

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

# Mémoire de Fin D'études



En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : STRUCTURES

Réalisé par : ARHAB Mohamed

Thème :

---

**Etude numérique du renforcement,  
en flexion, de poutres en béton**

---

Encadré par : Mme ALI AHMED C.

Année Universitaire :  
2018/2019



# REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu de m'avoir donné la patience, de la chance et surtout des capacités intellectuelles qui m'ont aidé à surmonter bien des épreuves.

Mes remerciements envers ma promotrice Mme ALI AHMED, qui a su m'aider à réaliser mon souhait d'un travail de recherche à but environnemental, m'orienter et faire en sorte qu'il soit bien élaboré. Je la remercie d'avoir fait preuve de patience malgré les divers obstacles que nous avons rencontrés, et ce même lorsque la situation semblait insurmontable.

Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner ce mémoire de recherche, leurs remarques et leurs expériences me seront d'une grande utilité.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers les personnes qui m'ont aidé, à commencer par le personnel du laboratoire de matériaux de l'UMMTO, en particulier Mr BOUHRAOUA pour sa bonté, son sérieux, ses conseils et son aide. Merci au Dr NEKMOUCHE aussi pour son aide qui m'a éclairé sur un certain nombre de choses.

Mes remerciements s'adressent également aux amis qui se sont proposés d'eux même en particulier Dyhia et Yazid, je n'oublierai pas votre générosité.

Merci aux membres de ma famille qui ont été là tout au long de mon parcours, et ont su être patients malgré qu'il soit, parfois, difficile de le l'être.

Enfin, je tiens à remercier, les ACR et compagnie, les Akkouche, les membres de l'association Pharmavenir, Moly, l'équipe WikiStage Tizi-Ouzou, Debate Club et tous ceux qui le méritent, merci d'exister tout simplement.

# *Dédicace*

*A mon cher neveu  
Mehdi qui vient de  
naître.*

## RESUME

Le béton, un matériau phare du génie civil, est efficace en compression mais faible en traction. Depuis sa découverte, d'innombrables recherches et techniques ayant pour but d'améliorer ses performances ont été élaborées, afin qu'il puisse être en accord avec les exigences de la construction. L'une des techniques la plus utilisée demeure son renforcement avec des Polymères Renforcés de Fibres (PRF). Cette étude se porte sur les avantages d'utiliser la fibre de jute qui est une fibre végétale, légère, économique et surtout non polluante, en remplacement de la fibre de verre dans les PRF de renforcement interne, en flexion, de poutres en béton. Les analyses numériques conduites sous ABAQUS, ont permis de simuler le comportement de poutres renforcées de PRF. Cette configuration permet au tissu du PRF de développer sa résistance, sans qu'il n'y ait décollement de celui-ci.

Les résultats de cette recherche ont abouti à la possibilité de substituer la fibre de jute à la fibre de verre, pour peu que l'on augmente les caractéristiques géométriques du PRF à base de cette fibre naturelle. Elle procure à la poutre une amélioration en termes de résistance mécanique et de déformabilité. De plus, sa légèreté, ses avantages économique et environnemental font d'elle une excellente solution de remplacement aux matériaux coûteux et polluants.

**Mots clés :** poutre renforcée, béton, PRF, modélisation numérique, abaqus, fibre de jute.

## **ABSTRACT**

Concrete, a key material in civil engineering, is effective in compression but low in traction. Since its discovery, countless research and techniques aimed at improving its performance have been developed, so that it can be in accordance with the requirements of construction. One of the most used techniques is its reinforcement with Fiber Reinforced Polymers (FRP). This study focuses on the advantages of using jute fiber which is a vegetable fiber, lightweight, economical and especially non-polluting, replacing glass fiber in FRP internal reinforcement of concrete beams. The numerical analyzes carried out under ABAQUS, allowed to simulate the behavior of reinforced beams with FRP. This configuration allows the fabric of the FRP to develop its resistance, without detachment of this one.

The results of this research have led to the possibility of substituting jute fibre for fibreglass, as long as we increase the geometric characteristics of FRP based on this natural fiber. It gives the beam an improvement in terms of mechanical strength and deformability. In addition, its lightness, economic and environmental benefits make it an excellent alternative to expensive and polluting materials.

**Key words:** reinforced beam, concrete, FRP, numerical modelling, abaqus, jute fiber.

# Sommaire

Remercîments.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé .....	iii
Abstract .....	iv
Sommaire .....	v
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xiii

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre I : Synthèse bibliographique**

<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Les différentes techniques de renforcement des poutres .....</b>	<b>4</b>
I.1.1. Le traitement des fissures.....	4
I.1.2. Le béton Précontraint .....	5
I.1.3. Le béton des fibres .....	5
I.1.4. Les TRC (Textile Reinforced Concrete) .....	6
I.1.5 Le confinement du béton armé avec PRF .....	7
I.1.6. Les matériaux composites en général.....	7
I.1.6.1. Propriétés mécaniques des matériaux composites.....	8
I.1.6.2. Les matrices .....	9
I.1.6.3. Les adhésif.....	9
<b>I.2. Les fibres.....</b>	<b>9</b>

I.2.1. Les fibres de jute .....	10
I.2.2. Les fibres de verre .....	10
<b>I.3. Renforcement avec des matériaux composites.....</b>	<b>11</b>
I.3.1. Le système avec une cure in- situ.....	11
I.3.2.Le système préfabriqué .....	11
<b>I.4. Influence de l'environnement sur le comportement des composites ....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.Comportements des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites sous chargement statique.....</b>	<b>12</b>
<b>I.6. Mécanismes de rupture des poutres renforcées par composites .....</b>	<b>14</b>
<b>I.7. Les facteurs ayant influence sur le comportement des structures renforcées .....</b>	<b>16</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>17</b>

## **Chapitre II : Généralités sur ABAQUS et simulation numérique**

<b>Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>II.1. Généralité sur le code de calcul ABAQUS.....</b>	<b>20</b>
II.1.1. ABAQUS/Standard.....	20
II.1.2. ABAQUS/Explicit.....	20
II.1.3. ABAQUS/CAE.....	20
<b>II.2. Les différents fichiers pour la simulation sous Abaqus.....</b>	<b>21</b>
II.2.1. Fichier d'entrée (Input file) .....	21
II.2.2. Fichier de résultats (output file) .....	21
<b>II.3. Autres fichiers créés par Abaqus lors de la simulation.....</b>	<b>22</b>

<b>II.4. Organisation de l'interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement) .....</b>	<b>22</b>
<b>II.5. Les modules et les étapes de modélisation.....</b>	<b>23</b>
II.5.1. Module part.....	23
II.5.2. Module Property.....	26
II.5.3. Module Assembly.....	28
II.5.4. Module Step.....	28
II.5.5. Module Interaction.....	29
II.5.6. Module Load.....	30
II.5.7. Module Mesh.....	31
II.5.8. Module JoB.....	32
II.5.9. Module visualization .....	32
<b>II.6. L'arbre du modèle.....</b>	<b>33</b>
<b>II.7. Présentation des modèles.....</b>	<b>33</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>36</b>

## **Chapitre III : Résultats et discussion**

<b>Introduction.....</b>	<b>38</b>
<b>III.1. Les modèles standards.....</b>	<b>38</b>
III.1.1. Modèle numérique de référence (témoin) .....	38
III.1.2. Modèle renforcé avec une plaque de PRF.....	40
III.1.3. Modèle renforcé avec une plaque de PRFJ.....	41

III.1.4. Confrontation des résultats.....	42
<b>III.2. Effet de l'épaisseur du PRFJ .....</b>	<b>43</b>
III.2.1. Modèle avec une plaque de PRFJ .....	43
III.2.2. Modèle avec deux plaques de PRFJ .....	44
III.2.3. Modèle avec trois plaques de PRFJ .....	45
III.2.4. Modèle avec quatre plaques de PRFJ .....	46
III.2.5. Confrontation des résultats.....	47
<b>III.3. Effet de la longueur du PRFJ .....</b>	<b>49</b>
III.3.1. Modèle renforcé de longueur 115 cm .....	49
III.3.2. Modèle renforcé de longueur 100 cm .....	50
III.3.3. Modèle renforcé de longueur 70 cm .....	50
III.3.4. Modèle renforcé de longueur 40 cm .....	51
III.3.5. Confrontation des résultats.....	52
<b>III.4. Effet de l'interaction des deux paramètres .....</b>	<b>54</b>
<b>III.5. Evolution des dommages.....</b>	<b>56</b>
<b>III.6. Evolution des déplacements .....</b>	<b>58</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>59</b>
<b>Conclusion Générale et perspectives .....</b>	<b>61</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>65</b>

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Traitement des fissures .....	5
<b>Figure I.2</b> : Béton précontraint.....	5
<b>Figure. I.3</b> : Béton de fibres à l'état frais et à l'état durci .....	6
<b>Figure I.4</b> : Différentes techniques de mise en œuvre des TRC.....	6
<b>Figure I.5</b> : Différentes formes des matériaux composites.....	10
<b>Figure I.6</b> : Fibre de jute.....	10
<b>Figure I.7</b> : Fibres de verre.....	11
<b>Figure I.8</b> : Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celles non renforcées (étude présente) .....	13
<b>Figure I.9</b> : Comparaison de comportement entre différents matériaux .....	13
<b>Figure I.10</b> : Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composites .....	14
<b>Figure I.11</b> : Les différentes configurations des PRF .....	16
<b>Figure I.12</b> : Renforcement interne en flexion par PRF. ....	17

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Structure d'une analyse sous Abaqus .....	21
<b>Figure II.2</b> : Organisation d'abaqus .....	22
<b>Figure II.3</b> : Réalisation de la mise en données d'un problème .....	23
<b>Figure II.4</b> : Élément poutre.....	24
<b>Figure II.5</b> : Élément poutre.....	25
<b>Figure II.6</b> : Les éléments en acier .....	25
<b>Figure II.7</b> : Élément composite.....	26
<b>Figure II.8</b> : Création des matériaux. ....	26
<b>Figure II.9</b> : Schéma de ferrailage. ....	28
<b>Figure II.10</b> : Résultat de l'assemblage sur abaqus .....	28
<b>Figure II.11</b> : Création de step .....	29
<b>Figure II.12</b> : Définition des interactions.....	29
<b>Figure II.13</b> : Interactions de corps rigides .....	30
<b>Figure II.14</b> : Création des chargements.....	30
<b>Figure II.15</b> : Quelques éléments dans Abaqus.....	31
<b>Figure II.16</b> : Création du maillage .....	31

<b>Figure II.17</b> : Lancement de calcul .....	32
<b>Figure II.18</b> : Affichage des résultats.....	32
<b>Figure II.19</b> : Modèle de référence .....	33
<b>Figure II.20</b> : Poutres renforcées avec une plaque PRF.....	34
<b>Figure II.21</b> : Différentes longueurs PRF testées.....	35

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Etat des contraintes dans les aciers du témoin. ....	39
<b>Figure III.2</b> : Mode de rupture du témoin.....	39
<b>Figure III.3</b> : Courbe Force-Déplacement du témoin. ....	39
<b>Figure III.4</b> : Etat de contrainte du modèle renforcé avec PRFV. ....	40
<b>Figure III.5</b> : Mode de rupture du modèle renforcé avec PRFV.....	40
<b>Figure III.6</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec PRFV. ....	41
<b>Figure III.7</b> : Etat de contrainte du modèle renforcé avec PRFJ. ....	41
<b>Figure III.8</b> : Mode de rupture du modèle renforcé avec PRFJ.....	42
<b>Figure III.9</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec PRFJ.....	42
<b>Figure III.10</b> : Confrontation des résultats des modèles standards. ....	43
<b>Figure III.11</b> : Etat de contrainte du modèle 2PRFJ. ....	44
<b>Figure III.12</b> : Mode de rupture du modèle 2PRFJ.....	44
<b>Figure III.13</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle 2PRFJ. ....	44
<b>Figure III.14</b> : Etat de contrainte du modèle 3PRFJ.. ....	45
<b>Figure III.15</b> : Mode de rupture du modèle 3PRFJ.....	45
<b>Figure III.16</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle 3PRFJ.. ....	45
<b>Figure III.17</b> : Etat de contrainte du modèle 4PRFJ.. ....	46
<b>Figure III.18</b> : Mode de rupture du modèle 4PRFJ.....	46
<b>Figure III.19</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle 4PRFJ.. ....	46
<b>Figure III.20</b> : Confrontation des résultats pour la variable épaisseur du PRFJ... ..	47
<b>Figure III.21</b> : Confrontation des résultats du PRFJ et ceux du PRFV pour la variable épaisseur... ..	48
<b>Figure III.22</b> : Etat de contrainte du modèle PRFJ de 115 cm.....	49
<b>Figure III.23</b> : Mode de rupture du modèle PRFJ de 115 cm.. ....	49
<b>Figure III.24</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle PRFJ de 115 cm.....	50
<b>Figure III.25</b> : Etat de contrainte du modèle PRFJ de 70 cm.....	50
<b>Figure III.26</b> : Mode de rupture du modèle PRFJ de 70 cm.. ....	51
<b>Figure III.27</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle PRFJ de 70 cm.....	51
<b>Figure III.28</b> : Etat de contrainte du modèle PRFJ de 40 cm.....	51

<b>Figure III.29</b> : Mode de rupture du modèle PRFJ de 40 cm. ....	52
<b>Figure III.30</b> : Courbe Force-Déplacement du modèle PRFJ de 40 cm.....	52
<b>Figure III.31</b> : Confrontation des résultats pour la variable longueur du PRFJ.....	53
<b>Figure III.32</b> : Confrontation des résultats du PRFV et ceux du PRFJ pour la variable longueur 115 cm.....	54
<b>Figure III.33</b> : Etat de contrainte du modèle optimal renforcé par un PRFJ.....	55
<b>Figure III.34</b> : Mode de rupture du modèle optimal renforcé par un PRFJ.. ....	55
<b>Figure III.35</b> : Confrontation des résultats de la poutre renforcée optimale et ceux de la poutre renforcée avec PRFV.....	55
<b>Figure III.36</b> : Evolution des dommages .....	57
<b>Figure III.37</b> : Evolution des déplacements globaux.. ....	58

## Liste des tableaux

### Chapitre I

<b>Tableau I.1</b> : propriétés mécaniques des matériaux composites .....	8
---	---

### Chapitre II

<b>Tableau II.1</b> : Tableau des unités pour ABAQUS .....	23
<b>Tableau II.2</b> : Propriétés mécaniques du béton .....	5
<b>Tableau II.3</b> : Propriétés mécaniques de l'acier .....	5
<b>Tableau II.4</b> : Propriétés mécaniques des composites .....	5

### Chapitre III

<b>Tableau III.1</b> : Résultats des modèles numériques .....	5
<b>Tableau III.2</b> : Résistances selon l'épaisseur du PRF .....	5
<b>Tableau III.3</b> : Résistance selon la longueur du PRF .....	5
<b>Tableau III.4</b> : Résultats de la combinaison de l'épaisseur et de la longueur du PRFJ .....	5
<b>Tableau III.5</b> : Forces maximales et leurs déplacements respectifs .....	5

---

# **Introduction générale**

---

### Introduction générale

Le béton armé est le matériau qui domine dans le domaine de la construction, ce qui fait que l'homme cherche toujours de nouvelles techniques d'amélioration afin de l'exploiter au mieux. Cependant, pour la plupart d'entre elles, il s'avère qu'elles sont coûteuses et polluantes.

De nos jours, il est de plus en plus fréquent d'utiliser des matériaux performants mais polluants pour l'environnement, comme les fibres synthétiques. Ces fibres sont largement utilisées dans le domaine de la construction, notamment dans la réhabilitation d'éléments en béton soit en les renforçant ou en les réparant.

Beaucoup de structures en béton sont réhabilitées de nos jours, ce qui leur assure une durée de vie plus longue, grâce à l'utilisation de matériaux composites sous forme, le plus souvent, de Polymères Renforcés de Fibres (PRF). De nombreuses études ont été menées pour étudier les comportements et estimer les capacités des colonnes entièrement enveloppées avec des polymères renforcés de fibres «FRP » [1-2-3-4-5]. Ce procédé a montré son efficacité via les nombreux travaux publiés et il est même mis en application dans différents pays, malgré certains inconvénients. En effet, comme les PRF sont généralement collés en surface du support béton [4-6]. Ils ont tendance à se décoller sous l'effet d'une grande sollicitation, comme ils se détériorent sous l'effet des hautes températures ou de l'humidité.

D'après les études antérieures, le mode de rupture le plus répandu est le décollement du renfort au niveau de l'interface béton-composite. Le mode de rupture habituel est le décollement d'interface entre la résine et le béton ou entre la résine et le PRF [7].

Le PRF, dans ce cas, subit une perte allant jusqu'à 75% de ses capacités à cause du décollement et présente un mode de rupture brutal [8].

Ceci nous a amené à envisager un renforcement interne avec PRF, afin de pallier ces problèmes.

L'objectif de notre travail est double, puisqu'il s'agit, d'une part, de tester l'effet d'un renforcement interne, en flexion, de poutres en béton avec un PRF et d'autre part, étudier la possibilité du remplacement de la fibre de verre par une fibre naturelle (jute) dans le souci d'apporter une contribution à la protection de notre environnement.

La fibre de jute provient d'une plante, elle présente plusieurs avantages, dont on peut citer, la disponibilité, la facilité de fabrication et de mise en œuvre, elle est en plus légère, flexible, résistante, économique et « amie » de l'environnement.

Cette fibre végétale est vraiment intéressante mais moins performante que les synthétiques. Donc, si l'on veut la substituer à la fibre synthétique, il faudra jouer sur la quantité. Il s'agit, dans cette recherche, de trouver la quantité de fibres de jute qu'il faut introduire pour espérer obtenir des résultats au moins similaires à ceux obtenus avec la fibre de verre lors du renforcement interne de poutres en béton.

Nous nous sommes, donc, interrogés sur la possibilité d'un renforcement interne avec PRF de poutres en béton ainsi que la possibilité de remplacer le PRF à base de fibres de verre par un PRF à base de fibres de jute, en jouant sur ses caractéristiques géométriques.

Cette recherche vise à répondre à toutes ces questions, et ce en menant une étude comparative via un outil numérique entre les tissus de verre et celui de jute. Ce travail de recherche est réparti en trois chapitres :

- Le premier est une synthèse bibliographique rassemblant quelques informations sur les techniques de renforcement de poutres en béton notamment en flexion, puis l'accent est mis sur l'utilisation, en la construction, des polymères renforcés de fibre (PRF);
- Le deuxième fait l'objet d'une introduction au logiciel de modélisation numérique ABAQUS ainsi que des étapes suivies pour la modélisation des poutres renforcées avec PRF. Les différentes variantes de renforcement testées y sont bien détaillées;
- Le troisième et dernier chapitre quant à lui, comporte les résultats des expériences simulées ainsi que leur discussion. Deux paramètres ont été considérés pour définir ces variantes, il s'agit du type de PRF ainsi que des grandeurs géométriques du PRF à base de fibres de jute, en l'occurrence l'épaisseur et la longueur.

Une fois les recherches terminées et les résultats discutés, une conclusion générale s'impose. Elle comporte un rappel de notre démarche, les apports de cette recherche, ainsi que des perspectives à de futures recherches.

---

**Chapitre I :**  
**Synthèse bibliographique**

---

## Chapitre I : Synthèse bibliographique

### Introduction

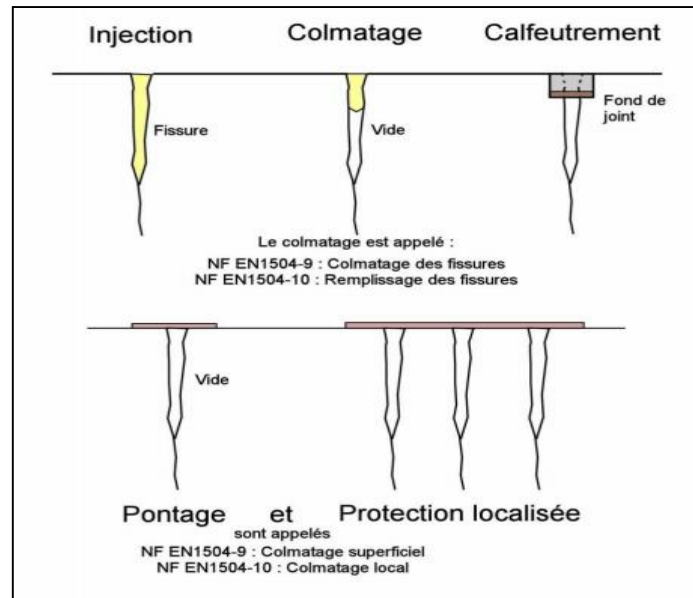
La flexion demeure à ce jour l'un des problèmes les plus redoutés dans le domaine de la construction et principalement pour les structures en béton. Etant donnée la faible résistance en traction de ce dernier, des solutions sont constamment recherchées afin de remédier à ce problème. En génie civil, la combinaison de plusieurs matériaux peut s'avérer un moyen fiable pour compenser cette déficience en traction comme c'est le cas dans le béton de fibres ou autre précontraint. L'utilisation des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) connaît également un grand essor dans ce domaine, puisqu'ils sont largement utilisés dans le renforcement externe des poutres en béton. Cependant, ce procédé présente un inconvénient majeur qui est le décollement du PRF.

Cette recherche bibliographique débutera par une synthèse sur les renforcements des poutres les plus utilisés notamment en flexion et mettra l'accent sur les bétons renforcés de PRF, mais aussi sur l'utilisation des fibres végétales et rappeler que leur apport n'est pas à exclure vu leur aspect économique et environnemental mais aussi pour leur grande légèreté et déformabilité. Elles peuvent, en effet, être une alternative intéressante à l'utilisation de la fibre synthétique. Pour finir, une nouvelle configuration de renforcement interne avec des PRF est présentée.

### I.1. Les différentes techniques de renforcement des poutres

#### I.1.1. Le traitement des fissures

Cette méthode peut nous servir en quelque sorte à « Reconstituer le monolithisme » du béton et « bloquer » le souffle de la fissure. Cependant, un simple traitement des fissures n'assure pas un complet renforcement structural. Des méthodes de renforcement complémentaires sont à prévoir telles qu'une précontrainte additionnelle [9].

