs en parallèle, facilitant ainsi l'exécution simultanée de plusieurs analyses.

Par ailleurs, vous avez la possibilité de générer uniquement le fichier d'entrée (input file) de l'analyse sans lancer l'exécution immédiatement. Cette option est utile si vous souhaitez examiner ou modifier manuellement le fichier d'entrée avant de le soumettre au solveur.

- **Module Visualisation :**

Le module de visualisation permet d'afficher graphiquement les résultats des simulations de modèles d'éléments finis. Il récupère les informations relatives au modèle et aux résultats depuis la base de données de sortie. Il est possible de contrôler les informations enregistrées dans cette base de données en modifiant les demandes de sortie dans le module Step.

### **3. Conclusion :**

L'utilisation du logiciel ABAQUS dans cette étude a permis de simuler avec efficacité le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par des matériaux composites, soumise à un chargement complexe. La modélisation numérique a mis en évidence l'apport essentiel des matériaux de renforcement dans l'amélioration de la résistance globale de la structure.

Grâce à une démarche rigoureuse, depuis la définition géométrique jusqu'au post-traitement des résultats, il a été possible d'analyser les zones critiques, de comprendre les mécanismes de défaillance, et d'évaluer l'efficacité du renforcement appliqué.

Ce travail montre que la simulation numérique constitue un outil incontournable pour anticiper le comportement des structures et orienter les choix techniques en phase de conception ou de réhabilitation.

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et Discussions**

## 1. Introduction :

Ce chapitre présente une étude numérique consacrée à l'analyse du comportement de poutres en béton, qu'elles soient armées ou non, après renforcement à l'aide de composites à fibres de carbone (FRP). L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de ce type de renforcement à l'aide de modélisations tridimensionnelles réalisées avec le logiciel Abaqus.

Divers scénarios sont explorés : poutres intactes ou préalablement fissurées, renforcement partiel selon différentes longueurs, et variation de la position des fissures. L'étude s'appuie sur les propriétés mécaniques des matériaux utilisés et permet de simuler avec précision les contraintes et les déplacements des structures sous diverses conditions de chargement.

Cette approche permet non seulement de mieux comprendre le rôle des composites FRP dans le renforcement structurel, mais aussi d'identifier les configurations les plus performantes afin d'optimiser la durabilité et la sécurité des ouvrages en béton.

## 2. Propriétés des matériaux utilisés :

### 2.1. Propriétés du béton :

$$E_b = 11000 \cdot \sqrt[3]{f_{c28}}$$

$$f_{c28} = 25 \text{ Mpa}$$

**Tableau 6 :Caractéristiques de la phase élastique du béton. Au-dessus**

Module de Young (MPa)	E= 32000 MPa
Coefficient de Poisson	v=0.25

### 2.2. Propriétés du béton équivalent :

$$E = E_v (0.01) + (E_b (1-V_f))$$

Avec  $E_v = 210000(\text{Mpa})$  et  $E_b = 32000 (\text{Mpa})$ .

**Tableau 7Caractéristiques de la phase élastique du béton équivalent**

Module de Young (MPa)	E= 34000Mpa
-----------------------	-------------

Coefficient de Poisson	$\nu = 0.25$
------------------------	--------------

### 2.3. Propriétés du composite FRP :

**Tableau 8**Caractéristiques mécaniques du renfort (carbone)

Module de Young (MPa)	$E = 74800$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.37$

### 2.4. Propriétés de l'adhésive :

**Tableau 9**Caractéristiques mécaniques de l'adhésive

Module de Young (MPa)	$E = 2520$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.36$

### 2.5. Propriétés de l'acier :

**Tableau 10**Caractéristiques mécaniques de l'acier

Module de Young (MPa)	$E = 210000$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.3$

## 3. Modélisation numérique :

Une simulation numérique a été réalisée sur une poutre, avec et sans armature, renforcée à l'aide d'un matériau composite à base de fibres de carbone, dans le but de mettre en évidence l'efficacité de ce type de renforcement. L'étude s'appuie sur une modélisation tridimensionnelle par la méthode des éléments finis, effectuée à l'aide du logiciel de calcul Abaqus. La poutre est soumise à un chargement triangulaire de 1 kN, 10 kN et 50 kN.

La modélisation comprend cinq cas d'analyse :

- Une poutre en béton non armée ;
- Une poutre en béton non armée renforcée par un composite à base de fibres de carbone
- Une poutre en béton armée renforcée par un composite à base de fibres de carbone ;

- Une poutre en béton armé fissurée, renforcée par un matériau composite de type FRP(Fiber Reinforced Polymer) ;

Trois modèles de fissuration appliqués à une poutre en béton non armée renforcée par un composite à base de fibres de carbone.

#### **4. Etapes de modélisation :**

##### **4.1. Géométrie des éléments :**

L'étude porte sur une poutre en béton, analysée à la fois dans sa configuration armée et non armée. Cette poutre présente une section rectangulaire de  $400 \times 500 \text{ mm}^2$  et une longueur totale de 5000 mm. Le renforcement est assuré par une plaque en matériau composite de type PRF, d'une épaisseur de 5 mm.

Trois longueurs de plaques ont été considérées afin d'évaluer l'effet de l'étendue du renforcement sur le comportement structural de la poutre :

- 3000 mm, correspondant à 60 % de la portée,
- 3500 mm, correspondant à 70 % de la portée,
- 4000 mm, correspondant à 80 % de la portée.

La plaque est fixée à la poutre à l'aide d'un adhésif d'épaisseur constante de 1 mm, dont la longueur est identique à celle de chaque plaque composite.

Les unités utilisées dans la modélisation sont exprimées en millimètres (mm), conformément au système international adopté dans le logiciel Abaqus. Les différentes étapes de modélisation ont été réalisées selon la méthodologie décrite dans les chapitres précédents.

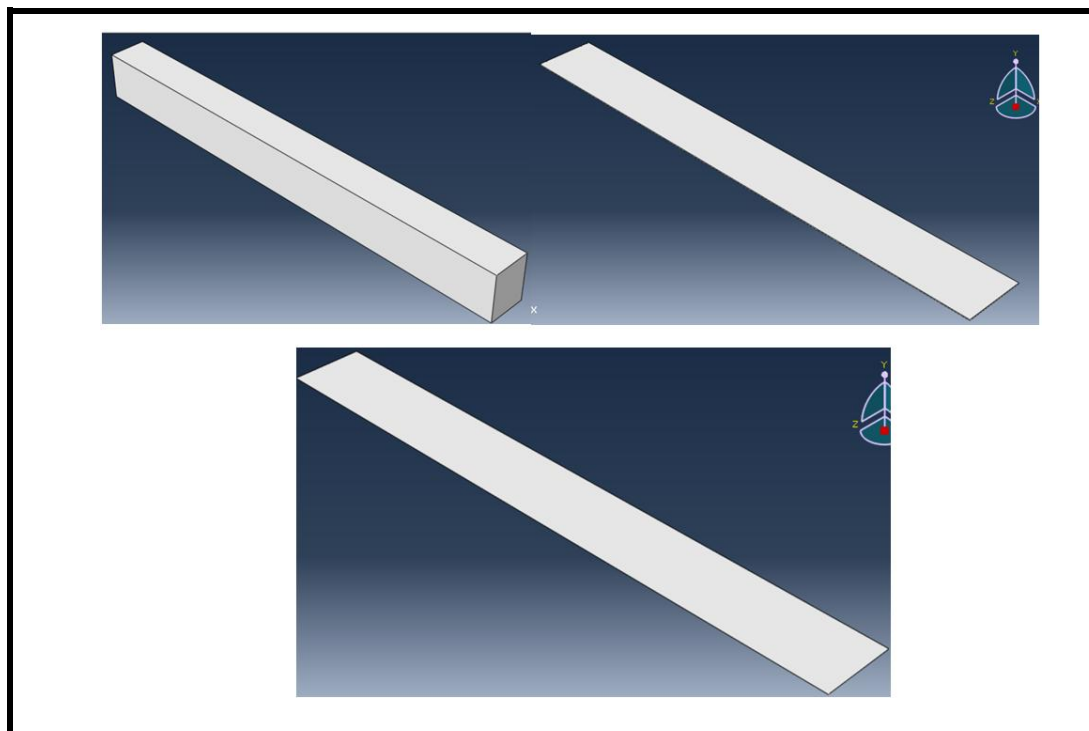


Figure 43 géométrie des éléments modélisés

## 5. Présentation des modèles appliqués:

### 5.1. Premier Modèle:

Le premier modèle présente une poutre en béton armé renforcée par un composite (carbone)