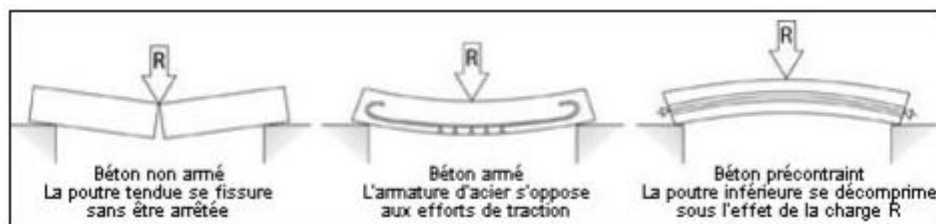


**Figure I.1 :** Traitement des fissures [9]

### I.1.2. Le béton précontraint

C'est un matériau de construction composite dans lequel ont été préalablement introduites des tensions opposées à celles qu'il devra subir une fois mis en œuvre.

Cette technique vise à améliorer la résistance du béton face à diverses sollicitations, lorsqu'il sera notamment soumis à des charges et des tractions dangereuses pour son intégrité, comme la charge d'exploitation ou la charge climatique [10].



**Figure I.2 :** Béton précontraint.

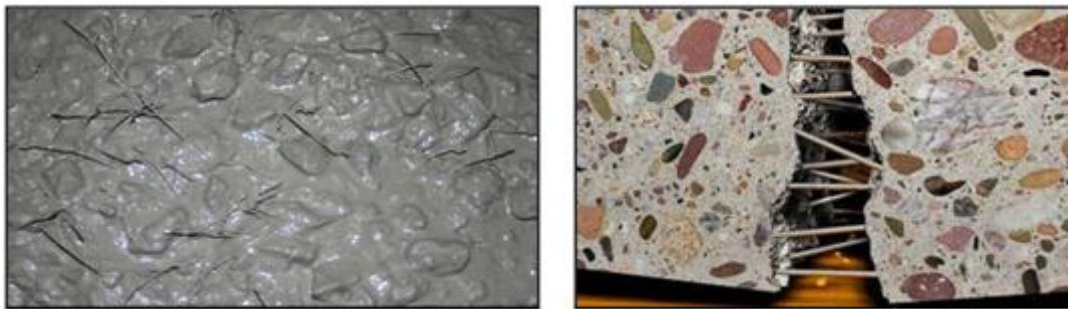
### I.1.3. Les bétons de fibres

Le béton de fibres est un béton dans lequel sont incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. Comme pour le béton armé, les fibres renforcent le béton. Il permet une plus grande rapidité et une plus grande facilité de mise en œuvre et une limitation de la fissuration grâce au grand nombre de fibres dispersées dans le béton. Pour réduire le coût et assurer un comportement relativement plus

ductile pour des éléments en béton armé renforcé, l'addition des fibres pourrait être considérée comme solution de rechange. De façon générale, ces bétons présentent : Une meilleure résistance à la traction ; Une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure, abrasion...) ; Une bonne maîtrise de la fissuration et une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, bi-ondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction) [11].

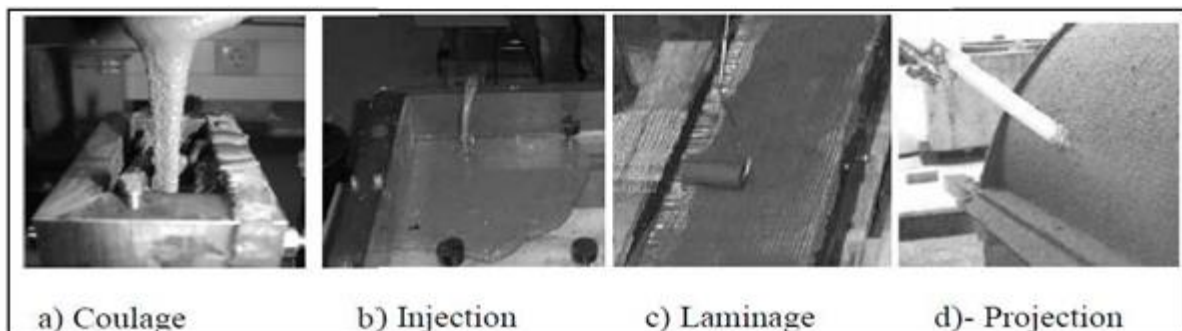
La **figure (I.3)** illustre un béton de fibre à l'état frais et à l'état durci respectivement.



**Figure I.3** : Béton de fibres à l'état frais et à l'état durci [11].

#### I.1.4. Les TRC (Textile Reinforced Concrete)

Le béton textile est un micro-béton renforcé de nappes textiles constituées de fils multifilamentaires. Ce nouveau composite permet de nouvelles applications, car il est utilisable en faible épaisseur, ce qui permet d'obtenir des éléments de poids réduit, résistant à la traction et fortement ductile (Jesse et al [12]).



**Figure I.4** : Différentes techniques de mise en œuvre des TRC.

### **I.1.5. Le confinement du béton armé avec PRF**

La majorité des techniques ont été développées pour renforcer des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites «**PRF (polymère renforcé de fibres)**» afin d'améliorer les performances (capacité portante, ductilité, etc.) du matériau béton et son comportement mécanique en compression. Toutefois, l'utilisation des PRF pour le renforcement de la partie tendue des poutres est une technique largement utilisée qui vise l'amélioration du comportement du béton.

Toutes ces techniques sont basées sur le principe de mobilisation de la pression latérale de confinement exercée sur le support béton. Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit des fissures qui augmentent avec l'accroissement de la charge. Elle conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton [13].

**Les polymères** quant à eux, constituent une classe de matériaux. D'un point de vue chimique, un polymère est une macromolécule. Les polymères les plus connus sont : les fibres, les matières plastiques, les caoutchoucs naturels (latex) et artificiels, les colles, les peintures, les résines...

### **I.1.6. Les matériaux composites en général**

Depuis une dizaine d'année, l'utilisation des matériaux composites a connu un essor important que ce soit dans l'industrie mécanique, l'aéronautique ou encore la construction civile. Ces matériaux sont susceptibles de substituer l'acier, au vu des avantages qu'ils présentent comme la résistance, la légèreté et l'insensibilité à la corrosion. Les matériaux composites à base de fibres sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement et de réhabilitation des constructions en béton armé. De plus, malgré leurs prix élevés, ils présentent un avantage économique, car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact ou par stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement le poids propre des structures et leurs coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions de trafic [11].

Les matériaux composites PRF, sont composés de fibres noyées dans une matrice. Dans le domaine du génie civil, les composites unidirectionnels sont les plus courants. Une fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ .

La fibre a un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture : les lois de comportement des fibres sont donc de type "élastique fragile". Principalement, trois types de fibres sont utilisés dans la construction: les fibres d'aramide, les fibres de verre et les fibres de carbone. Dans cette recherche, nous nous intéressons aux matériaux composites à base de fibres de jute. Le comportement mécanique des matériaux composites dépend de plusieurs facteurs : le type de fibres, la fraction volumique des fibres et le type de matrice.

### I.1.6.1. Propriétés mécaniques des matériaux composites

Dans les matériaux composites, les fibres reprennent principalement des efforts dans la direction des fibres. La matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège. Selon un bulletin de la Fédération Internationale de Béton (FIB bulletin 14, 2001), les propriétés mécaniques des matériaux composites peuvent être estimées ci-dessous :

$$E_f = E_{fib} V_{fib} + E_m V_m \quad (I-1)$$

$$f_f \approx f_{fib} V_{fib} + f_m V_m \quad (I-2)$$

où  $E_f$  est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres,  $E_{fib}$  le module d'Young des fibres,  $E_m$  le module d'Young de la matrice,  $V_{fib}$  la fraction volumique des fibres,  $V_m$  la fraction volumique de la matrice,  $f_f$  la résistance en traction du matériau composite,  $f_{fib}$  la résistance en traction des fibres,  $f_m$  la résistance en traction de la matrice, avec  $V_m + V_{fib} = 1$ .

La fraction volumique  $V_{fib}$  typique est de l'ordre de 0,6 – 0,65. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice, le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique). Le tableau suivant donne les propriétés mécaniques de quelques matériaux composites :

**Tableau I.1 :** Propriétés mécaniques des matériaux composites [14].

Matériau composite	Module d'Young (MPa)	Coefficient de poisson	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
Fibre de carbone/époxy	70000	0,32	1,4
Fibre de verre/époxy	45160	0,31	2,6
Fibre de jute/époxy	23000	0,2	1,3

### **I.1.6.2. Les matrices**

Les matrices les plus utilisées dans les composites sont les résines thermodurcissables (thermosetting), par exemple, le polyester, le vinylester, l'époxy et le phénolique. Les matrices sont des matériaux isotropes. L'utilisation des matrices dans les composites permet de coller des fibres entre elles et de transférer des efforts aux fibres. De plus, la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants, aux forces transversales et aux forces de compression. Par ailleurs, la matrice protège les fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques. L'une des propriétés essentielles des polymères est la température à partir de laquelle il y a un changement d'état. Les propriétés mécaniques diminuent à l'approche de ce seuil de température: température de transition vitreuse;

### **I.1.6.3. Adhésif**

Un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface. Dans notre cas, c'est la même résine qui est employée. L'objectif de l'adhésif est de transmettre des contraintes entre le béton et le composite [14].

## **I.2. Les fibres**

Une fibre est un ensemble de filaments élémentaires dont le diamètre varie entre 5 et 25  $\mu\text{m}$  selon la nature de la fibre. Il y a principalement trois types de fibres appliqués dans le secteur du bâtiment : les fibres Aramides, les fibres de verre et les fibres de carbone. Les fibres supportent la majorité des contraintes mécaniques et assurent la résistance et la rigidité du composite. Elles travaillent essentiellement en traction et se trouvent sous forme de mèches, de tissus ou de mats. Les fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : Linéiques (fils, mèches), Tissus surfaciques (tissus, mats), et Tissus tridimensionnels (3D) (Voir **Figure I.5**).

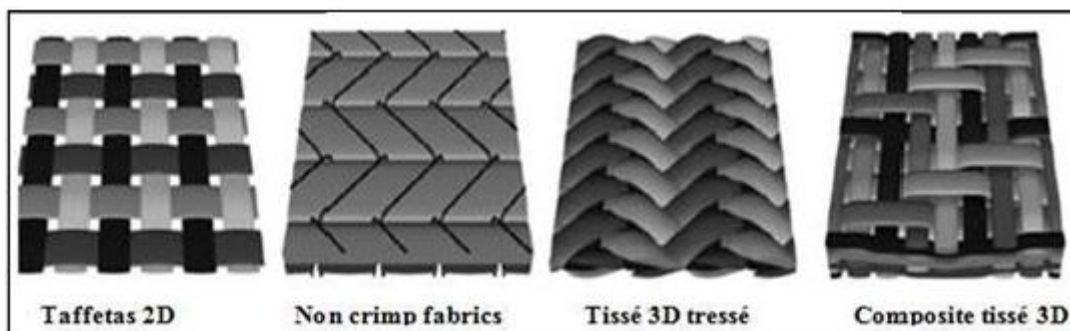


Figure I.5 : Différents formes des matériaux composites [16].

### I.2.1. Les fibres de jute

Le jute est une plante des régions tropicales appartenant à la famille liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6m avec un diamètre d'environ 3 m. Le jute pousse essentiellement au Bangladesh qui détient un quasi-monopole de son commerce. Il en existe deux sortes (une blanche et une rouge), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre est très courte et très lignifiée. L'extraction de la fibre technique est obtenue par rouissage et décorticage. Après le rouissage, on détache la fibre, on nettoie la filasse et on rince à l'eau 3 m [17].

En Algérie, il est possible de se procurer cette fibre chez des grossistes en café, en effet, les sacs qui contiennent les grains de café sont faits uniquement de jute et feront parfaitement l'affaire pour les tissus surfaciques.

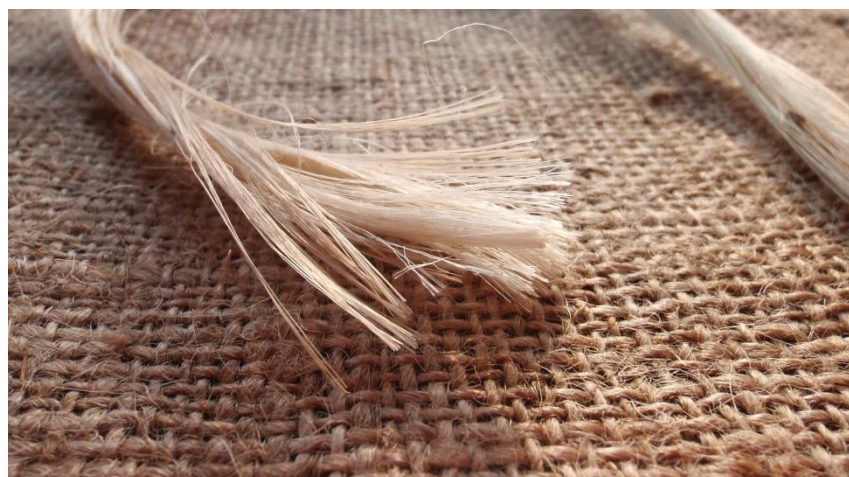


Figure I.6 : Fibre de jute.

### I.2.2. Les fibres de verre

L'expression fibre de verre peut désigner d'une part un filament de verre extrêmement fin et d'autre part un matériau composite renforcé à l'aide de cette fibre. Dans les matériaux

composites, les fibres de verre sont généralement associées à des polymères. Les fibres de verre permettent de réduire le poids des matériaux, tout en améliorant leurs performances. Elles sont notamment appréciées pour leurs propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation.

Dans le domaine de la construction, ce procédé de renforcement permet un allègement des structures d'environ 30% par rapport à l'acier.

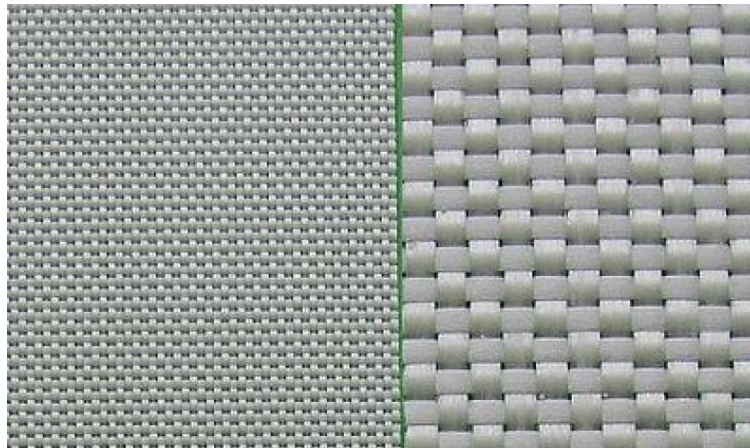


Figure I.7 : Fibres de verre.

### I.3. Renforcement avec des matériaux composites

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite : le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué.

#### I.3.1. Le système avec une cure in-situ

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un composite sur des surfaces de béton :

- le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture;
- le tissu peut être pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton.

#### I.3.2. Le système préfabriqué (cas des pulltrudés)

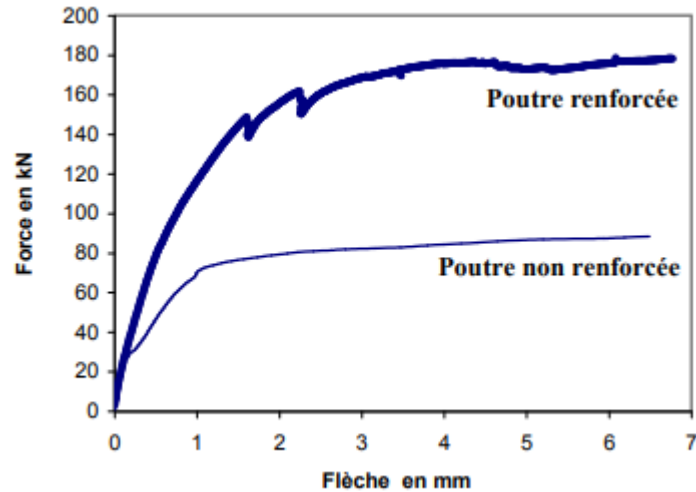
Ce processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif.

#### **I.4. Influence de l'environnement sur le comportement des composites**

Vis-à-vis de la température, les performances des matériaux composites sont principalement conditionnées par l'adhésif. En revanche, pour une température basse, les performances sont conditionnées par la matrice. Le point le plus important concernant la température est la température de transition vitreuse  $T_g$ . La résine de la matrice absorbe l'eau. La quantité d'eau absorbée dépend du type de résine et de la température de l'eau. Les deux conséquences immédiates en sont la réduction de la température de transition vitreuse et l'adoucissement de la résine. Les ultraviolets peuvent produire une réduction de la transmissibilité des rayons lumineux : la couleur du composite peut changer mais Les caractéristiques mécaniques sont très légèrement influencées par les rayons. La corrosion pourrait se manifester lorsque le composite est soumis à un certain niveau de contrainte : c'est la corrosion sous contrainte. Ce phénomène est dépendant du temps, du niveau de contrainte, du type de matrice et de fibres.

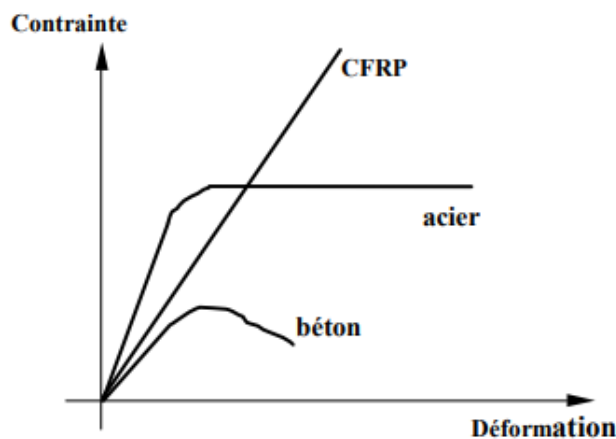
#### **I.5. Comportements des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites sous chargement statique**

L'utilisation d'un tissu de matériaux composites (PRF) associé à des colles époxy sur des surfaces tendues ou sur des surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer les poutres en béton armé, plus particulièrement, pour les poutres faiblement armées. Le collage du tissu sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures, il augmente également leur raideur (**Figure I.8**) limitant ainsi la propagation des fissures [14]. Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des armatures et d'améliorer la durabilité des structures. Une des applications les plus courantes des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé concerne les structures soumises aux sollicitations de flexion ou celles d'effort tranchant.



**Figure I.8 :** Comparaison de comportement entre les poutres renforcées et celles non renforcées (étude présente) [14].

Le matériau composite est un matériau élastique dont le comportement diffère de celui du béton et de celui des aciers (**Figure I.9**). L'adhésion des tissus de FRP sur des surfaces de structures en béton armé provoque donc une modification des comportements structuraux comparativement à ceux des structures en béton armé non renforcées: par exemple, la relation entre la force et la flèche ou le mode de rupture.



**Figure I.9 :** Comparaison de comportement entre différents matériaux [14].

## I.6. Mécanismes de rupture des poutres renforcées par composites

Dans le cas de poutres renforcées sous sollicitation de flexion, quatre modes de rupture sont souvent constatés dans les études expérimentales : la rupture due à la flexion, celle due à l'effort tranchant, celle due au décollement du tissu et celle due à la rupture de l'enrobage du béton (**Figure I.10**). Parmi celles-ci, le décollement du tissu et la rupture de l'enrobage du béton sont prématurés et souvent brutaux.



**Figure I.10** : Modes de rupture des poutres renforcées de matériaux composites [14].

La rupture en flexion des poutres renforcées est provoquée soit par la ruine du béton comprimé, soit par l'importante plastification des armatures tendues, soit par la ruine du tissu de FRP en traction. Le premier cas cité se produit brutalement lorsque les poutres sont fortement armées. Elles sont renforcées soit par trop d'armatures, soit par trop de tissu FRP. En revanche, les deuxième et troisième cas concernent des poutres faiblement ou moyennement armées. Lors du dimensionnement des éléments, c'est la rupture par plastification des armatures qui est visée [14].

Par ailleurs, les études expérimentales d'Arduini (Arduini et Nanni, 1997) indiquent que les comportements statiques des poutres fissurées puis renforcées ne présentent pas de différences notables comparativement avec celui des poutres non renforcées.

La rupture de poutres renforcées due à l'effort tranchant se produit lorsque la résistance à l'effort tranchant des poutres sans renforcement est insuffisante. Les fissures apparaissent d'abord à partir des extrémités du tissu longitudinal et sont inclinées vers le centre des sections droites de la poutre. Ce phénomène est dû à la concentration de contrainte provenant de la non continuité du tissu [15].

La rupture due à la rupture de l'enrobage de béton ou délaminage du tissu composite provient de la concentration de contrainte de cisaillement dans la couche de la colle (la couche du béton de l'enrobage). La résistance à la contrainte de cisaillement de la colle est plus élevée que celle du béton, le décollement de tissu se produit donc toujours entre le béton et la colle. Pour cette raison, sur le tissu décollé, il y a toujours des petits morceaux de béton [15].

Deux modes de rupture du décollement du tissu ont été observés : soit un décollement qui débute aux extrémités du tissu, puis se propage vers le centre de la poutre; soit un décollement qui se produit localement sur les zones où le moment fléchissant est le plus important. Ce décollement du tissu se propage éventuellement vers les extrémités du tissu. Le premier mode de rupture provient de la concentration de contraintes à l'extrémité du tissu. La deuxième forme de rupture provient de l'importante déformation du tissu provoquée par la propagation de fissures dues à la combinaison des efforts tranchants et du moment fléchissant [14].

Le décollement aux extrémités du tissu se produit habituellement lorsque trois conditions sont remplies :

- (1) Une faible portée de l'effort tranchant, ce qui produit un cisaillement important et un décollement entre le tissu et la poutre, situé proche des appuis;
- (2) Les extrémités du tissu sont éloignées des appuis;
- (3) L'application de tissu raide empêchant la flèche et produisant une contrainte de cisaillement élevée près des extrémités du tissu.

Buyukozturk (Buyukozturk et al., 1998) indique également que le décollement du tissu à partir des extrémités du tissu se produit souvent sur des poutres ayant une faible résistance à l'effort tranchant. En revanche, le décollement à mi-portée se produit sous les conditions suivantes :

- (1) une portée importante de l'effort tranchant, un moment de flexion élevé qui se produit proche de la mi-portée;
- (2) les extrémités du tissu sont très proches des appuis;
- (3) l'application de tissu mince [14].

## I.7. Les facteurs ayant une influence sur le comportement des structures renforcées par matériaux composites

Les poutres en béton armé renforcées par matériaux composites sont constituées de quatre matériaux : le béton, les armatures, la colle et le tissu. Le béton a un comportement différent en traction et en compression. Le comportement des armatures est élasto-plastique. La colle transfère des contraintes de cisaillement entre le béton et le composite. La modification du comportement ou la modification de la quantité de chacun de ces quatre matériaux, comme la résistance du béton, le taux de renforcement des armatures tendues, les différents types de tissu, l'épaisseur de la colle ou celle du tissu, va affecter la réponse des structures renforcées. En outre, des paramètres géométriques, comme la proportion de la distance entre la charge et l'appui par rapport à la hauteur de poutre ou la longueur du tissu, affectent également le comportement des structures renforcées [14].

Grâce à l'outil informatique, il est possible de garder ces paramètres constants et de seulement faire varier la configuration ou la quantité du renforcement en PRF, ainsi nous obtiendrons avec précision l'effet de chaque configuration. Il existe toutefois diverses configurations possibles de renforcement en PRF (**figure I.11**).

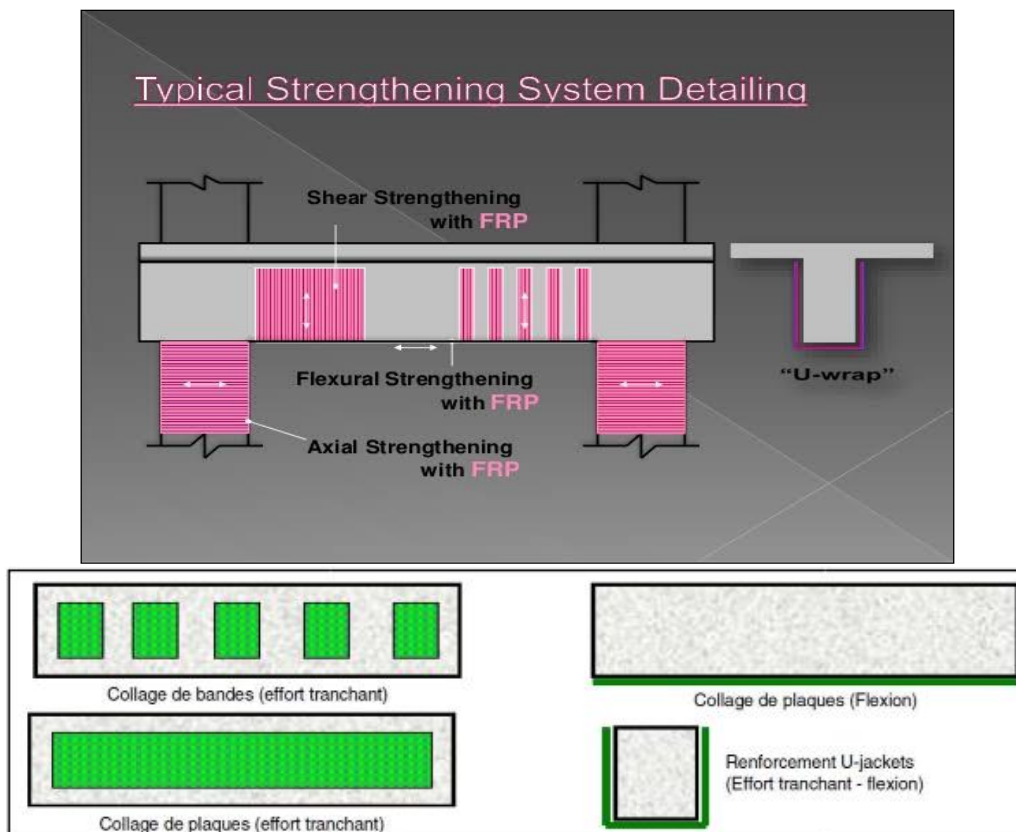
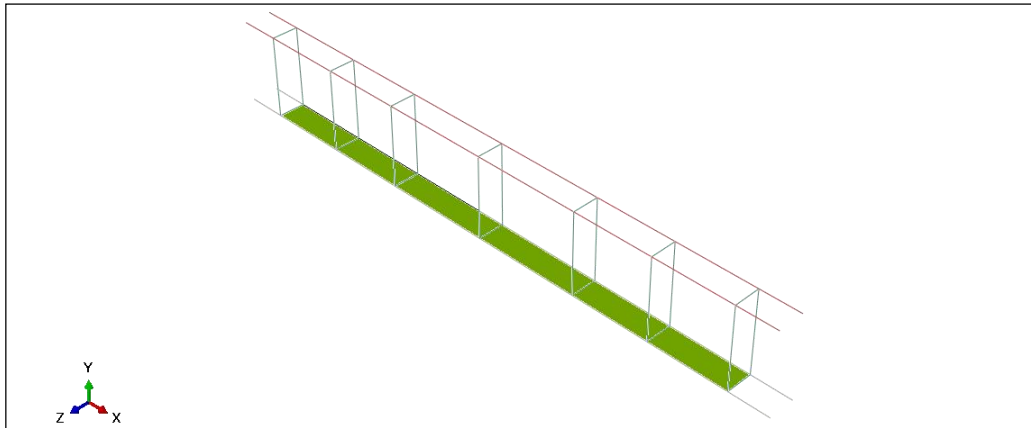


Figure I.11 : Les différentes configurations des PRF [11].

Dans cette recherche, nous nous intéresserons au renforcement interne, en flexion, par PRF et plus précisément par des plaques collées directement au ferrailage, telles que montrées sur la **figure (I.12)**. Cette configuration nous permettra d'écarter définitivement le problème du décollement du composite et de séparation de l'enrobage tout en gagnant en légèreté.



**Figure I.12 :** Renforcement interne en flexion par PRF.

## Conclusion

Cette recherche se dirige principalement vers le renforcement interne, en flexion, de poutres en béton au moyen de PRF à base de fibres végétales telles le jute, comme alternative à l'utilisation des fibres de verre.

Cette procédure a un double objectif, éviter le décollement des composites d'une part, et d'autre part, assurer une certaine légèreté à la structure.

Oublier l'aspect environnemental, vu que le jute est beaucoup moins polluant et plus économique que les fibres synthétiques.

Malgré qu'il soit moins résistant que le verre, le jute est un matériau quasiment gratuit comparé à la fibre de verre mais il faudrait juste trouver le moyen d'optimiser ses effets afin qu'il puisse rivaliser avec cette dernière.

---

**Chapitre II :**  
**Généralité sur ABAQUS et**  
**simulation numérique**

---

## Chapitre II : Généralités sur ABAQUS et simulation numérique

### Introduction

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs [18].

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique.

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...) et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O (conception assistée par ordinateur) se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation [19].

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle [20].

Dans ce chapitre, est donnée, une présentation du logiciel ABAQUS afin de mieux comprendre les étapes de modélisation des poutres. Les différents modèles, configurations et matériaux utilisés dans cette expérience y sont également décrits.

## II.1. Généralité sur le code de calcul ABAQUS

ABAQUS compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE, **figure II.1**.

### II.1.1. ABAQUS/Standard

ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite. Il est caractérisé par :

- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks;
- Problèmes linéaires et non linéaires;
- Géométrie diversifiée ; 1D, 2D, 3D et Axisymétrique;
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

### II.1.2. ABAQUS/Explicit

ABAQUS/ Explicit, un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamique ou quasi-statiques non-linéaires, caractérisé par :

- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle);
- Problème transitoire et dynamique des structures;
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.

### II.1.3. ABAQUS/CAE

ABAQUS /CAE, constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériaux. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

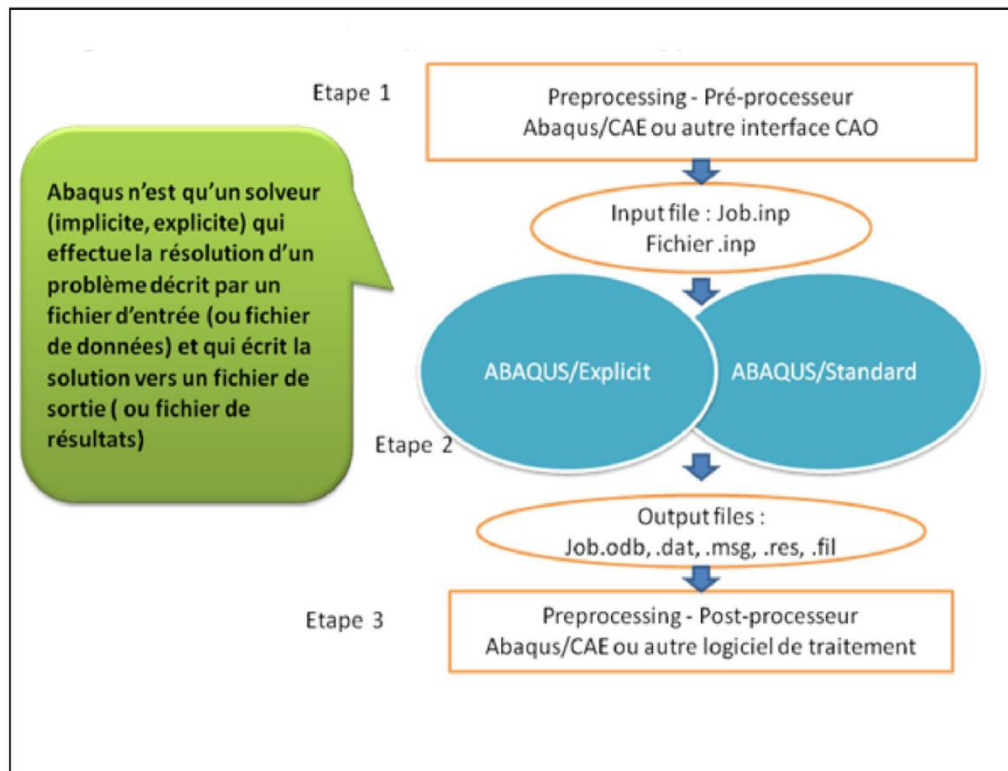


Figure II.1 : Structure d'une analyse sous Abaqus [21].

## II.2. Les différents fichiers pour la simulation sous Abaqus

### II.2.1 Fichier d'entrée (Input file)

Le fichier d'extension contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée

#### ➤ Génération du fichier .inp

- Avec un éditeur (fichier texte) ou programme, en connaissant les divers mots clés de commande Abaqus;
- Avec l'interface graphique Abaqus/CAE;
- Avec un logiciel annexe (IDEAS, NASTRAN,...).

### II.2.2 Fichier de résultats (output file)

Le fichier d'extension contient les contours et les courbes de résultats.

### II.3. Autres fichiers créés par Abaqus lors de la simulation

- Fichier .com : exécutable des calculs;
- Fichier .res : fichier binaire de reprise;
- Fichier .dat : liste des résultats, résumé de la modélisation;
- Fichier .msg : résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur;
- Fichier .fil : fichier binaire des résultats;
- Fichier .log : fichier de procédure;
- Fichier .sta : Fichier statistique ... etc.

### II.4. Organisation de l'interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement)

Il est important de savoir que le module CAE de la **figure 2.2**, utilisé pour créer le jeu de données, est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques [22].

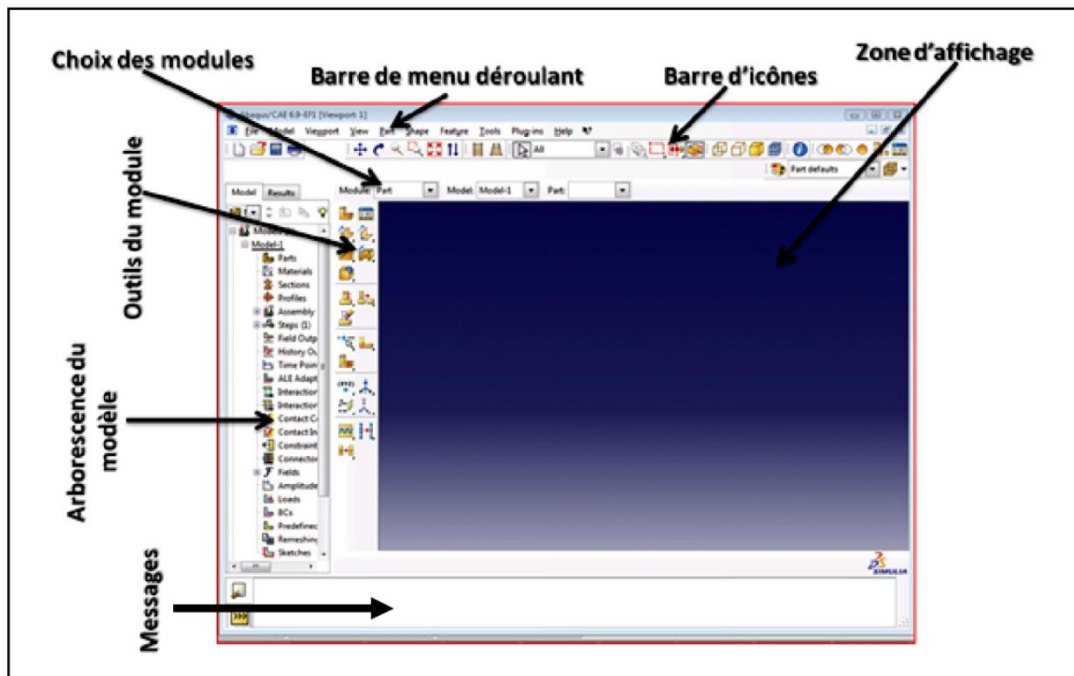


Figure II.2 : Organisation d'abaqus [22].

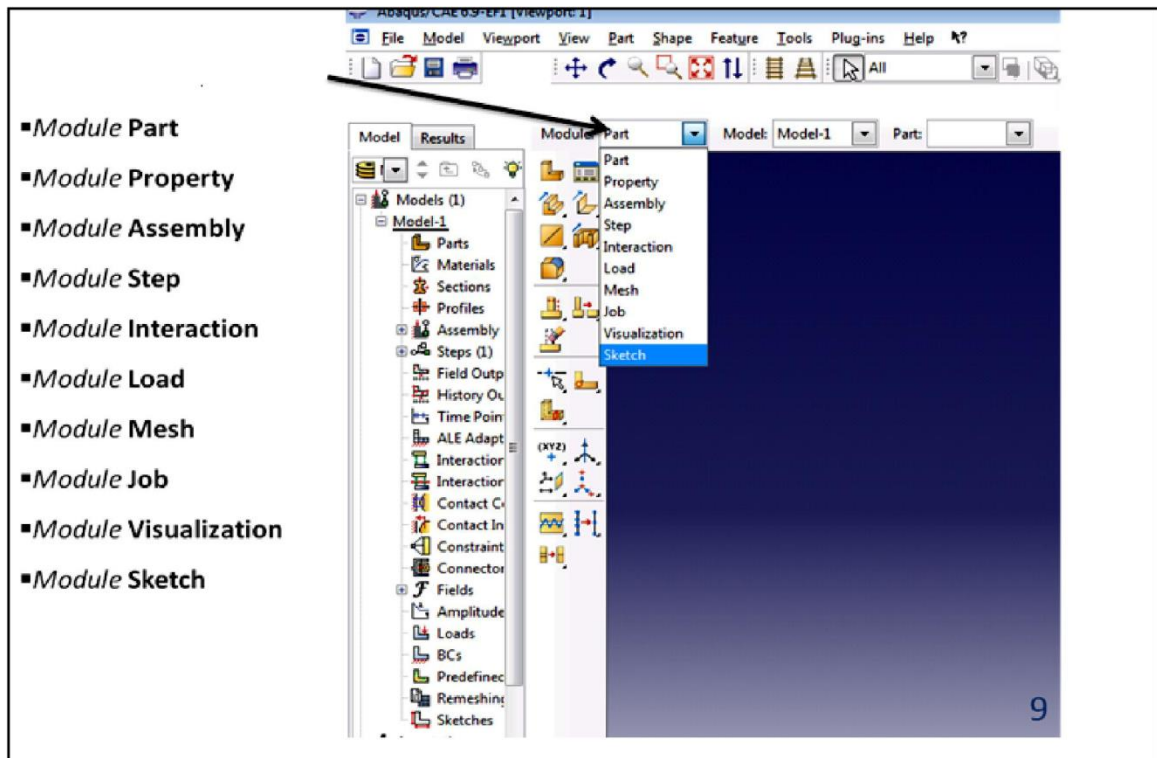
Les unités des différentes grandeurs retenues dans abaqus, sont résumées dans le tableau **tableau II.1**.

**Tableau II.1** : Tableau des unités pour ABAQUS.

MASSE	LONGUER	TEMPS	FORCE	PRESSION	ENERGIE
M	L	T	M.L.T <sup>-2</sup>	M.L <sup>-1</sup> .T <sup>-2</sup>	M.L <sup>2</sup> .T <sup>-2</sup>
<b>Kilogramme</b>	<b>Mètre</b>	<b>Seconde</b>	<b>Newton</b>	<b>Pascal</b>	<b>Joule</b>
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Mili joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPa	Mili joule

## II.5. Les modules et les étapes de modélisation

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans plusieurs modules, **figure II.3** [23].



**Figure II.3** : Réalisation de la mise en données d'un problème [23].

### II.5.1. Module part

C'est dans ce module qu'est définie la géométrie de chaque entité du modèle (**Figure II.4**). Il suffit juste de sélectionner convenablement :

- L'espace de modélisation;
- Le type d'entité à générer;
- La forme de l'entité.

Dans le cadre de cette simulation, trois types d'éléments sont créés. Il s'agit de l'élément poutre en béton, des barres et étriers en acier et des plaques composites destinées au renforcement des poutres.

- **Élément "POUTRE"**

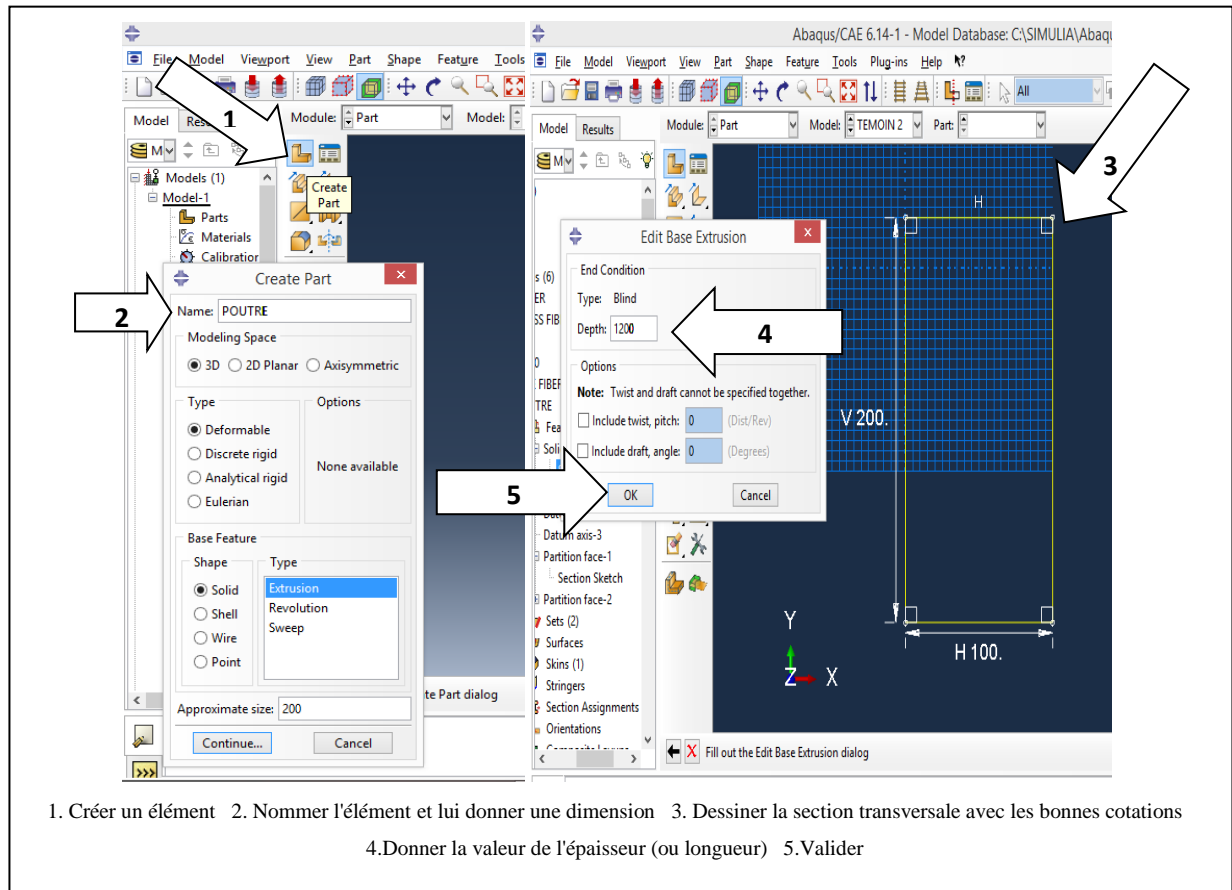


Figure II.4 : Élément poutre.

Dans le cas d'un solide rigide, il est nécessaire de définir un point de référence. C'est en fait en ce point que sont définis les degrés de liberté du solide sur lesquels vous imposerez des conditions aux limites par la suite. Ceci se fait dans le menu Tools, grâce à la commande **Reference point**.