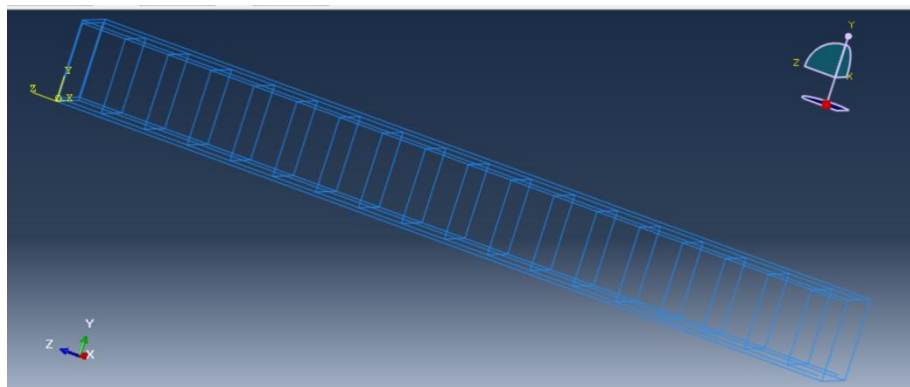
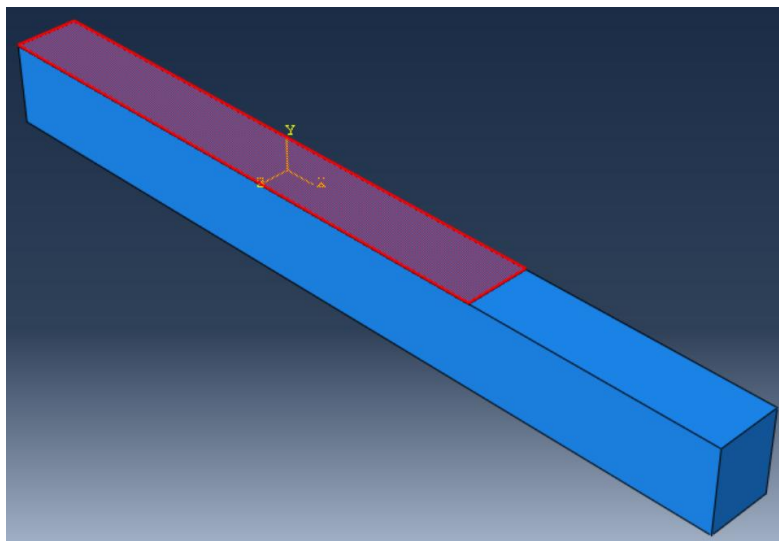


Figure 44 Assemblage de la poutre modélisée en béton armé

### 5.2. Deuxième modèle:

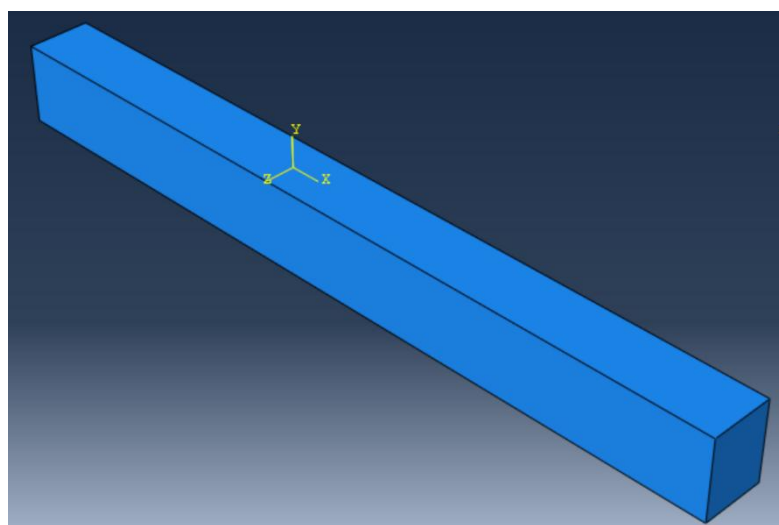
Le deuxième modèle la même poutre sans ferrailage renforcée par un composite (carbone)



**Figure 45** Assemblage de la poutre modélisée en béton renforcée par FRP

### 5.3. Troisième modèle :

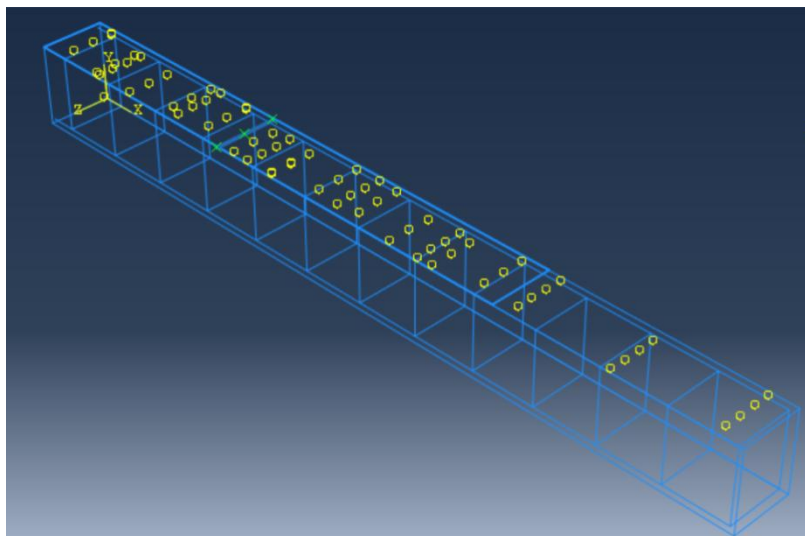
Le troisième modèle présente une poutre en béton seule



**Figure 46** Assemblage de la poutre modélisée en béton non armé

### 5.4. quatrième modèle :

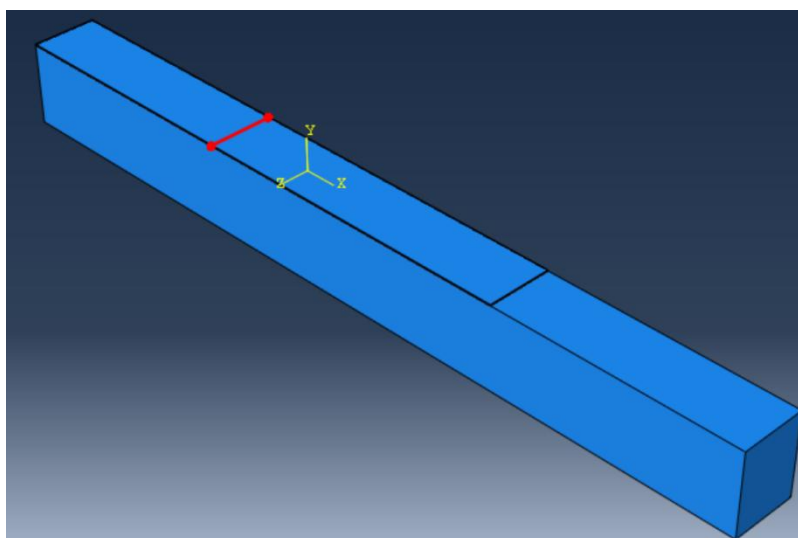
Le quatrième modèle présente une poutre en béton armé fissuré et renforcée par un composite (carbone) Avec longueur de fissure de 7 mm.



**Figure 47** Assemblage de la poutre modélisée en béton armé fissuré et renforcée par FRP

### 5.5. Cinquième modèle :

Le Cinquième modèle présente une poutre en béton équivalent fissuré et renforcée par un composite (carbone) de trois longueur de fissure (3, 7, et 9mm) et de différent position de la poutre (1.5m ,2.5m ,3.5m).



**Figure 48** Assemblage de la poutre modélisée en béton fissuré et renforcée par FRP

### 5.6. Maillage:

Le modèle produit a été maillé en utilisant des éléments cubiques de 50 mm de côté.

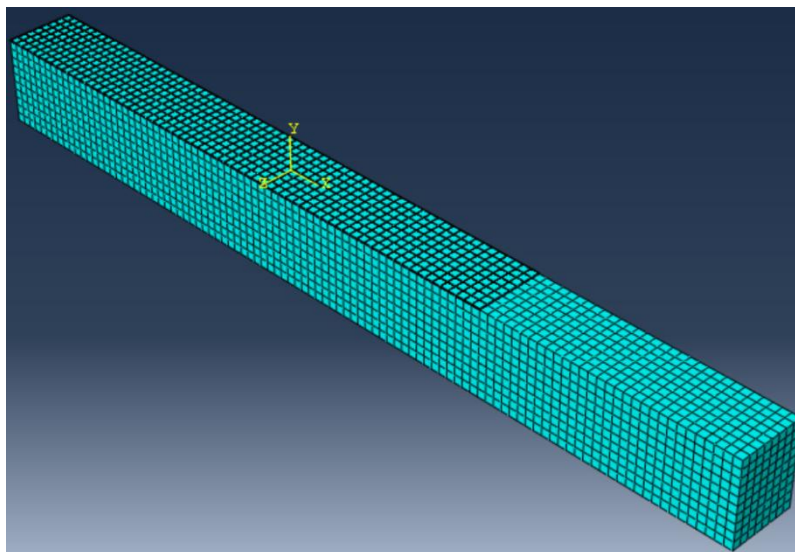


Figure 49 Maillage de la poutre renforcée

## 6. Résultats et discussion :

### A. tableaux contrainte-longueur:

#### ➤ contrainte normale :

Tableau 11 Variation des contraintes normales par rapport à la longueur

x(m)	a=3mm	a=7mm	a=9mm	BTA+f+R	L/2	2L/3
0	0,491829	0,489621	0,48946	0,237929	0,491597	0,491403
0,5	0,330341	0,334755	0,334511	0,150202	0,328137	0,328387
1	0,248282	0,249099	0,248912	0,105874	0,249695	0,24928
1,5	0,200191	0,20253	0,208501	0,077166	0,179532	0,179627
2	0,124564	0,124676	0,125757	0,044862	0,124948	0,124433
2,5	0,081447	0,082063	0,082264	0,025511	0,091723	0,081051
3	0,048786	0,048535	0,048708	0,013107	0,049113	0,048264
3,5	0,028961	0,028792	0,028893	0,006236	0,028672	0,039017