Grace au bouton "**Partition Face**" de petites parties sur la poutre sont créées, ce qui aidera par la suite à définir l'emplacement du corps rigide.

Les points de références (RP) définissent l'emplacement des charges et des points d'appuis, dans cette simulation, quatre points sont définis puisque les modèles sont sollicités en flexion quatre points (**Figure II.5**).

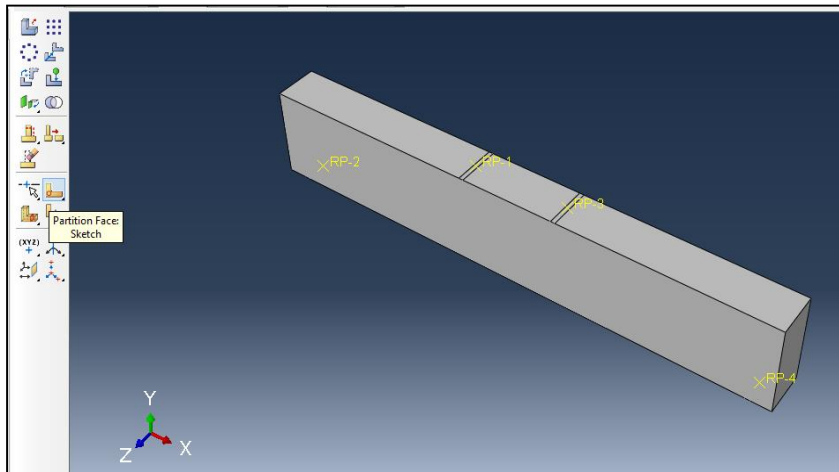


Figure II.5 : Élément poutre.

- **Éléments "ETRIER", "HA8" et "HA10"**

Pour ces éléments, il est plus simple de les créer sous forme de fil en sélectionnant "Wire" (Figure II.6) et de leur assigner une section plus tard.

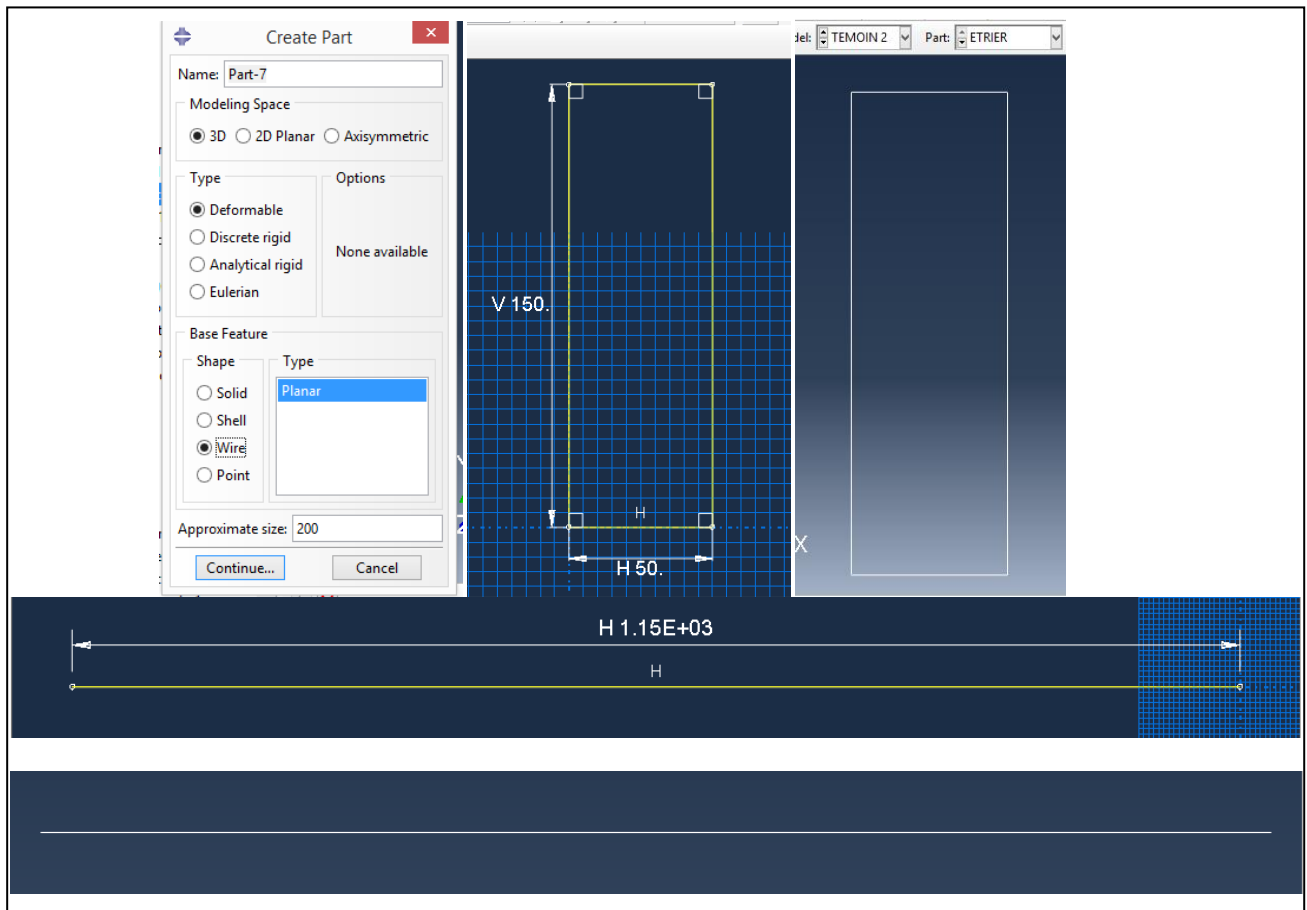
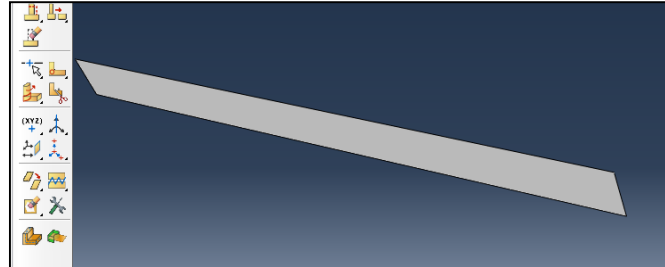


Figure II.6 : Les éléments en acier.

- **Eléments "FIBRE + RESINE" (composite)**

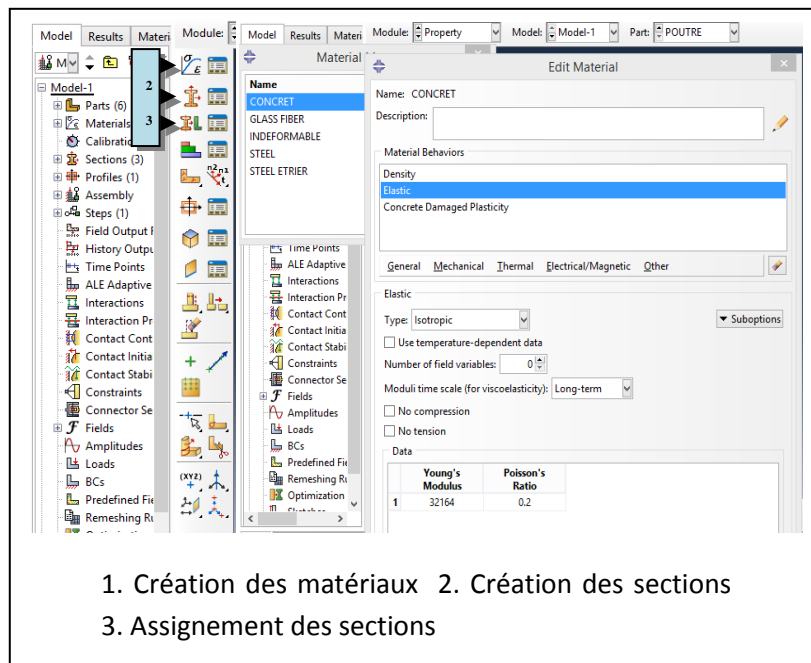
Les composites sont considérés comme étant des plaques (**Figure II.7**), en choisissant "Shell" dans "Creat Part". Les dimensions de cet élément s'adapteront à celles du ferrailage et devront varier selon les exigences des expériences.



**Figure II.7 :** Elément composite.

### II.5.2. Module Property

Grâce à ce module, chaque matériau est défini en introduisant toutes ses propriétés mécaniques nécessaires. Les trois étapes principales suivies pour tout élément sont montrés dans la **figure II.8**.



**Figure II.8 :** Création des matériaux.

- Afin de créer les propriétés du béton solide et homogène, il faut sélectionner "**Solid**" et "**Homogeneous**". Pour les éléments en acier, il faut sélectionner "**Beam**" et "**Truss**" qui permettra la création des propriétés du fil. Pour les composites, il faut sélectionner "**Shell**", c'est à dire une coque ou bien une plaque.
- Les propriétés élastiques du PRF sont introduites via **Mechanical**, où **Elasticity** est sélectionné, puis **Elastic** (module d'Young et le coefficient de Poisson) est choisi;
- Les propriétés plastiques des aciers et du béton sont données via **Mechanical**, où **Plasticity** est sélectionné, puis **Plastic** est choisi pour les aciers et **Concrete Damaged Plasticity** pour le béton.
- Il faut ensuite affecter les propriétés du matériau à une entité du maillage. L'ensemble des propriétés considérées pour le béton, l'acier et le PRF, sont données dans les **tableaux II.2, II.3 et II.4** respectivement.

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques du béton.

Dénotation	Valeurs
Résistance à la compression du béton	25 MPa
Résistance à la traction du béton	2.1 MPa
Module de Young du béton	32164 MPa
Coefficient de Poisson du béton	0.2

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques de l'acier.

Module d'élasticité de l'acier	210000 MPa
Limite élastique de l'acier	FeE400 (400 MPa)
Coefficient de Poisson de l'acier	0.3

Tableau II.4 : Propriétés mécaniques des composites.

Matériau composite	Module d'Young (MPa)	Coefficient de poisson
Fibre de verre/époxy	45160	0,31
Fibre de jute/époxy	23000	0,2

### II.5.3. Module Assembly

Grâce à ce module et ses outils de déplacement, l'assemblage de tous les éléments déjà créés est possible, tout en leur donnant l'emplacement adéquat suivant le schéma de ferrailage (Figure II.9).

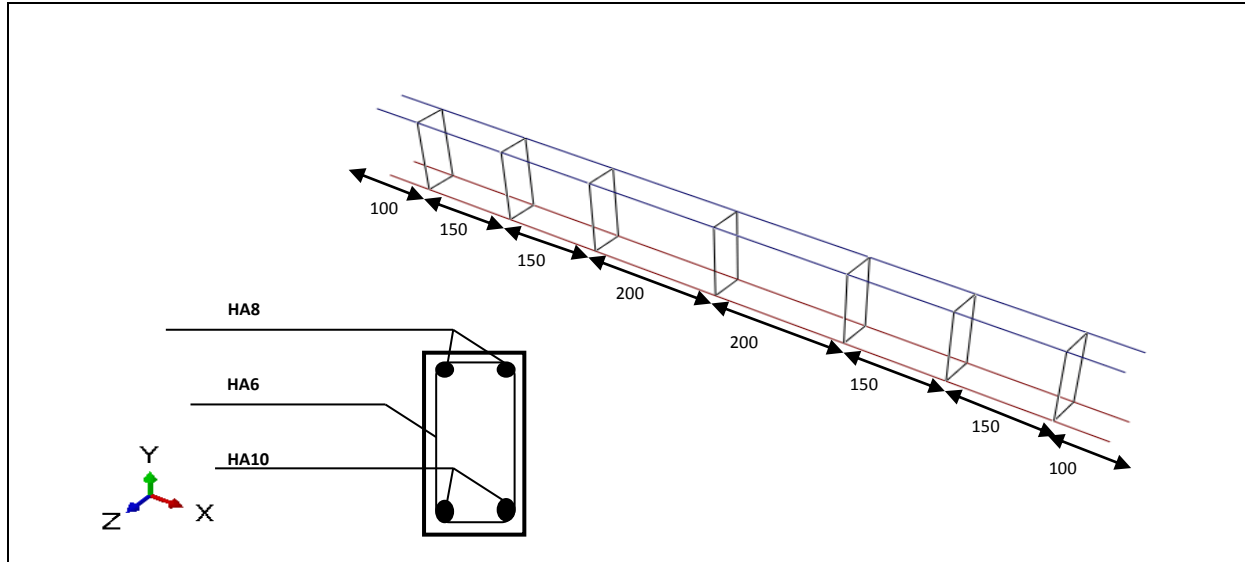


Figure II.9 : Schéma de ferrailage.

Le résultat de l'assemblage est représenté sur la figure II.10.

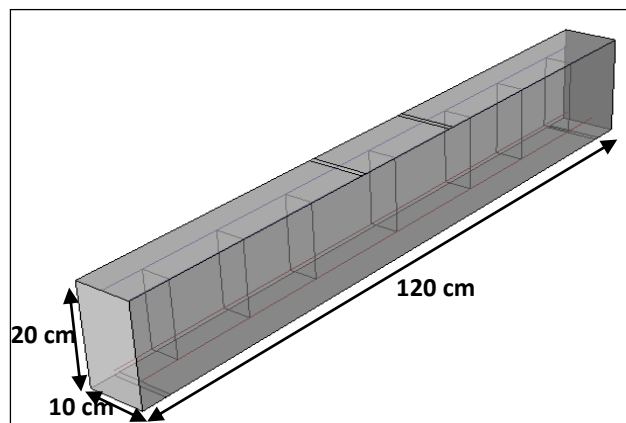


Figure II.10 : Résultat de l'assemblage sur abaqus.

### II.5.4. Module Step

C'est ici qu'est choisie l'incrémentación à donner à la simulation, la valeur du temps de pas et la valeur du temps final. Ce module (Figure II.11) permet aussi de sélectionner les variables de sortie souhaitées (telles que les contraintes, les déplacements, les endommagements...) pour qu'il nous soit possible de les visualiser à la fin des calculs.

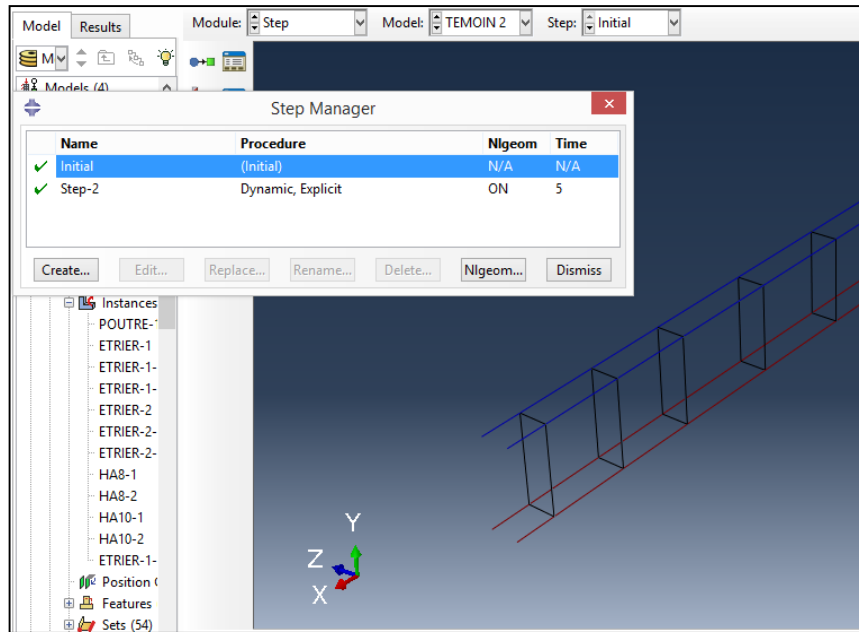


Figure II.11 : Création de step.

### II.5.5. Module Interaction

Malgré que l'assemblage soit une étape indispensable pour la simulation numérique, la proximité géométrique des éléments obtenue n'est pas suffisante pour créer une interaction entre eux. En effet, le logiciel a besoin qu'on lui désigne quelles sont les éléments qui interagissent entre eux, dans notre cas il faut désigner dans "**embedded region**" d'abord la partie intégrée (ferrailage et/ou composite), ensuite l'hôte (béton) (**Figure II.12**).

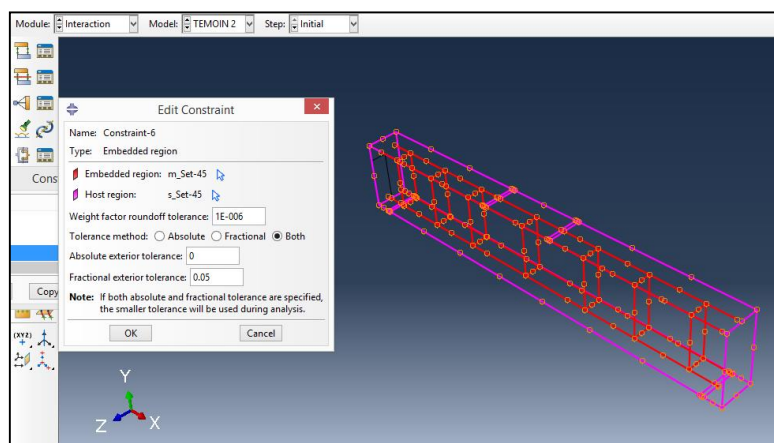


Figure II.12 : Définition des interactions.

Ce module sert aussi à désigner les parties soumises à des contraintes via un corps rigide (telles que les points d'appui) en sélectionnant "**Rigid body**" (**figure II.13**).

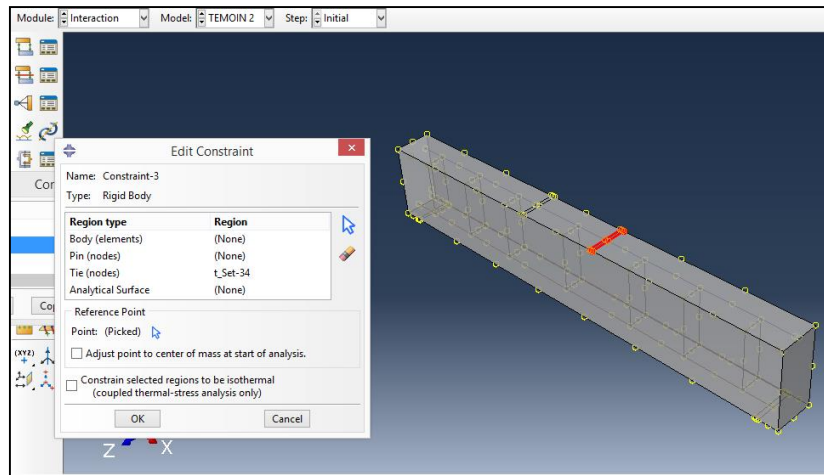


Figure II.13 : Interactions de corps rigides.

### II.5.6. Module Load

Ce module permet de spécifier tous les chargements (**Figure II.14**), conditions aux limites et champs. Après les avoir spécifiés, il faut juste veiller à sélectionner le step intéressant.

Dans la présente simulation, la poutre est supposée supporter deux charges linéaires. Un déplacement imposé de 2 mm est alors appliqué.

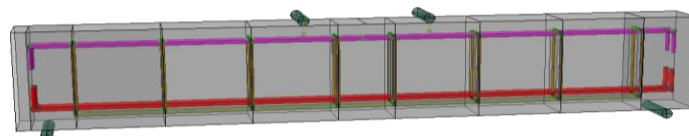
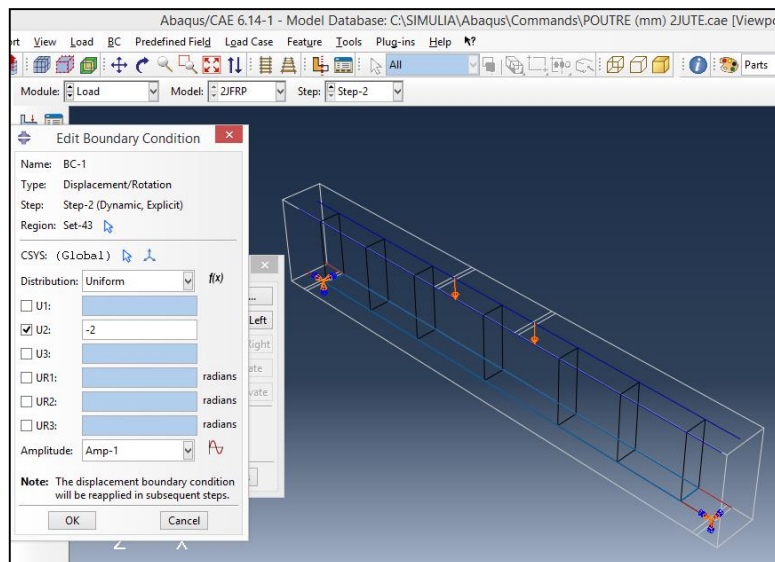
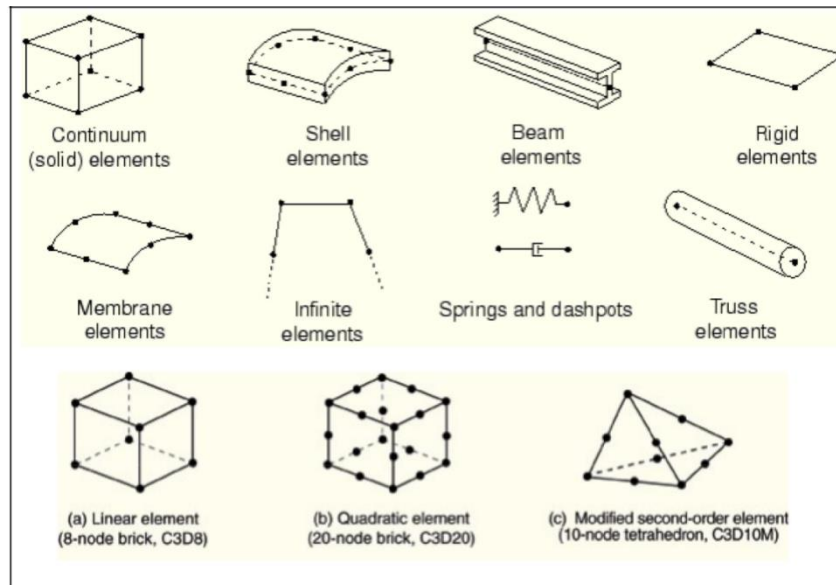


Figure II.14 : Création des chargements.