4	0,011451	0,011555	0,011488	0,001744	0,011484	0,011468
4,5	0,002538	0,002549	0,002557	0,000199	0,00255	0,00255
5	1,87E-06	1,72E-06	1,83E-06	-5,60E-07	1,60E-06	1,46E-06

**Tableau 14 Variation des contraintes normales par rapport à la longueur**

x(m)	BT	BT+70%R	BTA+70%R	BT+60%R	BT+80%R
0	0,491599	0,492776	0,237821	0,521102	0,549432
0,5	0,364345	0,331185	0,150449	0,351009	0,371171
1	0,273105	0,248115	0,105498	0,263834	0,279673
1,5	0,197914	0,179793	0,070684	0,19183	0,203954
2	0,137175	0,124609	0,044436	0,133454	0,142357
2,5	0,089526	0,081319	0,025623	0,087481	0,093639
3	0,053602	0,048692	0,013169	0,059387	0,056561
3,5	0,028041	0,028792	0,006365	0,030456	0,03445
4	0,011479	0,011465	0,00176	0,012559	0,014061
4,5	0,002553	0,002553	0,000201	0,002814	0,004545
5	1,36E-06	1,33E-06	-5,60E-07	1,56E-06	1,81E-06

➤ contrainte tangentielle :

**Tableau 15: variation des contraintes tangentielle par rapport a la longueur.**

x(m)	a=3mm	a=7mm	a=9mm	BTA+f+R	L/2	2L/3
0	-0,03802	-0,0384	-0,03838	-0,01978	-0,03775	-0,03793
0,5	-0,00642	-0,00629	-0,0062	-0,00354	-0,00666	-0,00667
1	-0,00559	-0,00496	-0,00526	-0,00277	-0,00539	-0,00541
1,5	-0,00247	0,000404	-0,00369	0,000285	-0,00444	-0,00439
2	-0,0035	-0,00359	-0,00361	-0,00149	-0,00308	-0,00319
2,5	-0,00262	-0,00264	-0,0026	-0,00111	-0,00098	-0,00266
3	-0,00198	-0,00218	-0,00192	-0,00068	-0,00186	-0,00203
3,5	-0,00265	-0,00271	-0,00271	-0,00067	-0,00268	-0,00323
4	-0,00056	-0,00055	-0,00057	-0,00012	-0,00053	-0,00059
4,5	-0,00026	-0,00028	-0,00026	-2,73E-05	-0,00024	-0,00027
5	-2,14E-06	-2,12E-06	-2,19E-06	4,18E-07	-1,96E-06	-1,79E-06

**Tableau 12**

**Tableau 16: variation des contraintes tangentielle par rapport à la longueur.**

x(m)	BT	BT+70%R	BTA+70%R	BT+60%R	BT+80%R
0	-0,05513	-0,03739	-0,019506	-0,0393	-0,04128
0,5	-0,00469	-0,00652	-0,003615	-0,00685	-0,00717
1	-0,0039	-0,0054	-0,002844	-0,00569	-0,00598

1,5	-0,00319	-0,00441	-0,002175	-0,00466	-0,00491
2	-0,00254	-0,00351	-0,001596	-0,00373	-0,00394
2,5	-0,00196	-0,0027	-0,001108	-0,00288	-0,00306
3	-0,00144	-0,00198	-0,000709	-0,00486	-0,00227
3,5	-0,00098	-0,00264	-0,000669	-0,00106	-0,00157
4	-0,00059	-0,00059	-0,000127	-0,00064	-0,00156
4,5	-0,00026	-0,00026	-3,12E-05	-0,00029	-0,00031
5	-1,68E-06	-1,68E-06	4,08E-07	-1,91E-06	-2,15E-06

### B. courbe contrainte-longueur:

#### ➤ contrainte normal :

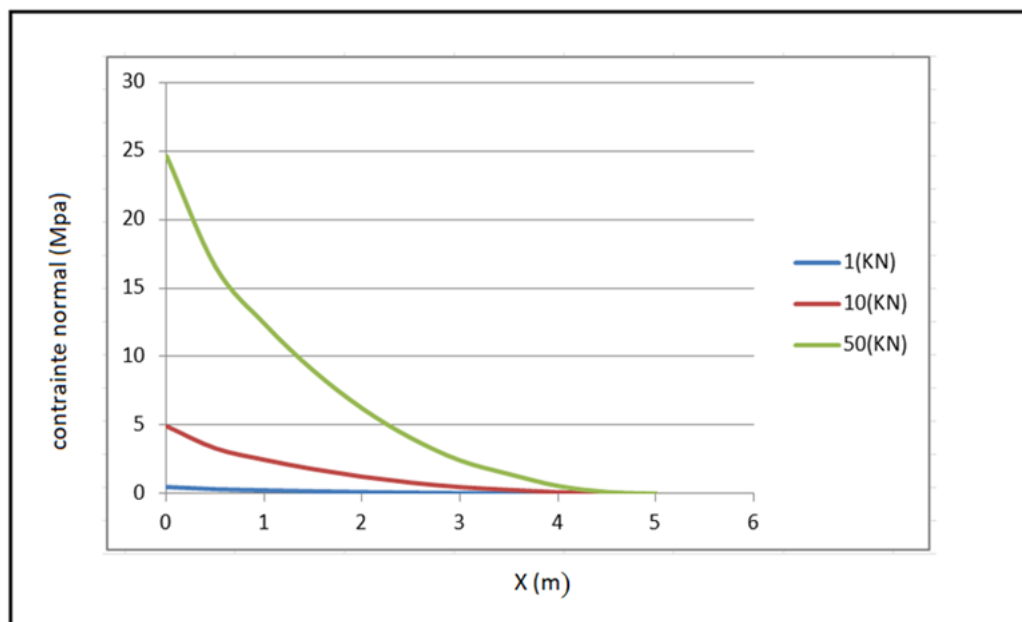


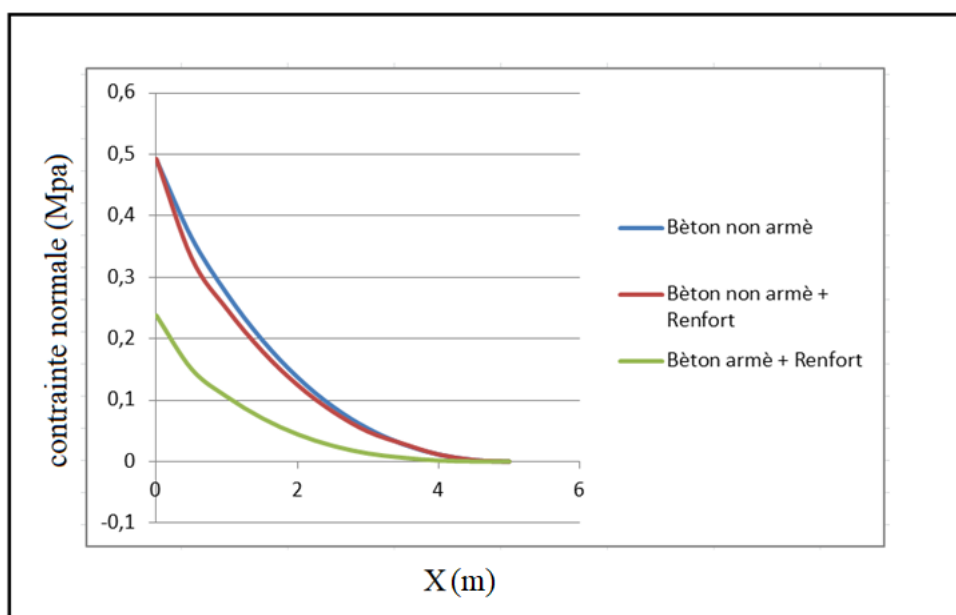
Figure 50 courbe contrainte-longueur d'une poutre en béton non armé réparé par fibre de FRP

L'analyse de la distribution des contraintes normales en fonction de la distance  $X$  met en évidence plusieurs tendances significatives. Pour l'ensemble des charges appliquées, la contrainte maximale se situe à l'origine, soit à  $X = 0$  mm, ce qui indique une forte concentration des efforts à ce point. Cette localisation suggère que le point  $X = 0$  correspond à la zone initiale d'application de la charge ou à une interface structurale critique.

À mesure que la distance augmente, la contrainte normale diminue rapidement, indiquant une dissipation efficace des efforts sur une courte distance de la poutre ou de l'interface. Cette chute marquée des contraintes témoigne d'un transfert de charge localisé et maîtrisé.

L'effet de l'intensité de la charge est également manifeste : plus la charge appliquée est importante, plus la contrainte maximale observée à  $X = 0$  mm est élevée. Pour une charge de 1 kN, la contrainte initiale est relativement faible, de l'ordre de 2 à 3 MPa. À 10 kN, elle atteint environ 5 MPa, tandis qu'à 50 kN, elle grimpe jusqu'à 25 MPa. Cette évolution met en évidence une relation directe entre l'intensité de la charge et l'amplitude du pic de contrainte.

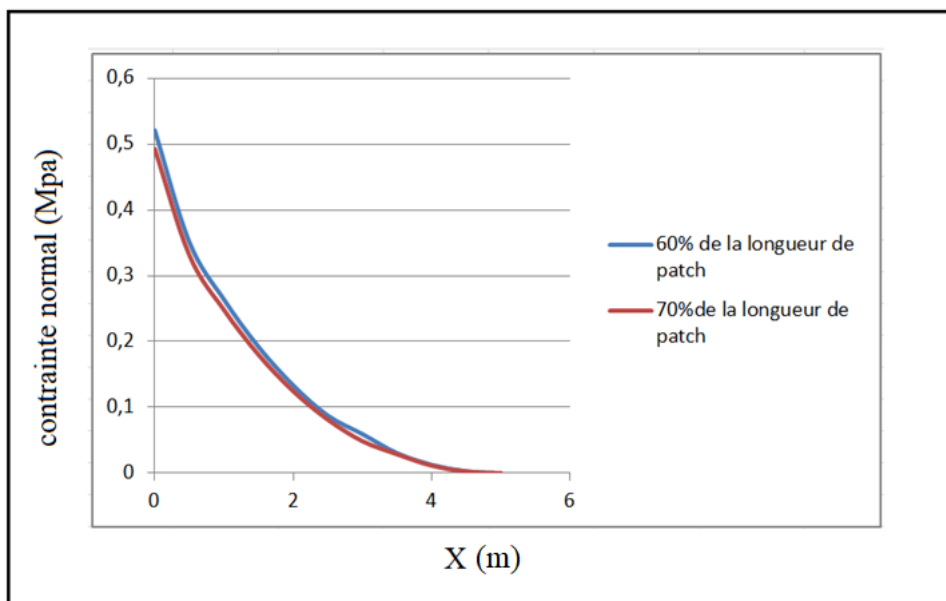
Enfin, il est important de souligner que, quelle que soit la charge, la concentration de contrainte reste confinée dans une zone très réduite. Au-delà de 2 à 3 mm de distance, les contraintes normales chutent rapidement et tendent vers zéro. Ce comportement traduit une bonne capacité du système à transférer les charges de manière localisée, ce qui est généralement souhaitable dans les assemblages collés ou renforcés par des matériaux composites.



**Figure 51** courbe contrainte- longueur d`une trois types de poutre

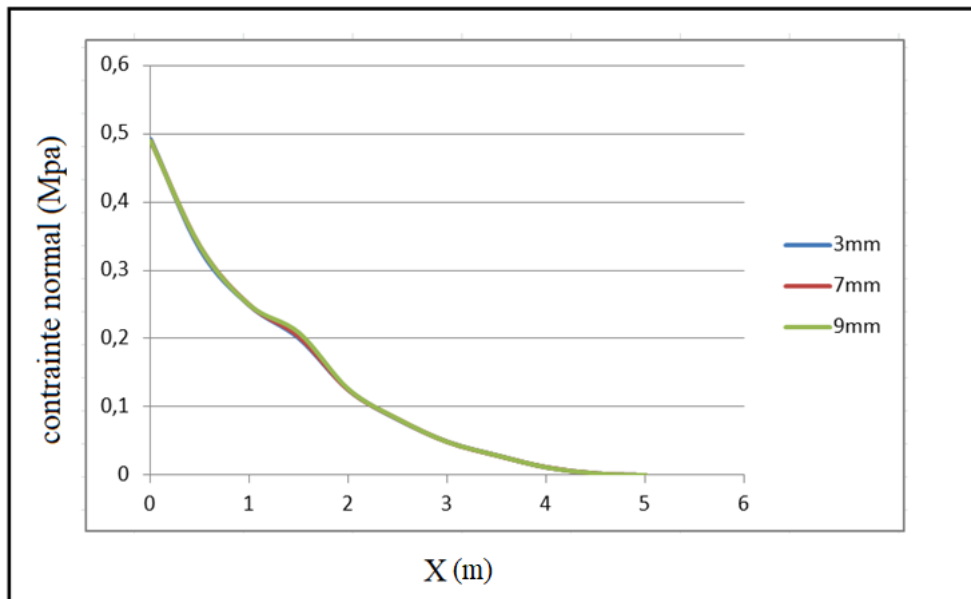
La figure analysée illustre la distribution des contraintes en fonction de la distance pour trois configurations de poutres distinctes. Cette représentation permet de mieux comprendre la manière dont les efforts sont localement répartis selon le type de renforcement appliqué à la structure. Les trois cas comparés sont : une poutre en béton non armé (courbe bleue), une poutre en béton non armé renforcée avec un matériau composite de type PRF (courbe rouge), et une poutre en béton armé également renforcée par un PRF (courbe verte). Dans les trois configurations, la contrainte normale atteint son maximum à l'origine ( $X = 0$  mm), indiquant une forte concentration des efforts au point de chargement ou à l'interface critique. À mesure que la distance augmente, on observe une diminution rapide des contraintes, indiquant une dissipation efficace sur une courte distance.

En termes d'intensité, le béton seul présente la contrainte maximale la plus élevée (environ 0,5MPa), révélant une concentration importante de l'effort au point de chargement. L'ajout d'un renfort externe réduit légèrement cette contrainte initiale (environ 0,45 MPa), sans toutefois modifier radicalement la forme de la courbe. En revanche, la configuration combinant béton armé et renfort externe présente la contrainte initiale la plus faible (environ 0,2 MPa), soulignant l'efficacité de cette combinaison pour atténuer les pics de contrainte. Enfin, le taux de dissipation des contraintes varie selon les configurations : pour les deux premières (béton seul et béton + renfort), la contrainte devient négligeable à partir de  $X \approx 4,5-5$  mm, tandis que dans le cas du béton armé avec renfort, elle décroît plus rapidement, devenant presque nulle dès  $X \approx 3,5$  mm. Ce comportement suggère une meilleure répartition des efforts et un transfert de charge plus localisé et donc plus efficace dans la configuration la plus renforcée.



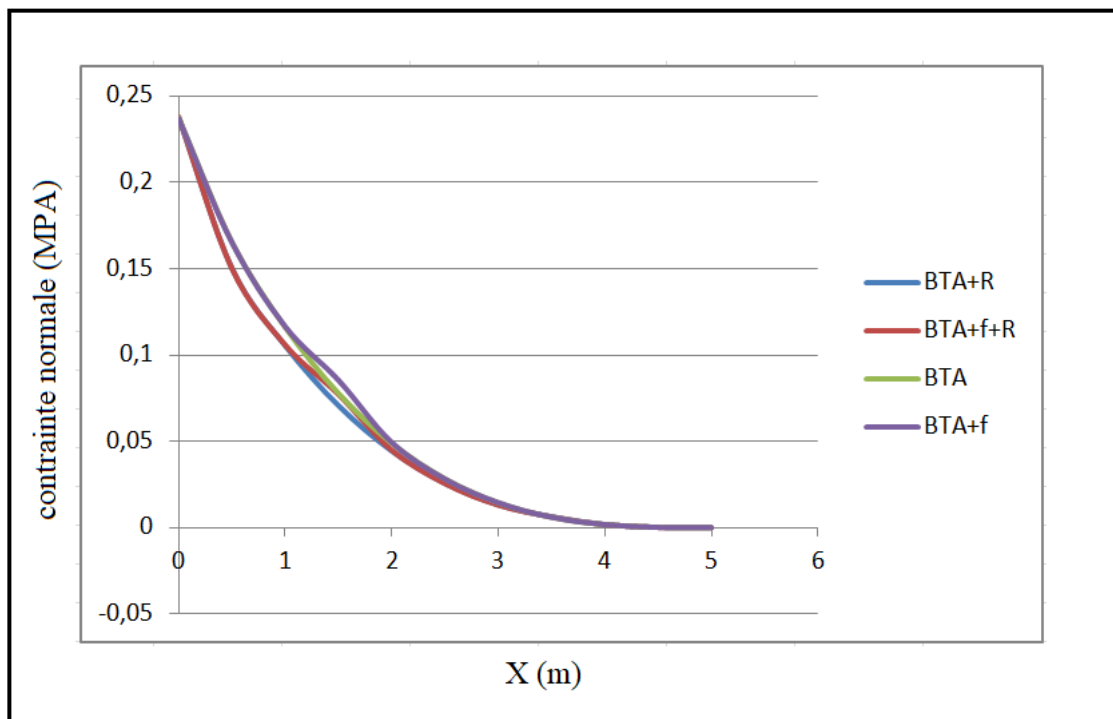
**Figure 52** comparaison de deux poutres en béton réparé par FRP.

Le graphique présente une comparaison de la distribution de la contrainte normale dans deux poutres en béton réparées à l'aide de matériaux composites FRP, avec des patches couvrant respectivement 60 % et 70 % de la longueur. On observe dans les deux cas une décroissance progressive de la contrainte normale en fonction de la distance, traduisant un transfert de charge du patch vers le béton. La courbe correspondant à une longueur de patch de 70 % montre des valeurs de contrainte légèrement inférieures à celles de la configuration à 60 %, indiquant une dissipation plus efficace des contraintes. Ainsi, l'augmentation de la longueur du patch améliore les performances mécaniques de la réparation en réduisant davantage les contraintes dans le béton. Ce résultat met en évidence l'intérêt d'optimiser la longueur des patches FRP pour assurer une meilleure efficacité structurelle et une durabilité accrue des réparations.