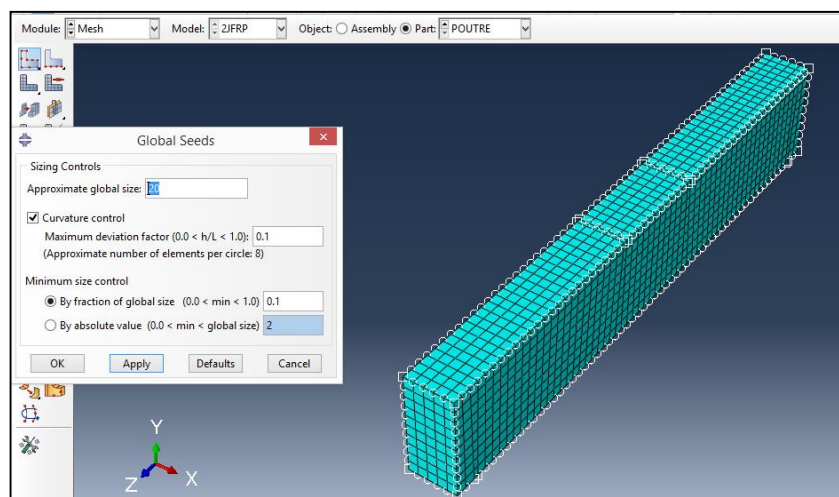
### II.5.7. Module Mesh

• Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage d'éléments finis sur chaque partie. Un très large choix d'éléments (plus de 100, **figure II.15**), est disponible dans la bibliothèque d'abaqus. Chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre de nœuds, intégration. Il est à noter qu'il est possible de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) [24].



**Figure II.15 :** Quelques éléments dans Abaqus [24].

Dans notre cas, les dimensions de tous les maillages est de 20mm. En ce qui concerne le type d'éléments, pour le béton, des éléments finis parallélépipédiques en 3D HEX8 (éléments composés de huit nœuds avec huit degrés de liberté pour chacun). Le matériau composite quant à lui, son maillage est quadratique à quatre nœuds avec huit degrés de liberté (**Figure II.16**).



**Figure II.16 :** Création du maillage.

### II.5.8. Module Job

La création d'un "job" est la dernière étape avant la visualisation, c'est le module qui permet de lancer les calculs en cliquant sur "Submit" (**Figure II.17**). Après avoir lancé le calcul, le suivi de l'évolution du calcul en cliquant sur "Monitor" : le temps réel de l'évolution des incréments de chargement peut apparaître et la convergence des calculs est ainsi appréciée.

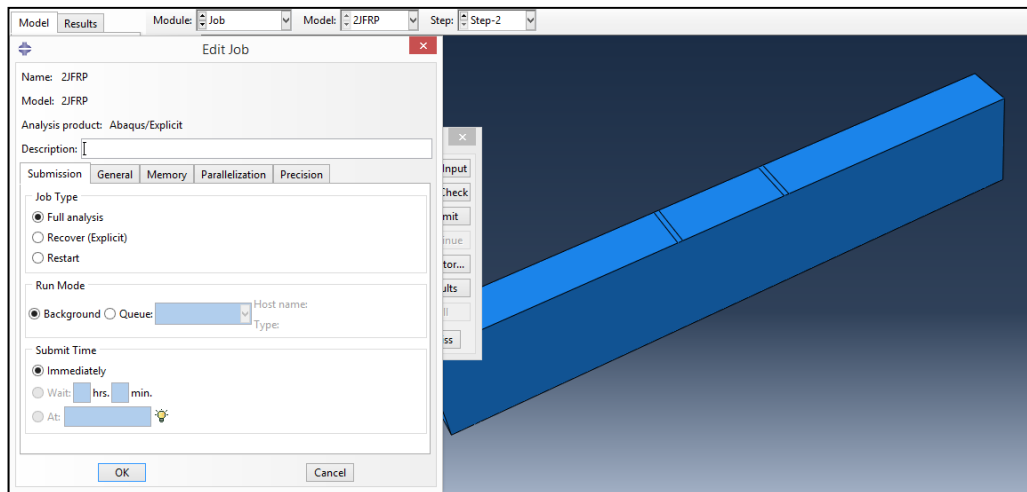


Figure II.17 : Lancement de calcul.

### II.5.9. Module visualization

C'est le module qui affiche tous les résultats demandés de notre simulation (**Figure II.18**). Il est aussi possible d'en extraire des fichiers Excel pour obtenir des tableaux de données ou des graphes.

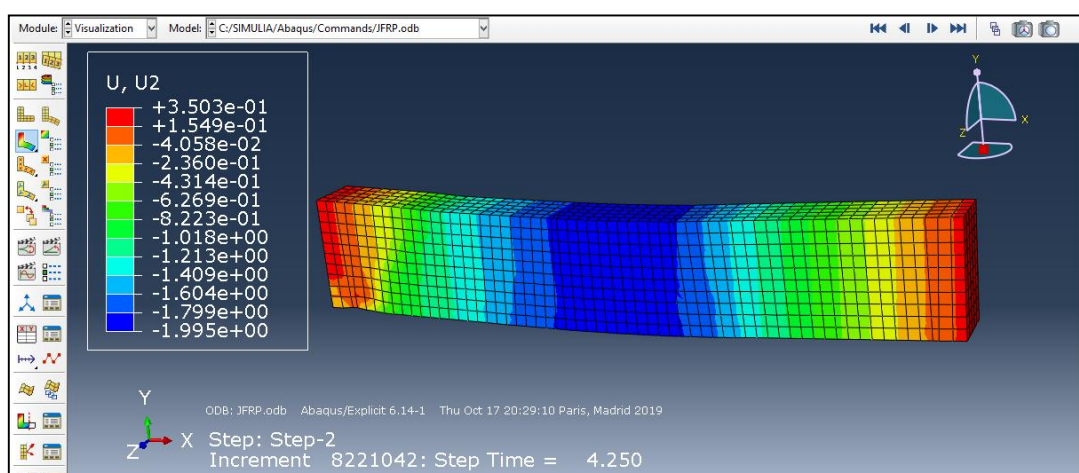


Figure II.18 : Affichage des résultats.

## II.6. L'arbre du modèle

L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale. Par exemple, double cliquer sur Part permet de créer une nouvelle Part comme sélectionner **Part** ->**Create** dans la barre de menu [24].

## II.7. Présentation des modèles

Une fois la poutre témoin (non renforcée) modélisée, il est alors facile de créer les modèles renforcés. Plusieurs variantes de poutres renforcées avec des plaques de polymère renforcé de fibres de jute sont modélisées. Elles sont obtenues en faisant varier deux paramètres qui sont la longueur du PRF ainsi que son épaisseur. Quatre variantes sont testées pour chacun de ces deux paramètres. L'objectif étant double, puisqu'il s'agit, d'une part, de voir l'effet de cette technique de renforcement, par rapport au béton témoin, sur les caractéristiques mécaniques de la poutre, notamment sa résistance en flexion ainsi que sa ductilité. D'autre part, une comparaison est conduite entre les résultats obtenus pour ces poutres renforcées avec le jute et ceux obtenus pour une poutre renforcée avec une plaque de PRF à base de fibres de verre. Le but étant de trouver la meilleure variante de renforcement avec le jute qui remplacerait le renforcement avec le verre, l'enjeu étant purement économique et environnemental.

Les différents modèles numériques établis sont représentés sur la **figure II.20**.

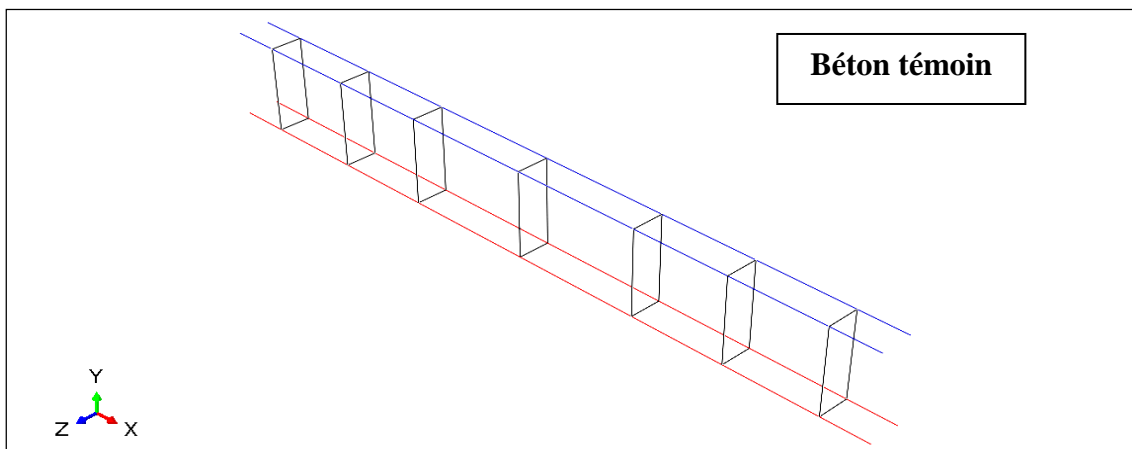


Figure II.19 : Modèle de référence.

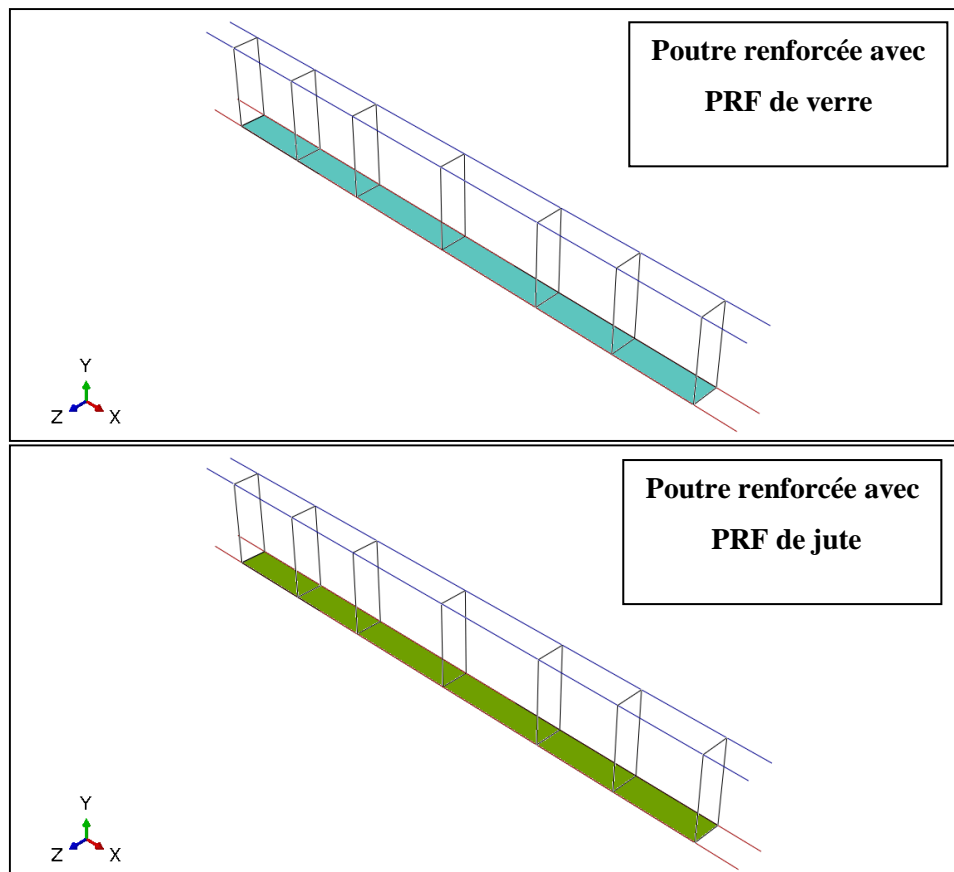
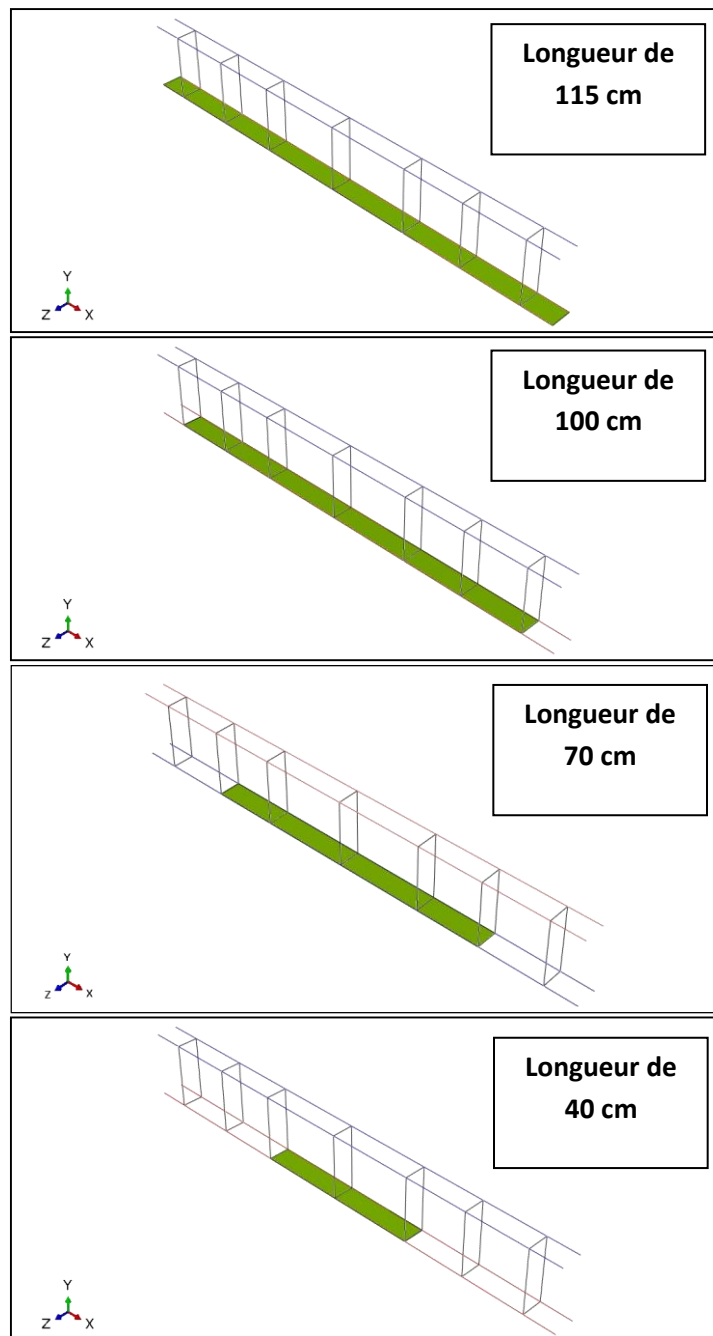


Figure II.20 : Poutres renforcées avec une plaque PRF.

- **Variation de la longueur**

Quatre valeurs de longueur de renforcement sont testées. Les plaques PRF modélisées ont les longueurs suivantes : 115cm, 100cm, 70cm et 40cm (**figure II.21**).



**Figure II.21** : Différentes longueurs PRF testées.

- **Variation de l'épaisseur**

La variation de l'épaisseur n'est que la superposition de deux ou trois, jusqu'à quatre plaques de composite. Ainsi, quatre valeurs d'épaisseur du PRF sont testées.

## Conclusion

L'outil numérique est vraiment devenu indispensable à la construction car les calculs des structures deviennent de plus en plus longs car de plus en plus compliqués. Les paramètres des modèles, en termes de géométrie, caractéristiques mécaniques, etc, doivent approcher les valeurs réelles des spécimens testés, pour espérer avoir des résultats proches de la réalité.

Cette étude se base sur l'apport de la fibre de jute en construction et cela en le comparant à la fibre de verre, mais encore sur un choix de configuration de confinement interne, assez original. Cette étude numérique offre divers choix de dimensionnement des plaques PRF, ce qui permet d'optimiser et d'exploiter au mieux ce type de renforcement avec PRF.

---

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussion**

---

## Chapitre III : Résultats et discussion

### Introduction

Dans ce chapitre, seront exposés tous les résultats des analyses numériques réalisées que ce soit sur la poutre témoin ou sur la poutre renforcée aussi bien avec un PRF de verre qu'avec un PRF de jute. Il est à rappeler que pour ce dernier cas, plusieurs variantes ont été testées en faisant varier la longueur du PRF ainsi que son épaisseur, le but étant de trouver la configuration optimale du renforcement interne proposé dans le cadre de cette étude. Les résultats en termes de résistance à la flexion, de ductilité ainsi que de modes de ruptures sont d'abord donnés sous formes numérique et graphique, puis sont discutés afin de mieux appréhender le comportement de ces poutres renforcées en flexion.

### III.1. Modèles numériques établis

Les modèles numériques des poutres renforcées avec PRF, sont établis en se basant sur le modèle de la poutre témoin qui sert de référence.

Les résultats des différentes simulations conduites seront donnés tout d'abord. la poutre témoin, pour la poutre renforcée avec le PRFV pour une longueur de 100 cm et une épaisseur de 2 mm ainsi que pour une poutre renforcée avec un PRFJ, pour ces mêmes paramètres géométriques. Une présentation détaillée pour les résultats obtenus pour la variable épaisseur du PRF, puis pour la variable longueur du PRF est ensuite donnée. Il est à noter qu'un ultime calcul, dont les résultats sont donnés en dernier, est conduit en prenant en compte la longueur et l'épaisseur optimales qui permettent la meilleure combinaison de PRFJ qui constituerait une alternative au PRFV testé.

#### III.1.1. Modèle numérique de référence (témoin)

Le schéma de ferrailage du modèle, l'état des contraintes qui s'y développent, les dommages en traction du modèle ainsi que la courbe force-déplacement décrivant le comportement de la poutre sont donnés dans les **figures III.1, III.2 et III.3**.



Figure III.1 : Etat des contraintes dans les aciers du témoin.

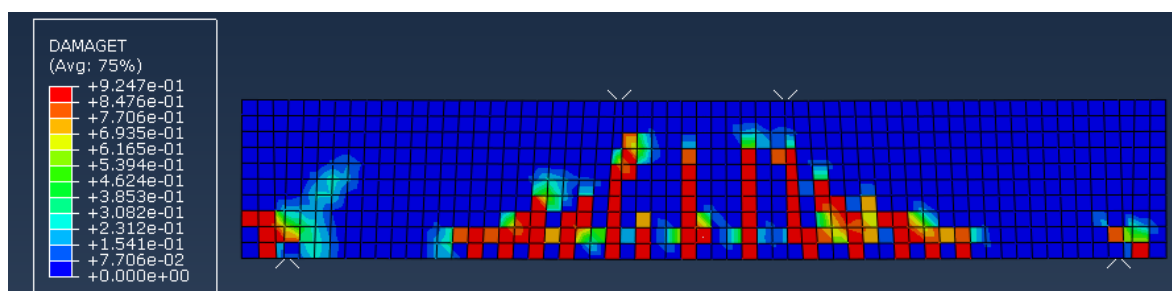


Figure III.2 : Mode de rupture du témoin.

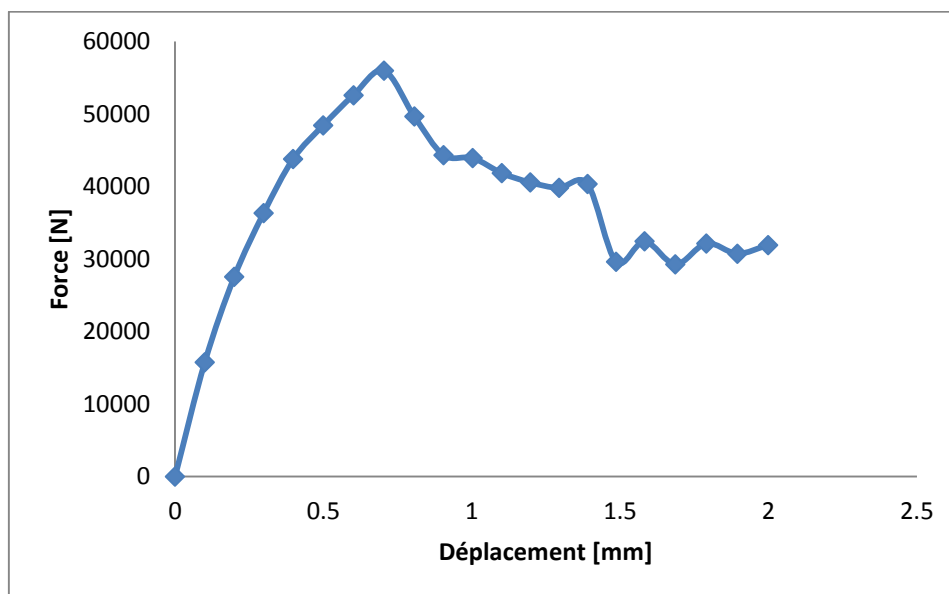


Figure III.3 : Courbe Force-Déplacement du témoin.

### III.1.2. Modèle renforcé avec une plaque de PRFV

Le modèle de référence est repris pour concevoir ce modèle, à la différence que dans celui-ci est introduite une plaque de PRFV d'une longueur de 100 cm et d'une épaisseur de 2 mm supposée en parfaite adhérence avec les armatures tendues. Le schéma, l'état de contrainte, les dommages ainsi que la courbe force-déplacement sont donnés par les figures III.4, III.5 et III.6.

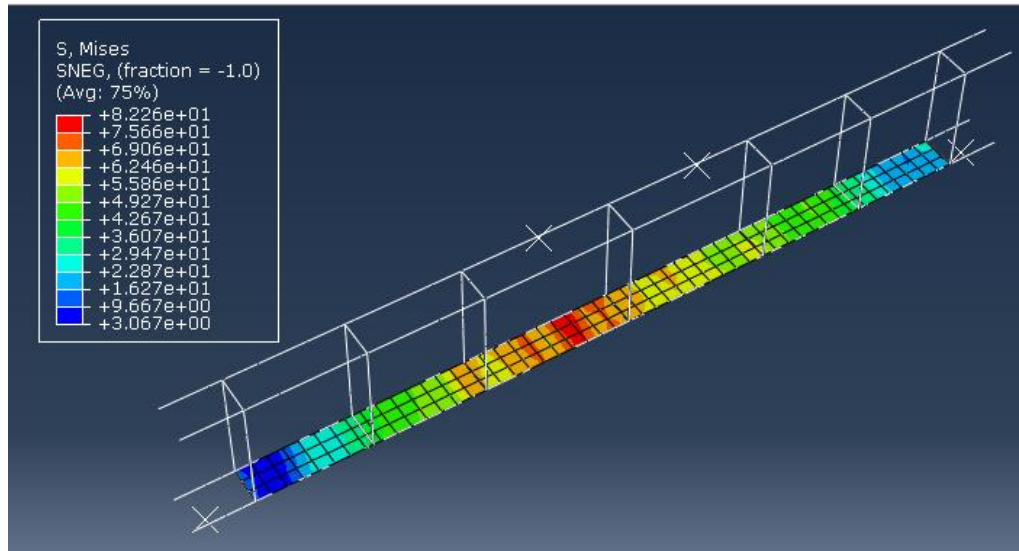


Figure III.4 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec PRFV.

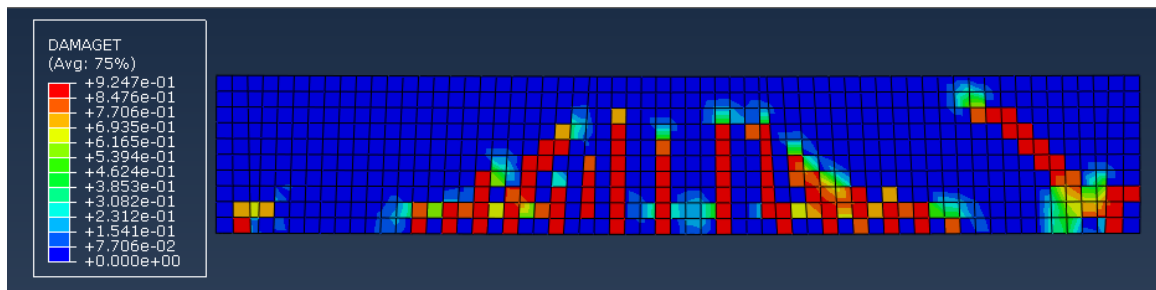
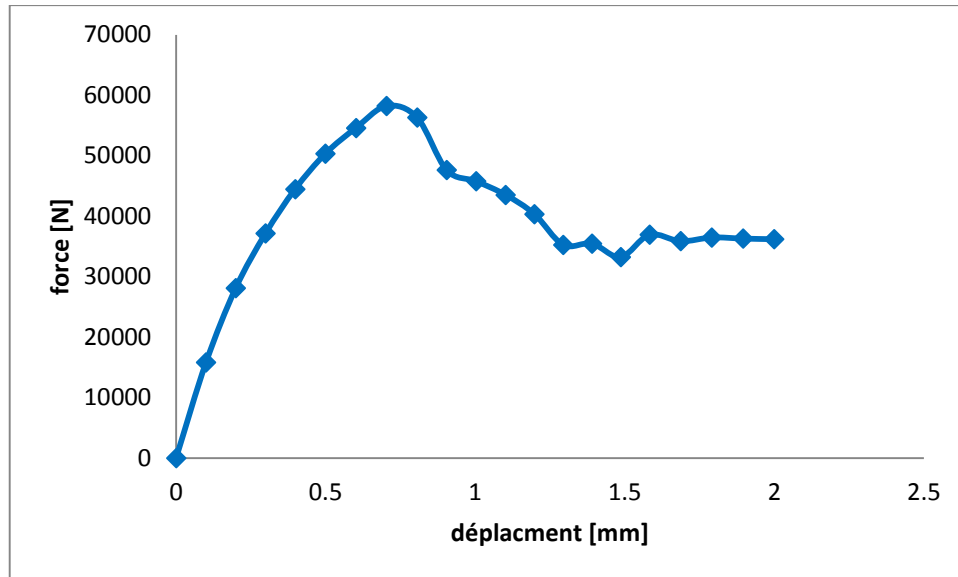


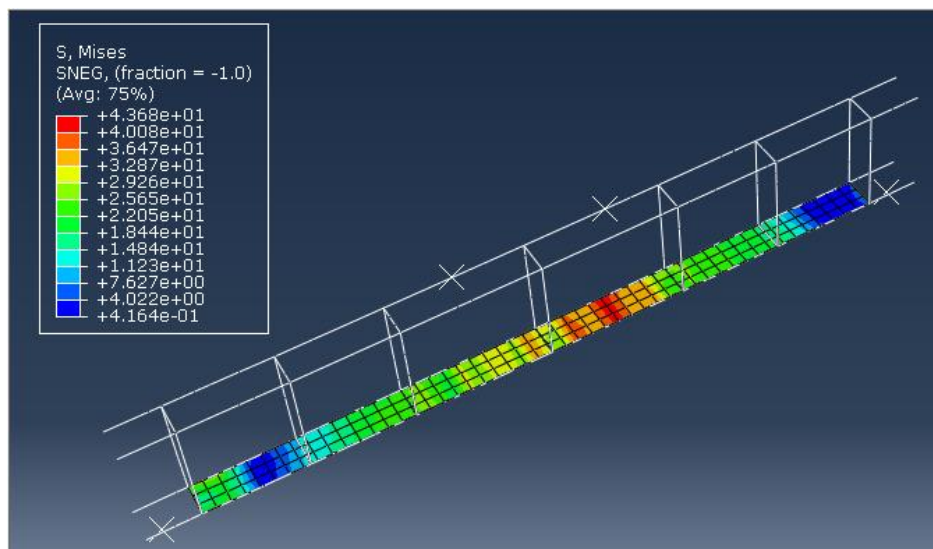
Figure III.5 : Mode de rupture du modèle renforcé avec PRFV.



**Figure III.6 :** Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec PRFV.

### III.1.3. Modèle renforcé avec une plaque de PRFJ

Ce modèle est identique à celui renforcé avec PRFV, sauf que la plaque de PRFV est remplacée par une plaque PRFJ, en gardant la même épaisseur et la même largeur. Les résultats obtenus en matière d'état de contraintes, dommages en traction et courbes force-déplacement sont donnés par les **figures III.7, III.8 et III.9**.



**Figure III.7 :** Etat de contrainte du modèle renforcé avec PRFJ.

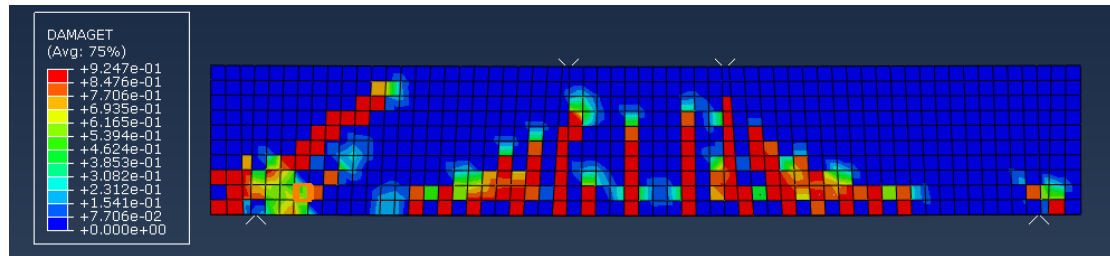


Figure III.8: Mode de rupture du modèle renforcé avec PRFJ.

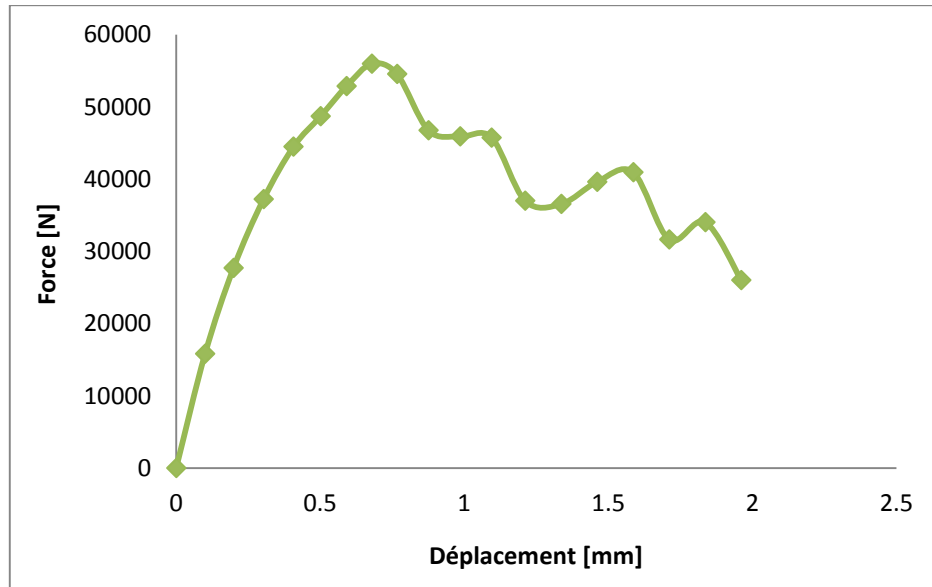


Figure III.9 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec PRFJ.

#### III.1.4. Confrontation des résultats

Il ressort des résultats précédents, que pour les trois poutres les contraintes sont concentrées au niveau de la partie médiane du ferrailage ou du PRF. On peut voir aussi facilement que les dommages en traction sont quasiment identiques pour les trois poutres.

Par ailleurs, les résultats de la résistance en flexion pour les trois poutres sont consignés dans le **tableau III.1**, tant dis que la confrontation des courbes force-déplacement de ces modèles est donnée par la **figure III.10**.

Tableau III.1 : Résultats des modèles numériques.

Modèle	Force (kN)
TEMOIN	55,98
PRFV	58,22
PRFJ	55,97

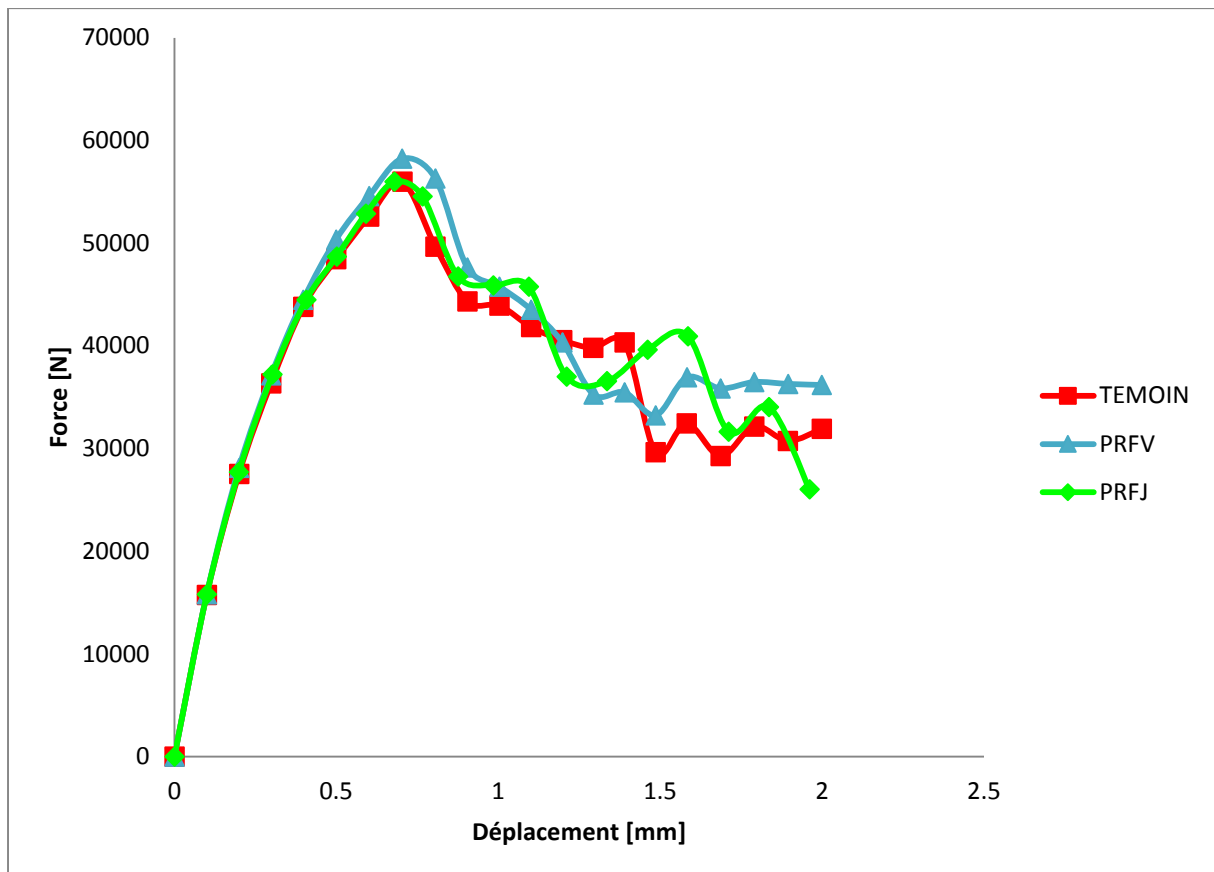


Figure III.10 : Confrontation des résultats des modèles standards.

Les trois courbes présentent pratiquement la même allure. Le modèle PRFJ présente la même résistance que celle du modèle de référence, toutes deux inférieures à celle du modèle renforcé avec PRFV. On enregistre, en effet, une amélioration de l'ordre de 4%.

## III.2. Effet de l'épaisseur du PRFJ

Concernant l'épaisseur du PRFJ, quatre valeurs ont été testées, le but étant de les comparer au renforcement avec plaque de PRFV d'épaisseur 2mm. Ainsi, quatre poutres renforcées identiquement avec un PRFJ d'épaisseur 2mm, 4mm, 6mm et 8mm sont simulées. Les résultats obtenus en matière de mode de rupture, état des contraintes et courbes force-déplacement sont donnés pour chaque épaisseur.

### III.2.1. Modèle avec une plaque de PRFJ

Les résultats de ce modèle ont été donnés précédemment dans le paragraphe III.1.3.

III.2.2. Modèle avec deux plaques de PRFJ

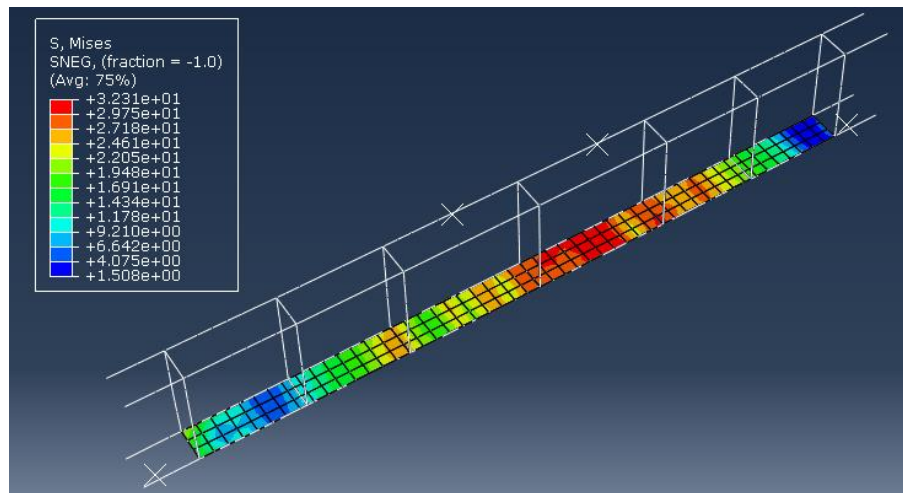


Figure III.11 : Etat de contrainte du modèle 2PRFJ.

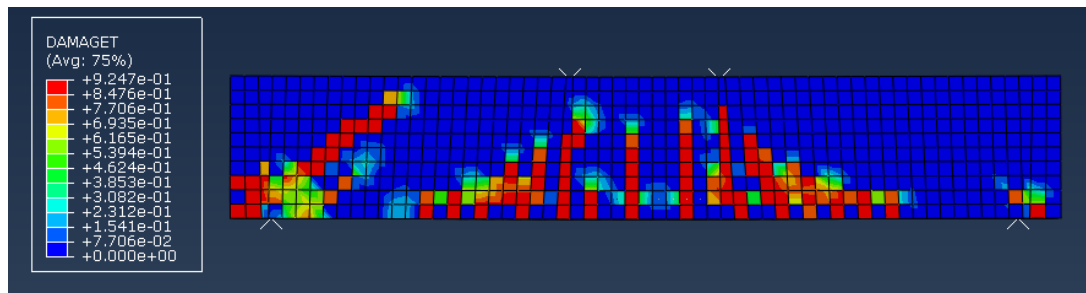


Figure III.12 : Mode de rupture du modèle 2PRFJ.

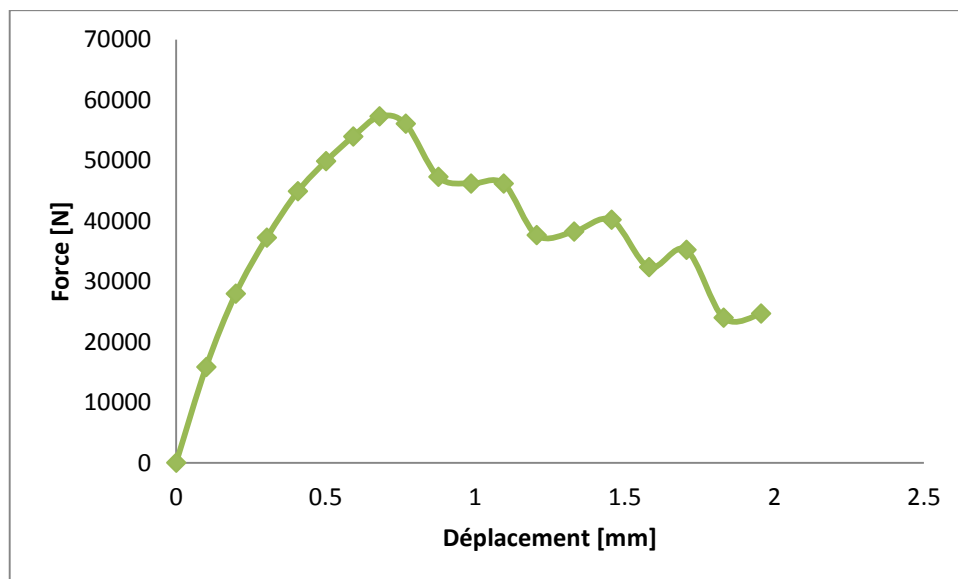


Figure III.13 : Courbe Force-Déplacement du modèle 2PRFJ.

### III.2.3. Modèle avec trois plaques de PRFJ

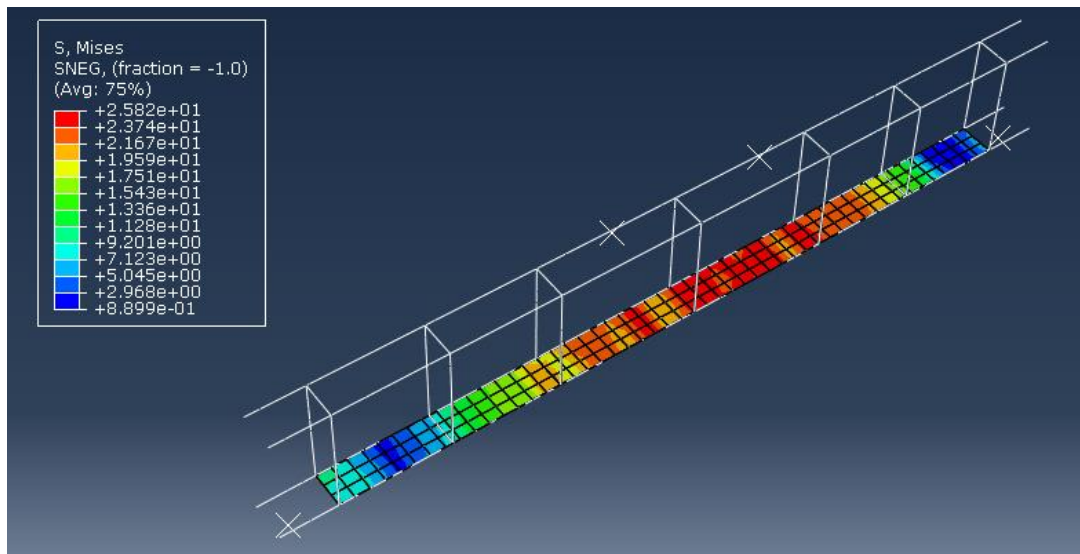


Figure III.14 : Etat de contrainte du modèle 3PRFJ.

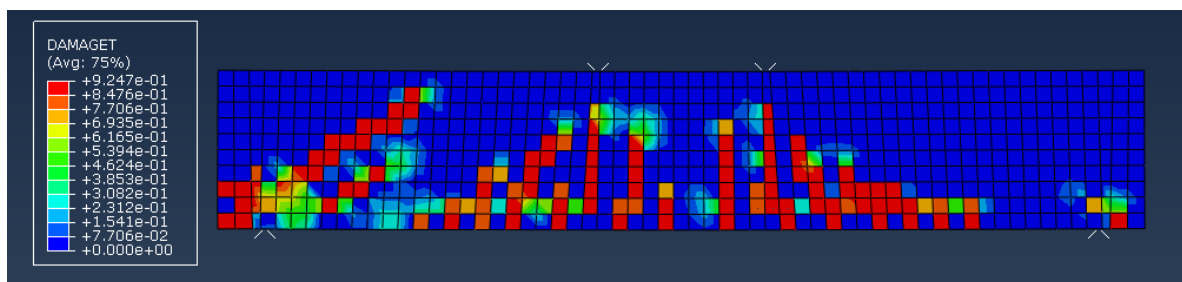


Figure III.15 : Mode de rupture du modèle 3PRFJ.