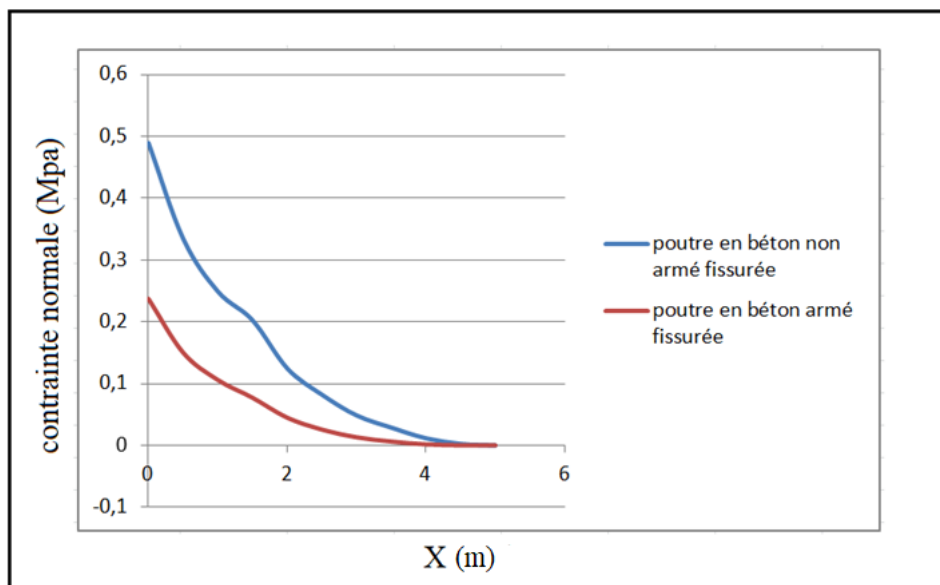
**Figure 53** courbe contrainte- longueur de trois modèles de fissures dans une poutre en béton non armé réparé par fibre de FRP

La courbe contrainte-déplacement montre que la contrainte diminue avec l'augmentation du déplacement pour toutes les largeurs de fissures (3 mm, 7 mm, 9 mm). À faible déplacement, les fissures plus étroites conservent une meilleure capacité de transfert d'effort. Cependant, à partir d'un déplacement d'environ 2 mm, les courbes convergent, indiquant que la largeur initiale de la fissure n'a plus d'influence significative. Le renforcement par FRP permet ainsi une réponse mécanique plus homogène en phase post-fissuration, quel que soit l'endommagement initial.



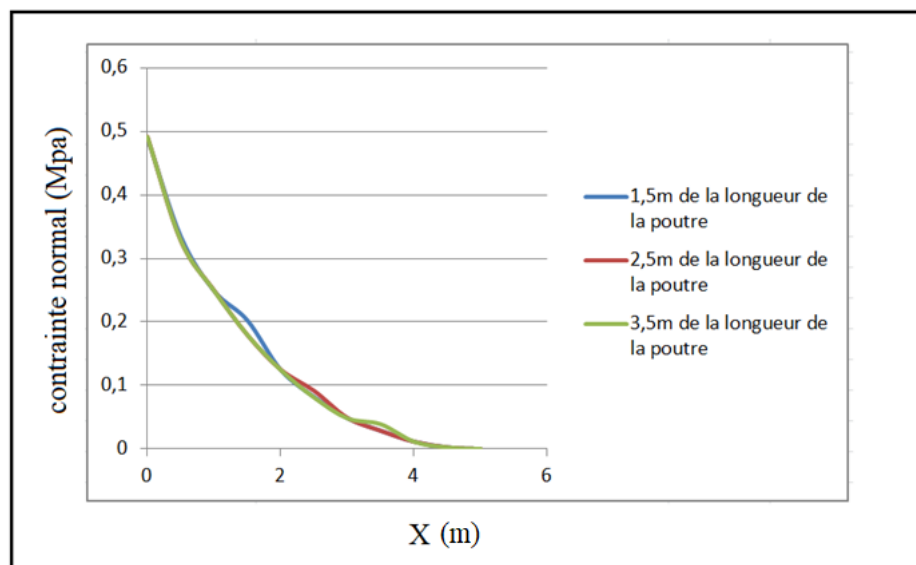
**Figure 54** courbe contrainte- longueur d'une poutre en béton armé avec et sans fissure réparé par fibre de FRP

La courbe illustre la variation de la contrainte normale (en MPa) le long d'une poutre en béton armé selon la position longitudinale X (en m), pour quatre configurations : une poutre intacte (BTA), une poutre fissurée non réparée (BTA+f), une poutre réparée (BTA+R), et une poutre fissurée puis réparée (BTA+f+R) à l'aide de fibres de polymères renforcés (FRP). Dans l'ensemble, la contrainte maximale est enregistrée à l'origine ( $X=0m$ ), avec une décroissance rapide au fur et à mesure que la distance augmente, pour s'annuler vers  $X=5m$ . Cette tendance confirme un transfert d'efforts localisé typique du comportement en compression. La comparaison montre que la réparation avec FRP, qu'elle soit appliquée sur une poutre fissurée ou non, permet de retrouver une répartition des contraintes très proche de celle observée sur la poutre intacte. En revanche, la configuration non réparée (BTA+f) présente une légère diminution de performance, traduisant une perte d'efficacité mécanique. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt des matériaux composites dans la restauration du comportement mécanique des structures en béton armé



**Figure 55** courbe contrainte- longueur d'une deux types de poutre avec et sans armature fissuré et réparé par FRP

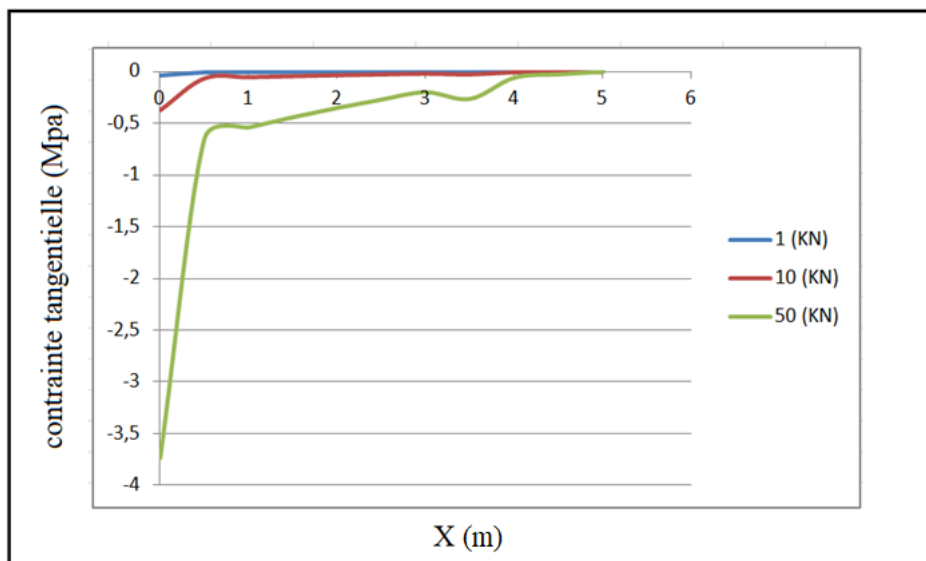
Le graphique illustre la relation entre la contrainte normale (en MPa) et le déplacement (en mm) pour deux types de poutres fissurées réparées par FRP : une poutre en béton seul et une poutre en béton armé. La courbe montre que la poutre en béton seul subit une chute rapide de la contrainte avec l'augmentation du déplacement, indiquant une faible capacité à résister aux déformations après fissuration. En revanche, la poutre en béton armé présente une diminution plus modérée de la contrainte, traduisant une meilleure tenue mécanique et une redistribution plus efficace des efforts grâce à l'armature. Ainsi, bien que la contrainte initiale soit plus élevée dans le béton non armé, la combinaison de l'armature et de la réparation par FRP permet au béton armé de mieux conserver ses performances sous chargement post-fissuration.