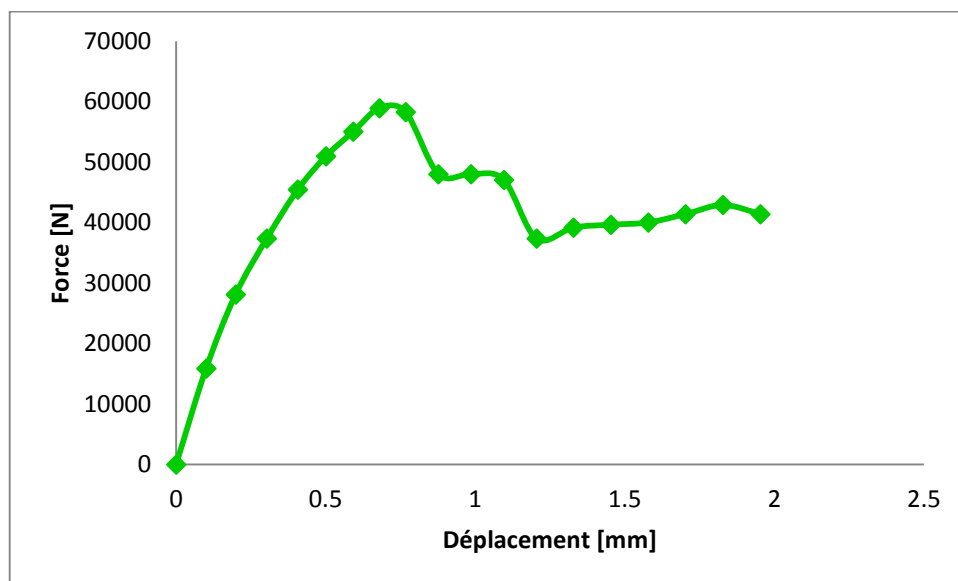


Figure III.16 : Courbe Force-Déplacement du modèle 3PRFJ.

III.2.4. Modèle avec quatre plaques de PRFJ

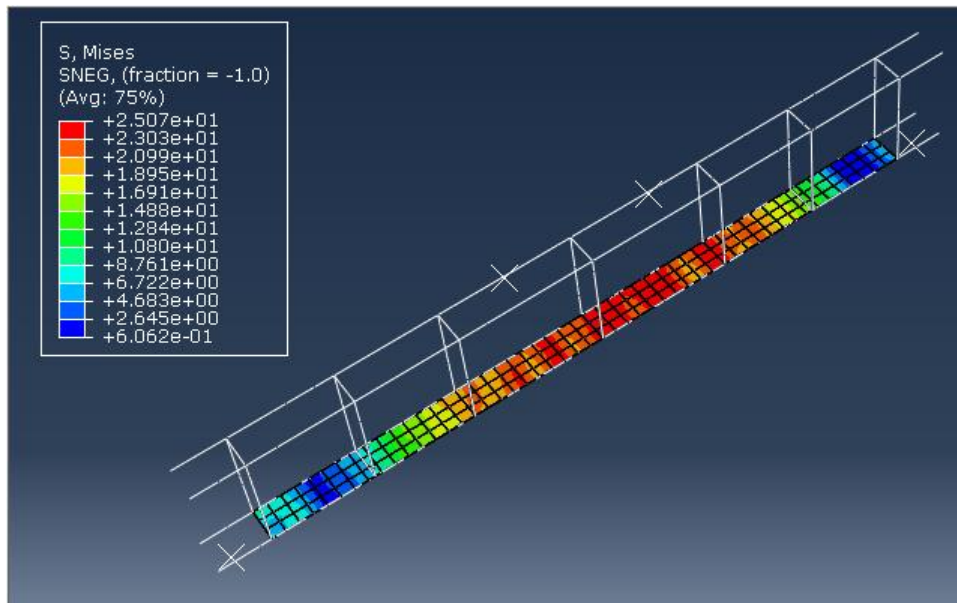


Figure III.17 : Etat de contrainte du modèle 4PRFJ.

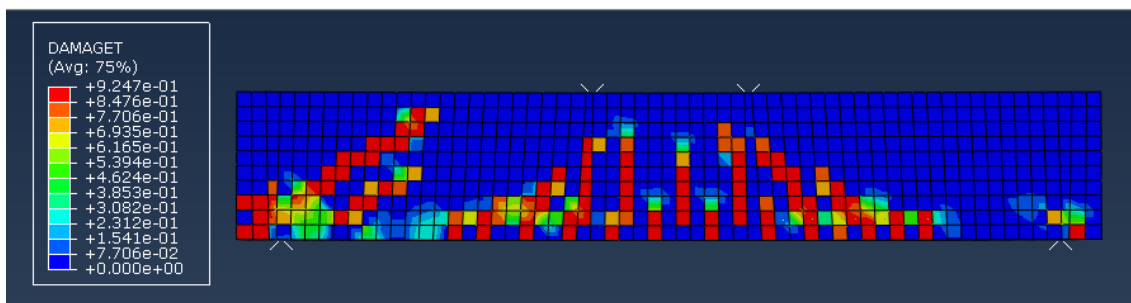


Figure III.18 : Mode de rupture du modèle 4PRFJ.

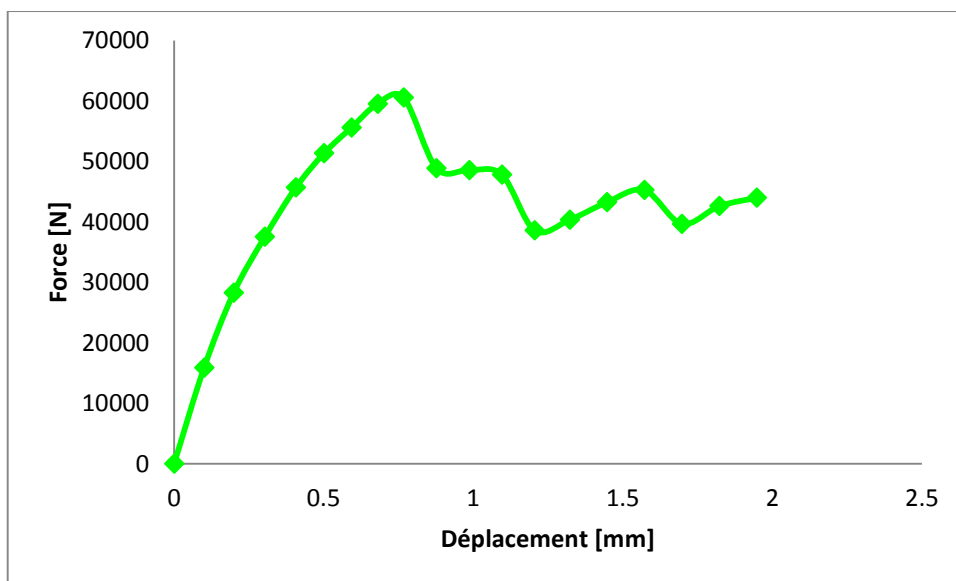


Figure III.19 : Courbe Force-Déplacement du modèle 4PRFJ.

### III.2.5. Confrontation des résultats

Les résultats de la résistance en flexion pour les trois poutres sont consignés dans le **tableau III.2**, tant dis que la confrontation des courbes force-déplacement de ces modèles est donnée par la **figure III.20**.

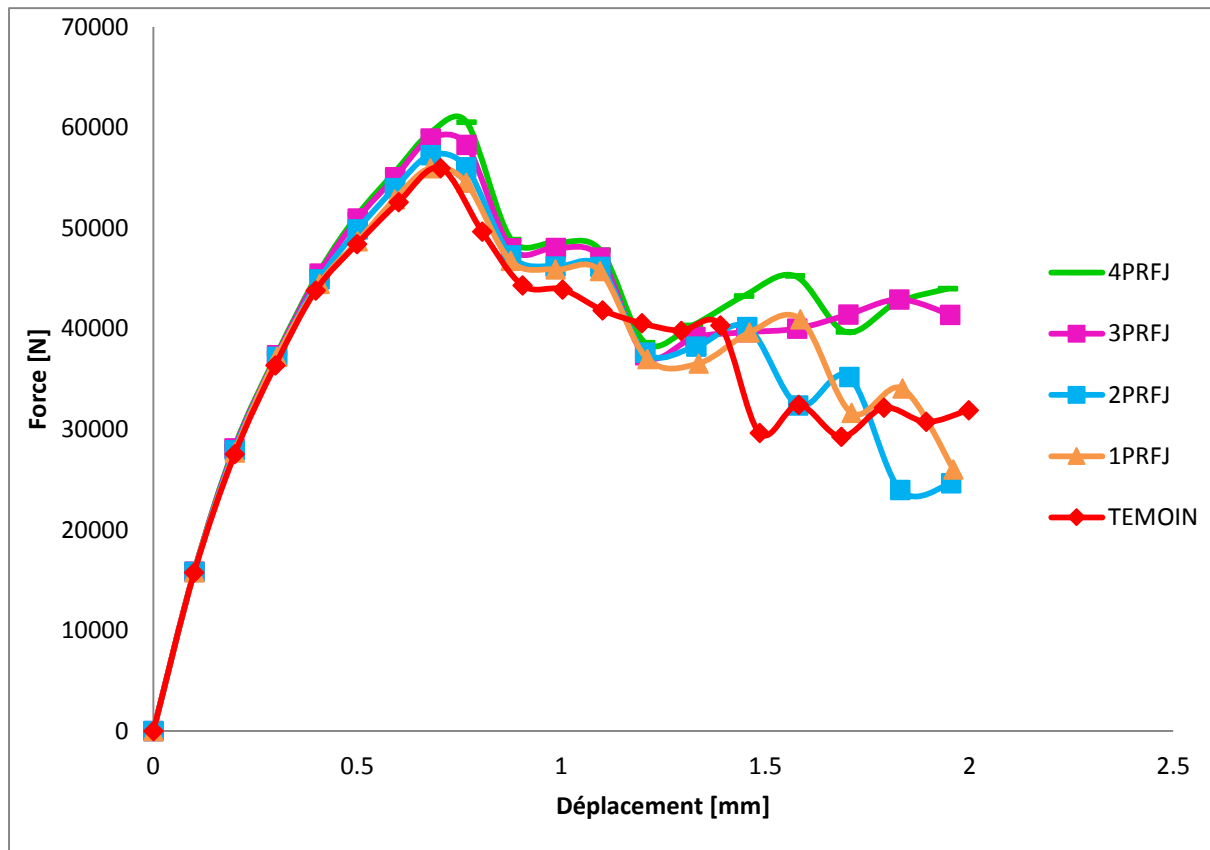


Figure III.20 : Confrontation des résultats pour la variable épaisseur du PRFJ.

Il semblerait que la résistance mécanique et la ductilité augmentent en fonction du nombre de plaques (**figure III.20**) et que la rupture se dirige de plus en plus vers le cisaillement, chose que les diagrammes des dommages indiquent, puisque les dommages sont moins intenses dans le cas des poutres renforcées et qu'il y a apparition de fissures de cisaillement. Ceci indique la réussite du renforcement interne en flexion.

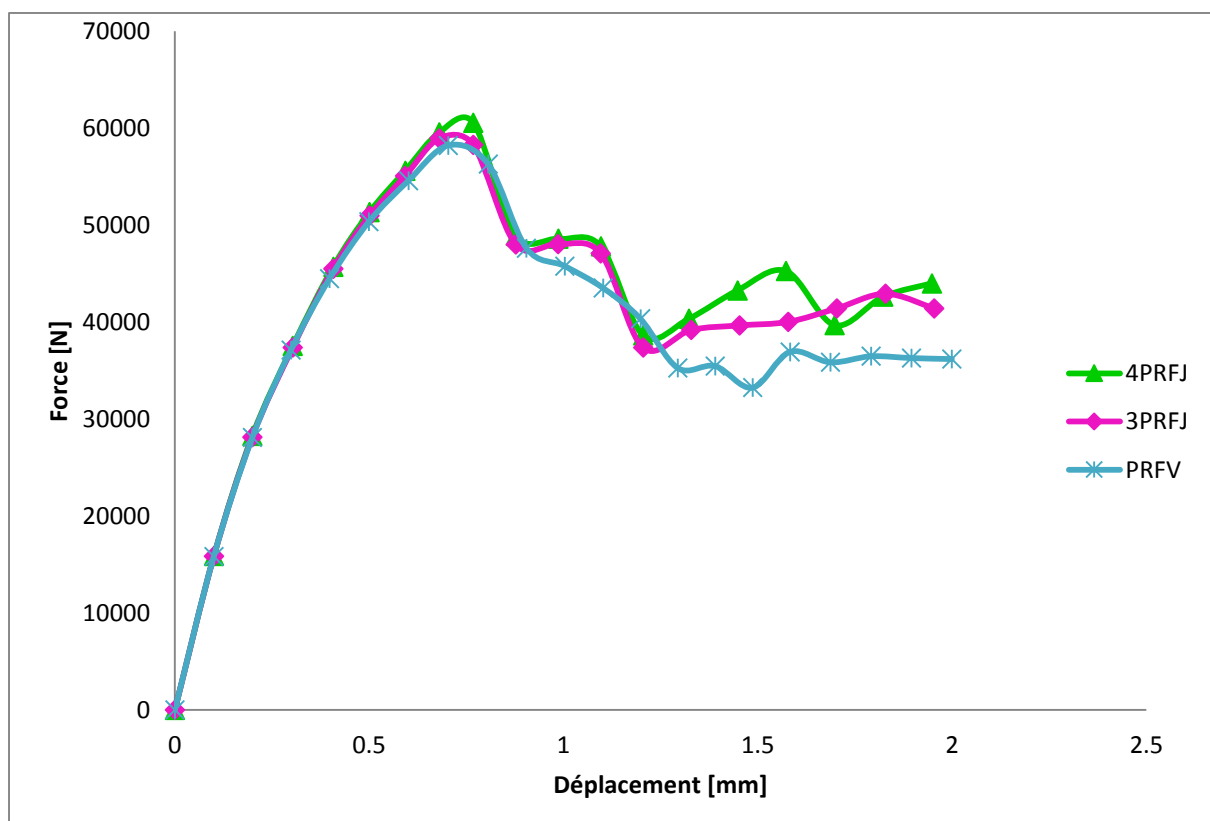
**Tableau III.2** : Résistances selon l'épaisseur du PRF.

Modèle	Force (KN)
TEMOIN	55,98
PRFV	58,22
1PRFJ	55,97
2PRFJ	57,27
3PRFJ	58,94
4PRFJ	60,56

Un gain de résistance est, ainsi, obtenu pour chaque épaisseur par rapport à la poutre témoin, sauf pour la poutre renforcée avec une plaque de PRFJ qui donne la même résistance que le témoin. Les gains obtenus pour les modèles avec deux, trois et quatre plaques sont 2.3%, 5.29% et 8.18% respectivement.

Un gain en termes de déformabilité, au pic, est enregistré notamment pour la poutre renforcée avec 4 plaques de PRFJ, il atteint 9.11%, ce qui renseigne sur l'amélioration de la ductilité.

D'après les résultats précédents, il apparaît clairement que seuls les renforcements avec PRFJ de trois et quatre plaques sont en mesure de concurrencer celui avec PRFV. Une superposition des courbes de ces trois cas est faite comme le montre la **figure 3.21**.

**Figure III.21** : Confrontation des résultats du PRFJ et ceux du PRFV pour la variable épaisseur.

Le renforcement avec 3 ou 4 plaques de PRFJ offre un gain en résistance notamment pour ce dernier cas, par rapport au renforcement avec PRFV Il a été montré qu'à une plaque de PRFV, il est possible de substituer un minimum de 3 plaques de PRFJ, puisqu'on obtient un apport en résistance de 1.23 % ou carrément par 4 plaques de PRFJ avec un apport de 4.02%. Le renforcement offre également une amélioration en termes de ductilité.

### III.3. Effet de la longueur du PRFJ

Plusieurs longueurs de PRFJ sont testées dans le but de déduire la meilleure variante qui donnerait la meilleure résistance et pourrait, de ce fait, concurrencer le PRFV de longueur 100 cm. Ainsi, les longueurs de PRFJ de 115 cm, 100 cm, 70 cm et 40 cm ont été considérées. Les résultats obtenus en matière de mode de rupture, état des contraintes et courbes force-déplacement sont donnés pour chaque longueur.

#### III.3.1. Modèle renforcé de longueur 115 cm

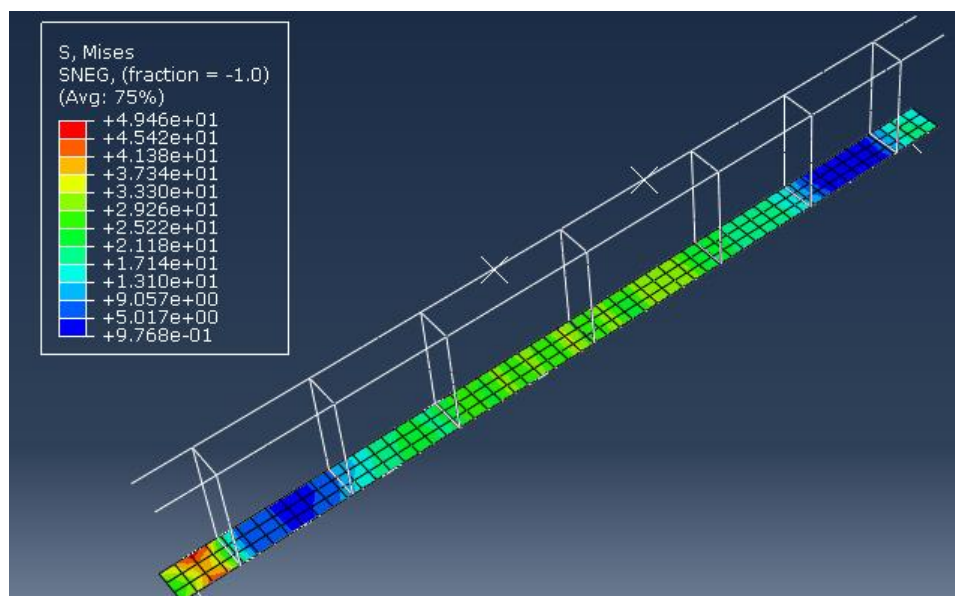


Figure III.22 : Etat de contrainte du modèle PRFJ de 115 cm.

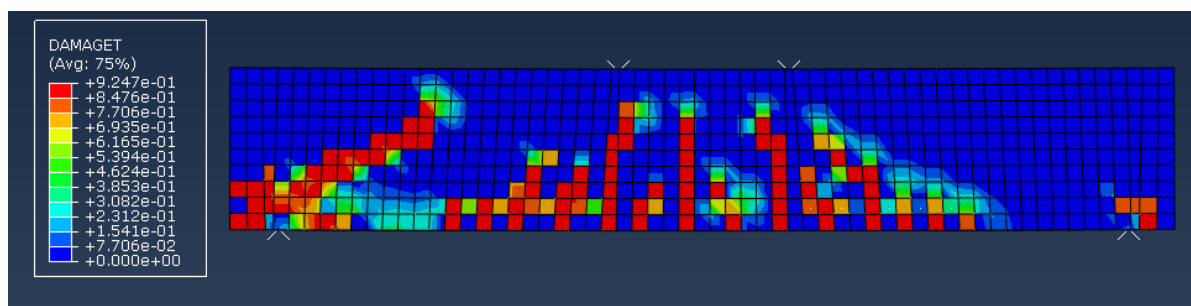


Figure III.23 : Mode de rupture du modèle PRFJ de 115 cm.

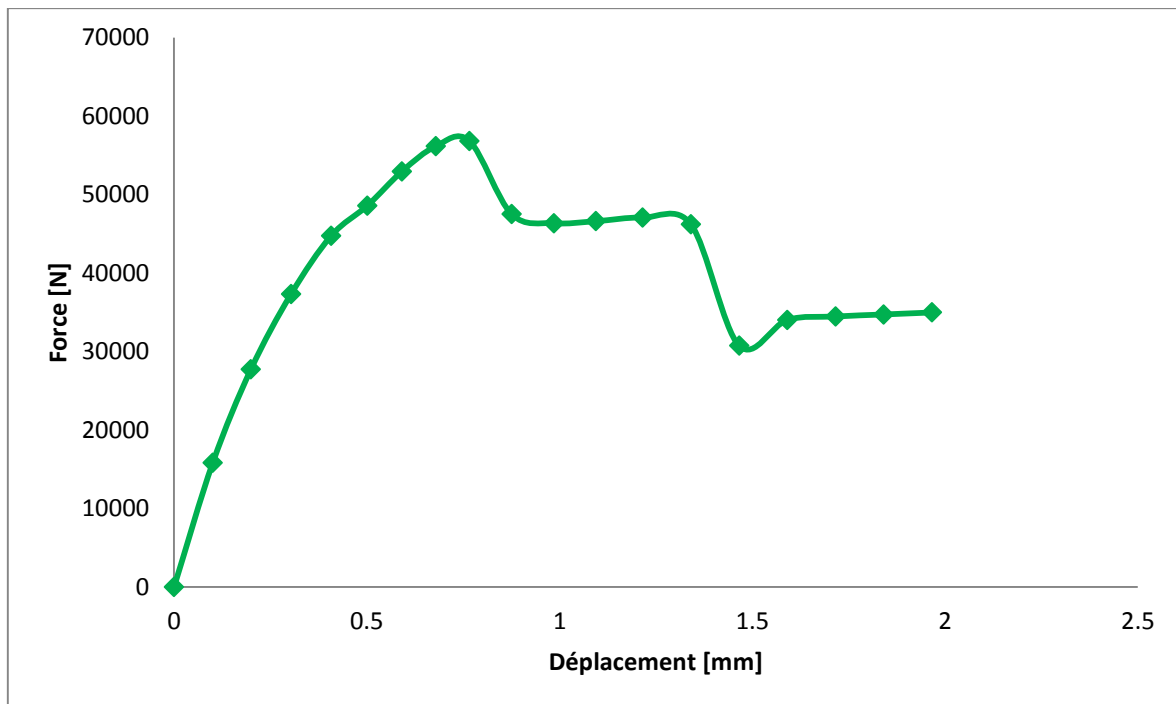


Figure III.24 : Courbe Force-Déplacement du modèle PRFJ de 115 cm.