**Figure 56** courbe contrainte- longueur de trois positions de fissure dans une poutre en béton réparé par fibre de FRP

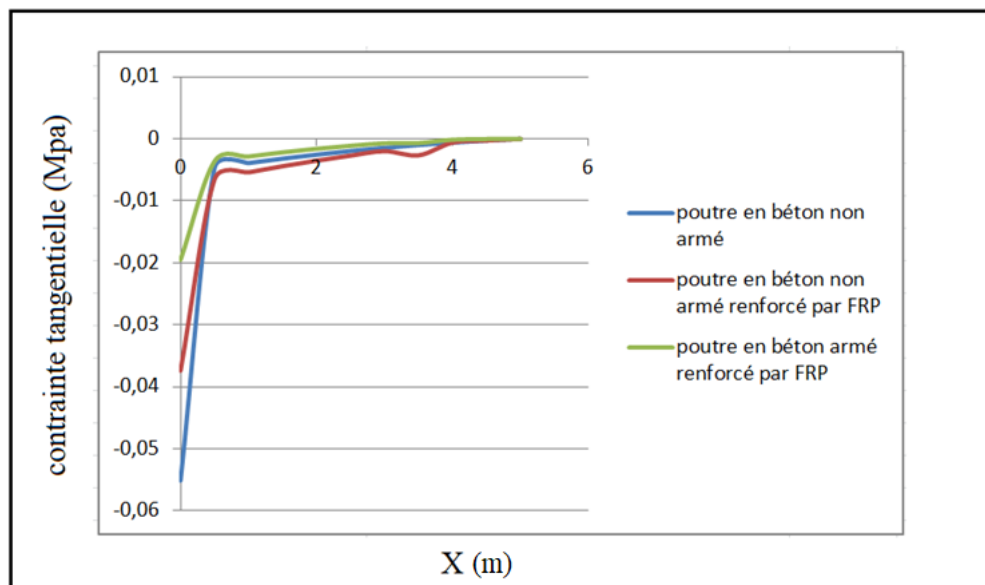
Ce graphique illustre l'évolution de la contrainte normale en fonction du déplacement pour trois positions de fissure situées à 1,5 m, 2,5 m et 3,5 m de la longueur d'une poutre en béton réparée par fibre de FRP. Les trois courbes suivent une tendance décroissante similaire, indiquant que la réparation par FRP permet une réponse mécanique globalement cohérente quelle que soit la position de la fissure. Toutefois, on remarque que la courbe correspondant à la fissure située à 1,5 m (en bleu) présente une diminution plus rapide de la contrainte par rapport aux autres, suggérant une efficacité légèrement moindre de la réparation dans cette zone. À l'inverse, les courbes aux positions de 2,5 m (rouge) et 3,5 m (vert) montrent une performance plus homogène, traduisant une meilleure capacité de transfert de charge. Cela peut être attribué à la distribution des efforts internes le long de la poutre, où les zones centrales bénéficient d'une meilleure synergie entre le béton et le FRP.

## ➤ contrainte tangentielle :



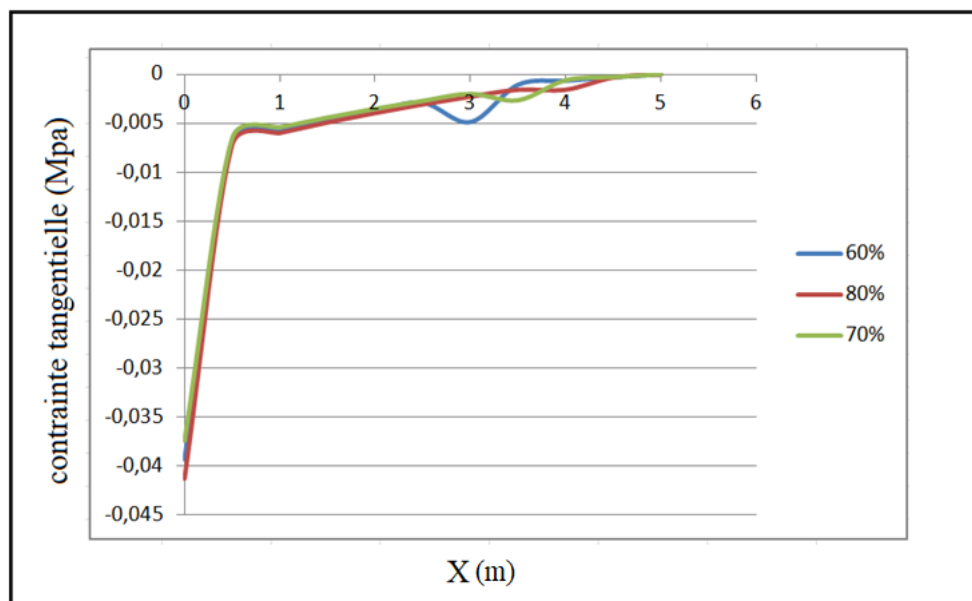
**Figure 57** courbe contrainte- longueur d'une poutre en béton seul réparé par fibre de FRP

Le graphique représente la courbe contrainte-déplacement pour une poutre en béton seul réparée par fibre de FRP, soumise à trois niveaux de charge différents : 1 kN, 10 kN et 50 kN. On observe que pour les faibles charges (1 kN en bleu et 10 kN en rouge), la contrainte tangentielle reste proche de zéro et varie peu avec le déplacement, ce qui suggère une faible sollicitation du matériau et une réponse quasi-élastique. En revanche, pour une charge plus élevée (50 kN, courbe verte), la contrainte tangentielle chute brusquement à près de -3,5 MPa, indiquant une forte sollicitation en cisaillement. Cette courbe montre ensuite une légère remontée, traduisant un réajustement mécanique dû probablement à l'effet du renforcement par FRP. Ainsi, ce comportement met en évidence que la réparation par FRP est efficace à faibles charges, mais que des sollicitations plus importantes engendrent des contraintes internes significatives, pouvant affecter la stabilité de la réparation si elles dépassent les capacités d'adhérence entre le béton et les fibres.



**Figure 58** courbe contrainte- longueur d`une trois types de poutre

La courbe présentée illustre le comportement contrainte-déplacement de trois types de poutres en béton soumises à un cisaillement. Il ressort clairement que la poutre en béton armé renforcé par FRP (courbe verte) offre les meilleures performances, en termes de résistance et de stabilité, comparée aux deux autres. La poutre en béton renforcé par FRP (courbe bleue) présente également une amélioration notable par rapport à la poutre en béton seul (courbe rouge), ce qui démontre l'effet bénéfique du renforcement avec des matériaux composites. Le béton seul montre une faiblesse plus marquée sous l'effet du déplacement, tandis que l'ajout d'un renforcement, qu'il soit en acier ou en FRP, permet de limiter la déformation et d'augmenter la capacité portante. Ces résultats soulignent l'efficacité du renforcement FRP, surtout lorsqu'il est combiné à une armature traditionnelle, pour améliorer le comportement mécanique des structures en béton.

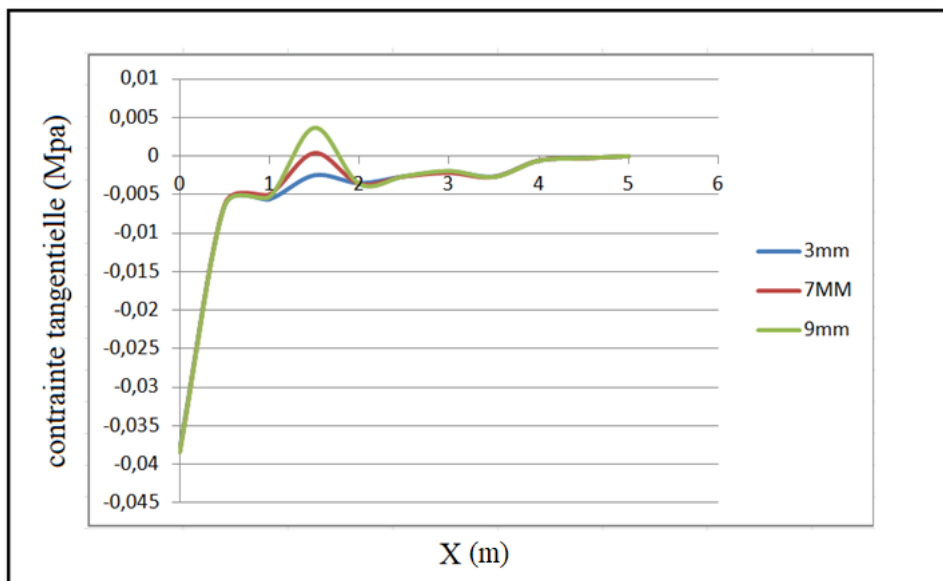


**Figure 59** comparaison de deux poutres en béton réparées par FRP

On observe que, pour les trois cas, la contrainte tangentielle atteint une valeur maximale négative importante près de l'origine ( $X \approx 0$  mm), puis elle augmente progressivement jusqu'à se stabiliser autour de zéro. Cette évolution indique que la majeure partie des contraintes est transférée à l'extrémité du renfort FRP, là où se produit l'ancrage.

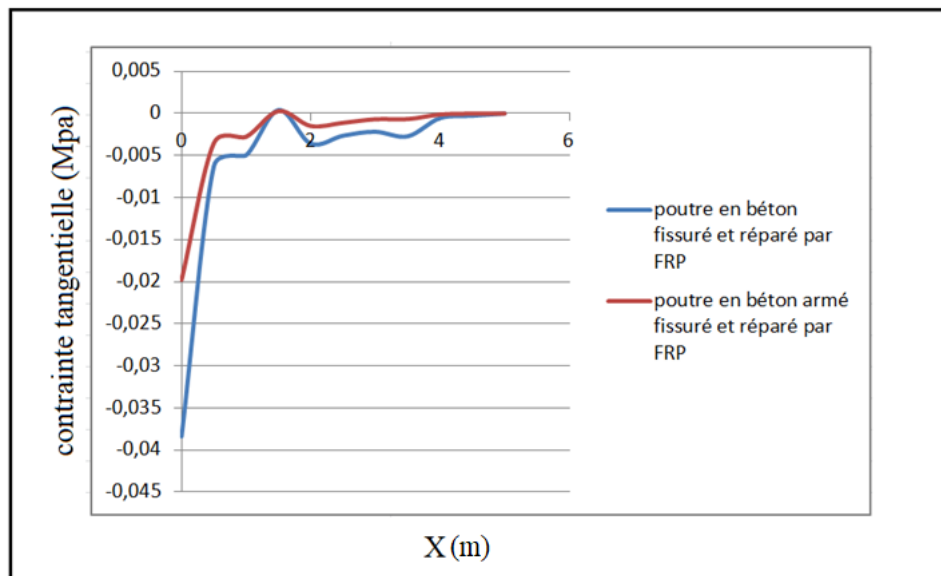
Comparativement, les poutres renforcées sur 80 % de leur longueur présentent une courbe plus lisse, avec une remontée plus rapide vers l'équilibre, ce qui suggère une meilleure efficacité de transfert des efforts et une réduction du risque de délaminage. À 70 %, le comportement est intermédiaire et reste proche de celui à 80 %, tandis qu'à 60 %, la courbe présente des irrégularités (notamment une oscillation visible vers  $X = 3$  mm), ce qui peut indiquer une moins bonne distribution des contraintes et une possible zone de concentration critique.

En conclusion, plus la longueur de FRP est importante par rapport à la poutre, plus la répartition des contraintes est uniforme et contrôlée, ce qui améliore l'efficacité du renforcement et la sécurité de la structure.



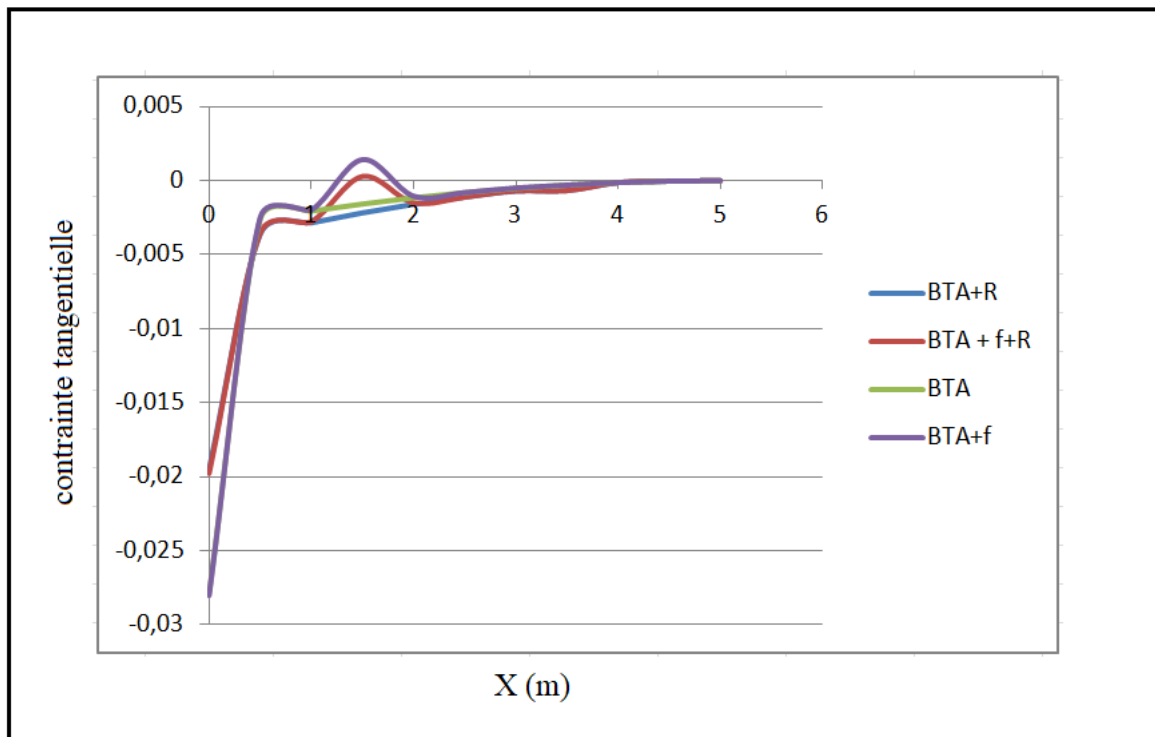
**Figure 60** courbe contrainte- longueur de trois modèles de fissures dans une poutre en béton seul réparé par fibre de FRP

On remarque que, pour les trois cas, la contrainte commence par une phase négative, traduisant probablement une compression initiale, avant d'atteindre une valeur maximale positive, qui correspond à une traction maximale dans la zone réparée. Le modèle avec une fissure de 9 mm montre une amplitude de contrainte plus élevée, ce qui indique une sollicitation plus importante autour de la zone réparée. À l'inverse, les modèles à 3 mm et 7 mm présentent des pics plus modérés, suggérant une meilleure répartition des efforts grâce au renforcement. Ces résultats mettent en évidence l'influence de la taille des fissures sur la performance de la réparation, et confirment que le FRP contribue à restaurer la résistance locale, mais que son efficacité peut varier selon la gravité des dommages initiaux.



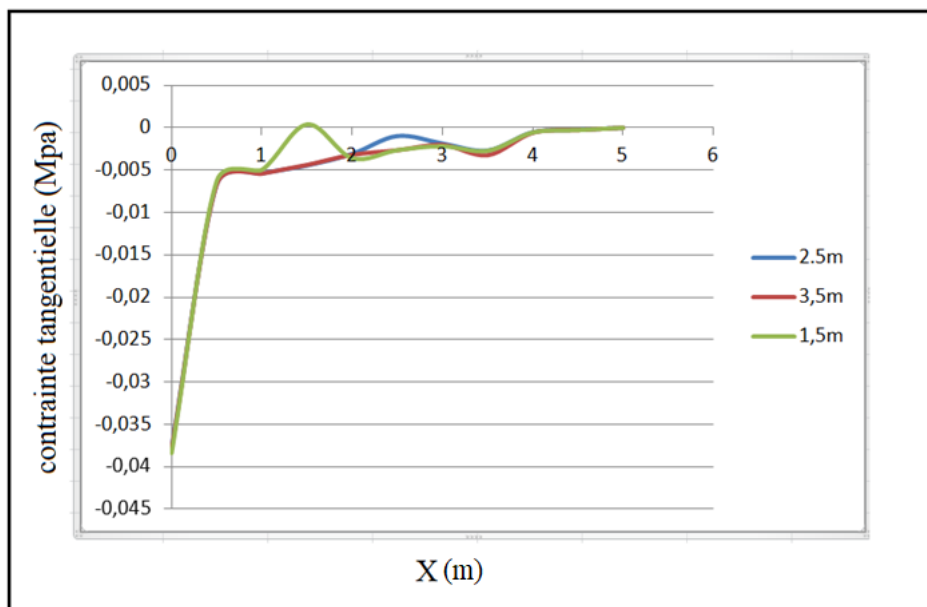
**Figure 61** courbe contrainte- longueur d`une deux types de poutre avec et sans armature fissuré et réparé par FRP

On remarque que, pour les trois cas, la contrainte commence par une phase négative, traduisant probablement une compression initiale, avant d'atteindre une valeur maximale positive, qui correspond à une traction maximale dans la zone réparée. Le modèle avec une fissure de 9 mm montre une amplitude de contrainte plus élevée, ce qui indique une sollicitation plus importante autour de la zone réparée. À l'inverse, les modèles à 3 mm et 7 mm présentent des pics plus modérés, suggérant une meilleure répartition des efforts grâce au renforcement. Ces résultats mettent en évidence l'influence de la taille des fissures sur la performance de la réparation, et confirment que le FRP contribue à restaurer la résistance locale, mais que son efficacité peut varier selon la gravité des dommages initiaux.



**Figure 62** courbe contrainte- longueur d`une poutre en béton armé avec et sans fissure réparé et non réparé par fibre de FRP

L'analyse montre que la présence d'une fissure (cas BTA + f) entraîne une augmentation significative des contraintes tangentielles, en particulier dans la zone proche de l'origine, traduisant une perturbation locale du transfert d'effort. La poutre renforcée sans fissure préalable (BTA + R) montre une réduction notable des contraintes par rapport au cas fissuré, confirmant l'efficacité du renforcement par FRP. Le cas le plus critique est celui de la poutre fissurée non renforcée (BTA + f), tandis que la combinaison fissure et renforcement (BTA + f + R) permet une amélioration substantielle du comportement mécanique, bien qu'un léger résidu de l'effet de la fissure subsiste. En somme, le renforcement par FRP se montre particulièrement efficace, surtout lorsqu'il est appliqué à une structure endommagée, en restaurant une répartition plus homogène des contraintes tout au long de la poutre.



**Figure 63** courbe contrainte- longueur de trois positions de fissure dans une poutre en béton réparé par fibre de FRP

L'analyse des courbes indique que la position de la fissure a une influence significative sur le comportement mécanique de la poutre réparée. La courbe correspondant à la fissure située à 1,5 m (en vert) présente un pic de contrainte plus élevé que les autres, ce qui peut être attribué à une zone de concentration de contraintes plus importante, probablement proche d'un appui ou d'une zone sollicitée. À l'inverse, les fissures positionnées à 2,5 m et 3,5 m (courbes bleue et rouge) présentent un comportement plus stable et une montée plus progressive, traduisant une meilleure redistribution des efforts. Cela suggère que l'efficacité du renforcement par FRP dépend fortement de la localisation de la fissure sur la poutre, certains emplacements générant plus de contraintes critiques que d'autres.

#### **V.7 conclusion :**

Ce chapitre a présenté une analyse numérique détaillée visant à évaluer l'effet du renforcement par composites en fibres de carbone (FRP) sur le comportement mécanique des poutres en béton. Les simulations menées à l'aide du logiciel Abaqus ont permis d'examiner plusieurs configurations structurelles, en prenant en compte divers états de fissuration, niveaux d'armature et dimensions de renfort.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité du renforcement par composites en fibres de carbone pour améliorer la résistance et la durabilité des éléments en béton. Ce type de

renforcement permet de réduire les concentrations de contraintes et favorise une meilleure redistribution des efforts internes. L'étude a également mis en évidence le rôle déterminant de certains paramètres géométriques, tels que la longueur du renfort ou la localisation des fissures, dans l'optimisation de la performance structurale.

En conclusion, cette étude valide la pertinence du recours aux composites FRP dans les approches contemporaines de réhabilitation et d'optimisation des structures en béton.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion

---

Le béton armé, reconnu pour sa fiabilité, combine la résistance à la compression du béton avec la résistance à la traction de l'acier. L'emploi de matériaux composites, tels que les polymères renforcés de fibres (FRP), permet d'enrichir les performances des structures. Dans les systèmes hybrides, l'étude de la fissuration revêt une importance particulière, les composites jouant un rôle déterminant dans la maîtrise de l'ouverture et de la distribution des fissures, ce qui contribue à améliorer la résistance globale de l'ouvrage.

L'efficacité du renforcement est étroitement liée à la qualité de l'interface entre le béton et le composite, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques telles que le cisaillement et le risque de décollement. Dans ce contexte, la mécanique de la rupture, qui s'articule autour des facteurs d'intensité de contrainte (KI, KII, KIII) et des paramètres de ténacité à la rupture ( $K_c$  ou  $G_c$ ), permet une anticipation plus précise de l'évolution des fissures.

L'application de ces principes à des configurations particulières, telles que les renforcements en extrados, nécessite une adaptation des modèles théoriques existants. Une démarche méthodique, alliant modélisation numérique, expérimentation et analyse en mécanique de la rupture, s'avère ainsi impérative pour assurer la sûreté et l'efficacité de ces solutions.

Dans cette optique, une simulation numérique détaillée réalisée avec le logiciel Abaqus a démontré la pertinence du renforcement par composites en fibres de carbone (FRP). Cette étude a révélé une diminution significative des concentrations de contraintes, une optimisation de la distribution des efforts internes, ainsi qu'une amélioration notable de la résistance et de la durabilité des poutres en béton. En outre, elle met en exergue l'importance de certains paramètres géométriques, tels que la longueur du renfort et la position des fissures, dans l'optimisation des performances structurelles. Les résultats de l'étude menée permettent de confirmer l'intérêt des composites FRP pour la réhabilitation et l'amélioration des structures.

Les résultats de cette étude laissent entrevoir plusieurs pistes prometteuses pour des recherches futures et des améliorations potentielles. Par ailleurs, l'évaluation du comportement à long terme des composites dans des conditions réelles, ainsi que leur application à d'autres types de structures, constitue également un enjeu majeur. Par ailleurs, l'intégration de méthodes combinant essais expérimentaux et modélisation numérique pourrait

## Conclusion

---

contribuer à l'amélioration de la fiabilité et de la prédiction du comportement des structures renforcées.

# **Références bibliographique**

## Références bibliographique

---

1. ABBAS, M. (2012). *UTC-CNRS B.P.20529*. Stéphane Bochart.
2. Agoudjil, A. B. (2008). *Comparative analysis of dielectric, rheological and thermophysical behaviour of ethylene vinyl acetate/BaTiO<sub>3</sub> composites*. J. Phys. D: Appl. Phys., vol 41.
3. Aitcin, P. C. (1998). *Les différents types de retrait du béton*. Bulletin Laboratoires des Ponts et Chaussées.
4. Badour, S. (2018). *Utilisation des matériaux composites pour la réparation parasismique en béton armé*» Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université Ibn Khaldoun Tiaret.
5. BAEL. (2000). *Règles de Béton Armé Aux États Limites (BAEL 91 modifiées 99)*. Edition Eyrolles, Troisième édition .
6. BENARBIA, D. (2017). *Etude du comportement mécanique des poutres fissurées Renforcées par des matériaux composites*. Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbès.
7. Berthelot, J.-M. (s.d.). *Mécanique des Matériaux et Structures composites*. Le Mans, France: Institut Supérieure des Matériaux et Mécanique Avancés.
8. Biron, M. (2004). *Thermosets and Composites: Material Selection, Applications, Manufacturing and Cost Analysis*. John Wiley & Sons.
9. CHANVILLARD G., d. L. (1994). *Prévision de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent*. Liaison Lab. Ponts et Ch.
10. COMMITTEE, A. (1984). *State of the art report on fibre reinforced concrete*. Philadelphia: American Concrete Institute.
11. Dalour, H. B. (2007). *The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites*. New Zealand: These de doctorat, University of Waikato, Hamilton.
12. DORLOT J.M, B. J. (1986). *Des matériaux 2ème édition*. Montréal, Québec,: Ecole polytechnique de Montréal.
13. DUPAIN R., L. R. (2000). *Granulats, sols, ciments et bétons*. Paris: SAINT-ARROMAN J.C. , Edition Casteilla.
14. GADRI, K. (2007). *Contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destiné pour la réparation mince des structures*. Mémoire de Magister, Université Biskra.

## Références bibliographique

---

15. Glannoum, W. (1998). *Size effect on Sears straight of reinforced concrete teams*. Mémoire de master école normale supérieure de Cachan.
16. Gorent, L. (2008). *Généralités sur les M.C*. Ecole d'ingénieur .
17. Guo YC, G. W. (2018). *Stress-strain behavior of circular concrete columns partially wrapped with FRP strips, Composite. Structure* .
18. *holcim*. (s.d.). Récupéré sur causes-et-preventions-des-alterations-du-beton-action-du-gel-et-des-sels-de-deverglacage: <https://www.holcim.be/fr/causes-et-preventions-des-alterations-du-beton-action-du-gel-et-des-sels-de-deverglacage>
19. IGUETOULENE.F. (2011). *modélisation non linéaire des structures triangulées* . Thèse de MAGISTER, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou.
20. Jesse. F, C. (s.d.). *Strength of continuous AR-glass-fibre reinforcement for cementitious composites*. RILEM International Workshop High Performance Fiber reinforced cement composite 12,.
21. K.Saidani. (2013). *analyse des composites sandwich et qualification du leur intéfrité vis a vis de la ruine* . these de doctorat, université Tizi ouzou.
22. Karlsson & Sorensen. (2014). *HIBBIT. INC ABAQUS documentation version*.
23. Koizumi.M. (1993). *The concept of FGM, ceramic transactions*. Funct Grad Mater.
24. LAKHAL, R. (2010). *Les causes de dégradation des bétons Restauration des Patrimoines*. Mémoire master.Université Badji Mokhtar Annaba.
25. M. Achit-Henni1, M. T. (2010). *Influence du ferrailage transversal sur le comportement des nœuds poutres poteaux en béton armé soumis à des charges cycliques alternées*. La Bourboule.
26. M.Berthelot, J. (2005). *Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures*. Lavoisier: 4eme édition, Ed TEC&DOC.
27. MAI-NHU, J. (2015). *Corrosion des armatures: intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage* ».Rapport d'études et recherches. Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton en France.
28. Mallick, P. (2007). *Fiber-reinforced composites''*, *Materials, Manufacturing and Design*.CRC Press.

## Références bibliographique

---

29. MESSAOUDENE, L. (2019). *Contribution au renforcement des zones critiques des portiques en béton armé par des matériaux composites*. Mémoire de master de l'université de Bejaia.
30. Nekkouché A, K. A. (2014). *Simulation numérique d'un portique en béton armé renforcé par collage des plaques composites*. CMMS14 .
31. *pathologies-beton*. (s.d.). Récupéré sur guidebeton:  
<http://www.guidebeton.com/pathologies-beton>
32. PERROT.Y. (2006). *Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites*. thèse de Doctorat Université de Bretagne Sud.
33. ROSSI, P. (2010). *TUNNELS ET ESPACE SOUTERRAIN*.
34. ROSSI, P. A. (2005). *Bending and Compressive Behaviors of a New Cement Composite*. Cement and Concrete Research, no 35.
35. S.DRIZI. (2012). *Influence de la variation des caractéristiques mécaniques sur le comportement des éléments en béton armé*. MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE, UMMTO Tizi-Ouzou.
36. Teng, J. C. (2002). *FRP strengthened RC structures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
37. W. De Caluwé (FEREB), M. L. (2007). *Réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)* . Note d'information technique 231(CSTC).
38. WU, Z. Y. (2004). *Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue*. Paris : ZE YI WU. "Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées etThèse de Doctorat, de l'école nationale des ponts et chaussées .
39. Youcef, D. (2004). *Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites*. Université de Biskra .