### III.3.2. Modèle renforcé de longueur 100 cm

Les résultats de ce modèle ont déjà été donnés précédemment dans le paragraphe III.1.3.

### III.3.3. Modèle renforcé de longueur 70 cm

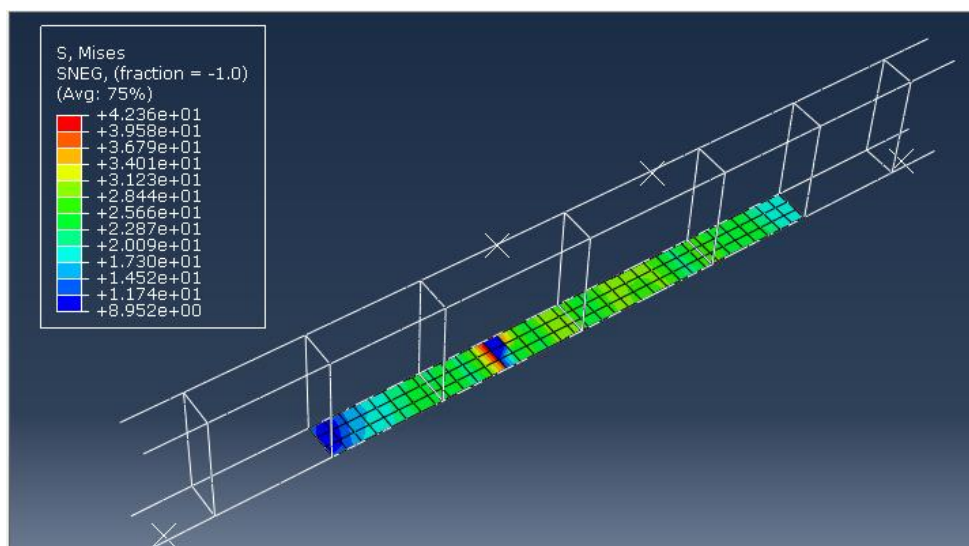


Figure III.25 : Etat de contrainte du modèle PRFJ de 70 cm.

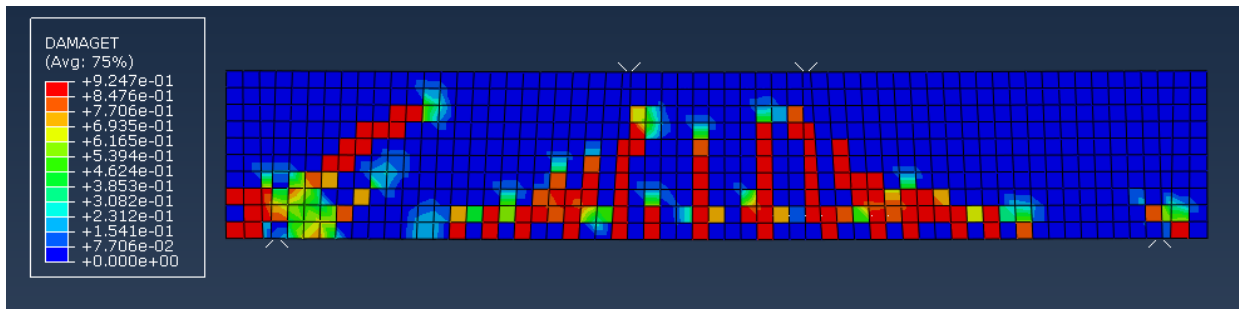


Figure III.26 : Mode de rupture du modèle PRFJ de 70 cm.

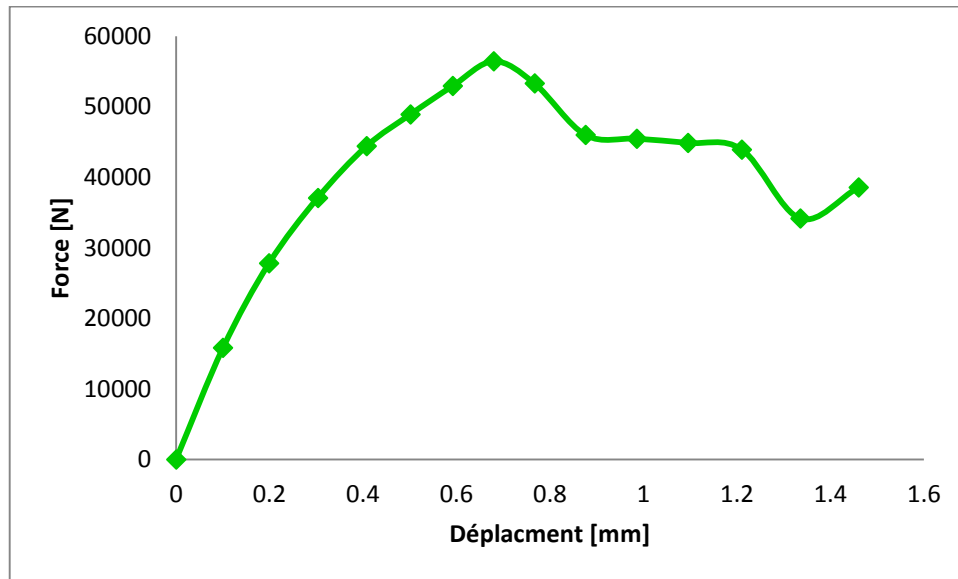


Figure III.27 : Courbe Force-Déplacement du modèle PRFJ de 70 cm.

### III.3.4. Modèle renforcé de longueur 40 cm

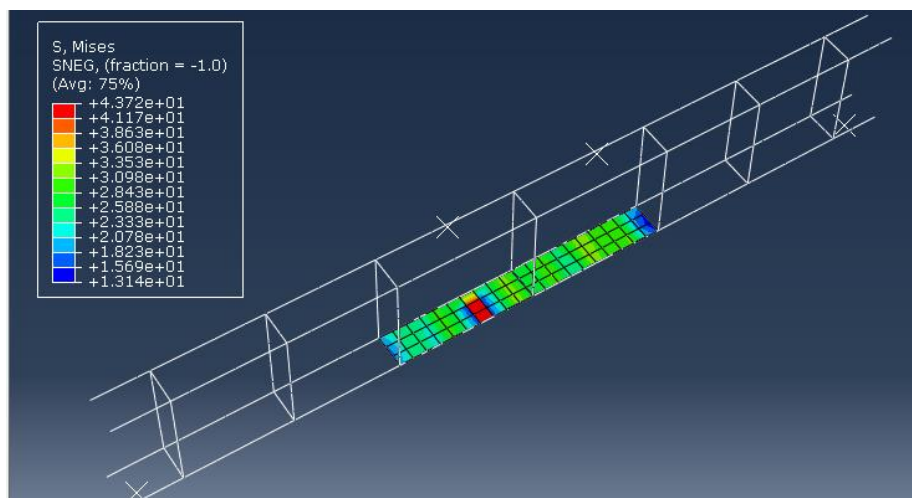


Figure III.28 : Etat de contrainte du modèle PRFJ de 40 cm.

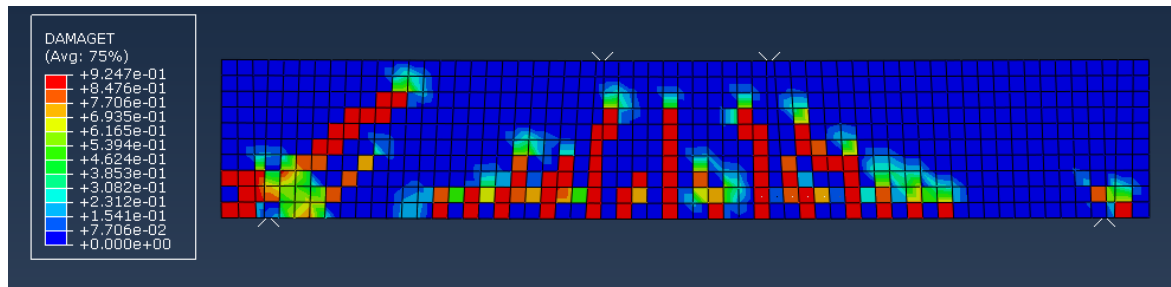


Figure III.29 : Mode de rupture du modèle PRFJ de 40 cm.

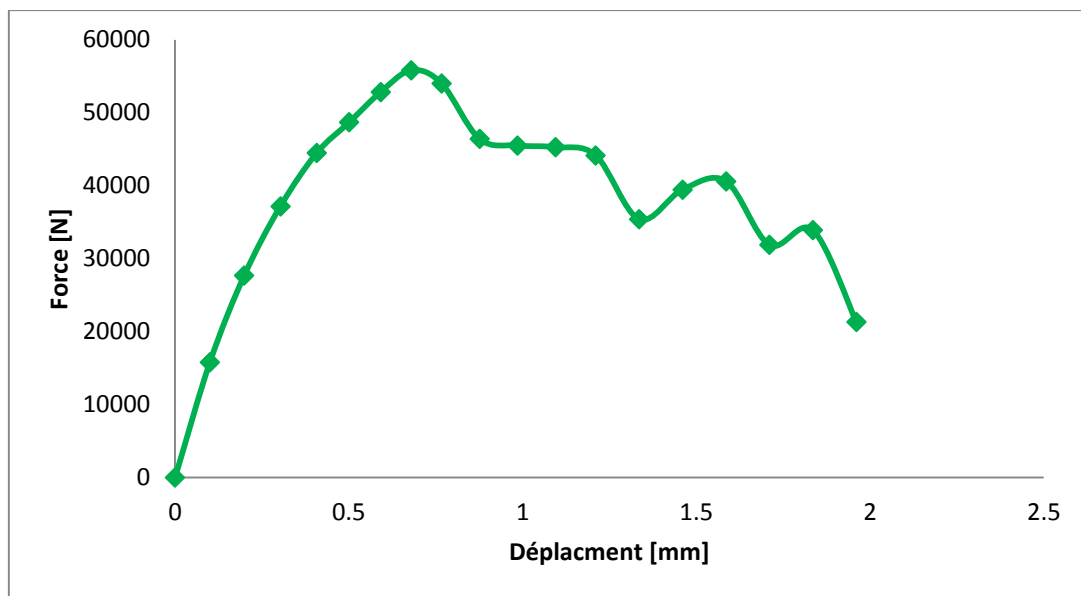


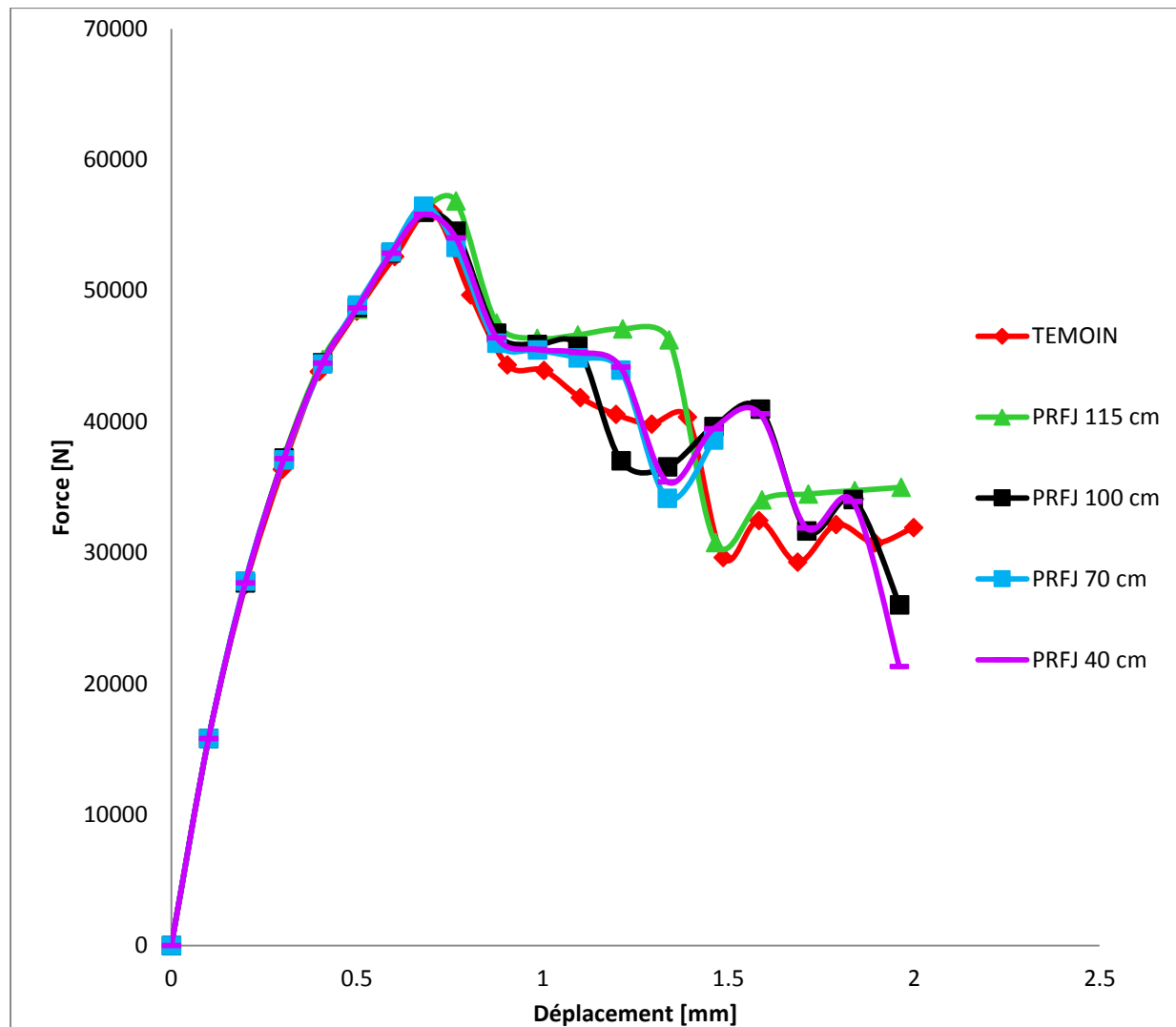
Figure III.30 : Courbe Force-Déplacement du modèle PRFJ de 40 cm.

### III.3.5. Confrontation des résultats

Les résultats de la résistance en flexion pour les trois poutres sont consignés dans le **tableau III.3**, tant dis que la confrontation des courbes force-déplacement de ces modèles est donnée par la **figure III.31**.

Tableau III.3 : Résistance selon la longueur du PRF.

Modèle	Force (kN)
TEMOIN	55,98
PRFV	58,22
PRFJ de 115cm	56,83
PRFJ de 100cm	55,97
PRFJ de 70cm	56,44
PRFJ de 40cm	55,81



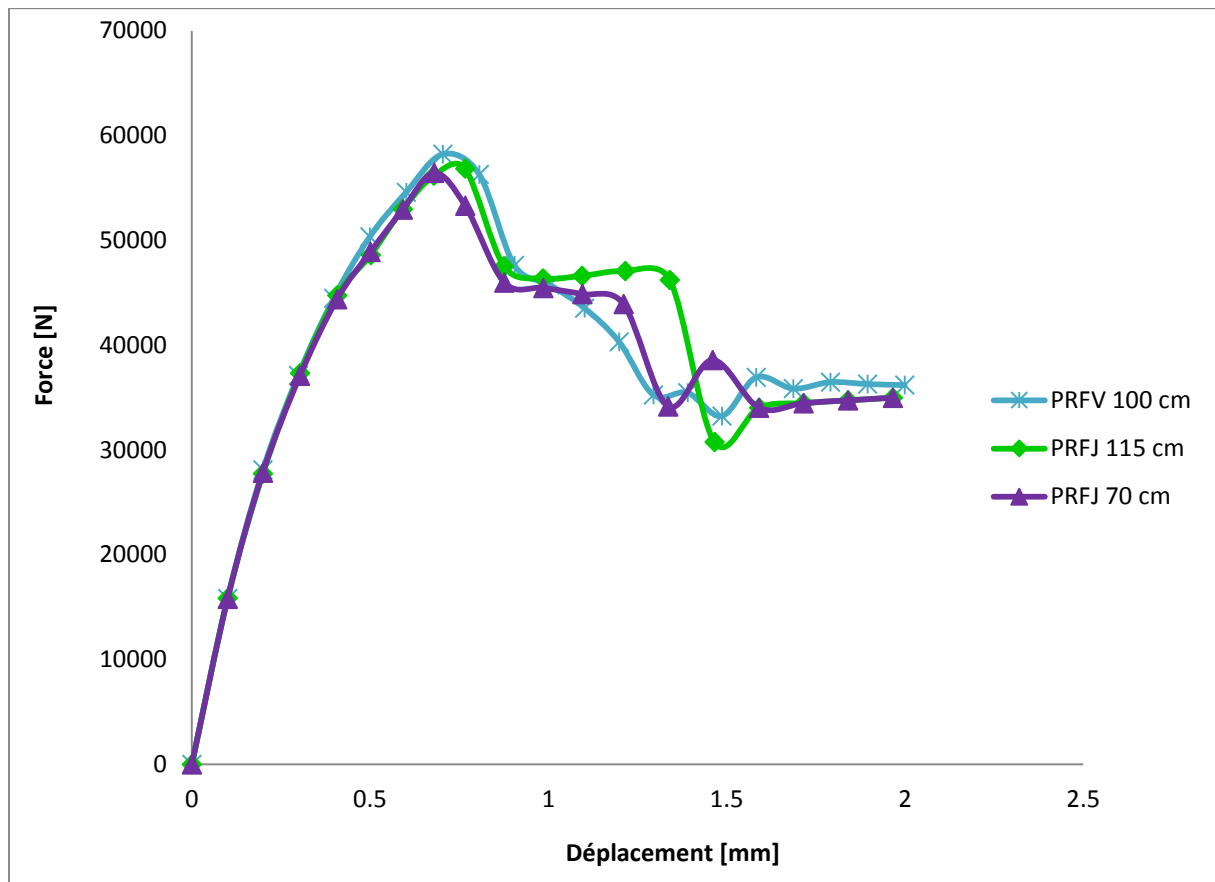
**Figure III.31 :** Confrontation des résultats pour la variable longueur du PRFJ.

Il semblerait que la résistance mécanique et la ductilité dépendent de la longueur et que la rupture se dirige de plus en plus vers le cisaillement, ce qui indique que le renforcement en flexion est réussi. L'avantage du renforcement interne avec PRF, est qu'il offre la possibilité d'augmenter la longueur sollicitée, sans pour autant se soucier de la proximité des appuis, auquel pour un renforcement externe avec PRF le décollement se produit.

Les résultats montrent que toutes les poutres renforcées présentent une résistance en flexion au moins identique à celle de la poutre témoin.

La meilleure résistance est obtenue pour la longueur de 115 cm de PRFJ, mais reste inférieure à celle de la poutre renforcée avec PRFV de 100 cm de longueur tel que montré par la **figure III.32** qui comporte une confrontation des courbes de la poutre renforcée avec PRFV et celles des deux poutres renforcées avec PRFJ, qui ont présenté les meilleures résistances. Il s'agit des poutres renforcées avec des PRFJ de 115 cm et 70 cm respectivement.

La ductilité des poutres renforcées semble être améliorée, on obtient ainsi, un gain en déformations, au pic, avoisinant 8.9%.



**Figure III.32 :** Confrontation des résultats du PRFV et ceux du PRFJ pour la variable longueur 115 cm.

Les gains de résistance, par rapport à la poutre témoin, des poutres renforcées avec PRFJ de longueur 115 cm et 70 cm sont de 1.15% et 0.82% respectivement. Par contre les écarts, en pourcentage, de la résistance par rapport à la poutre renforcée avec PRFV, sont de 2.44% et 3.15% respectivement. Ce qui montre que ces deux poutres renforcées avec PRFJ sont relativement identiques à celle renforcée avec PRFV.

#### III.4. Effet de l'interaction des deux paramètres

Dans le but d'optimiser ce type de renforcement pour satisfaire à la fois le critère de la résistance, de l'économie ainsi que du respect de l'environnement, une combinaison de la meilleure épaisseur du PRFJ et de sa meilleure longueur est testée. Une poutre renforcée avec 4 couches de PRFJ ayant une longueur de 115 cm est calculée. Les résultats obtenus sont donnés par les **figures III.33, III.34 et III.35**.

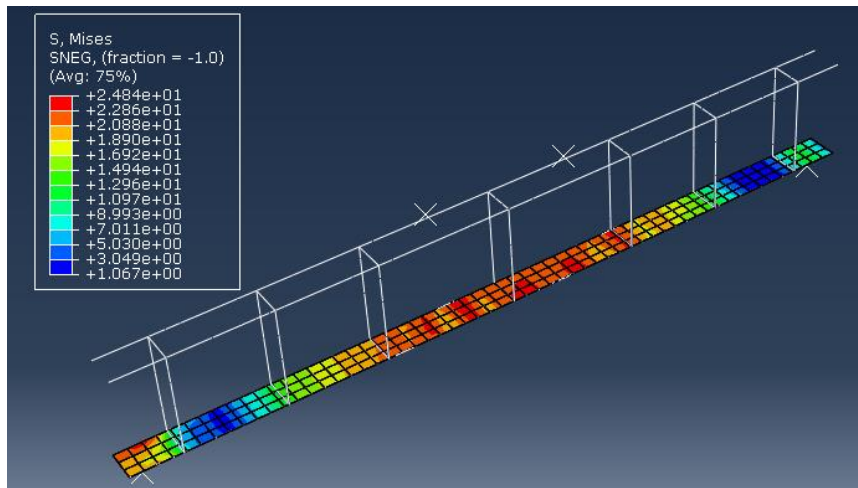


Figure III.33 : Etat de contrainte du modèle optimal renforcé par un PRFJ.

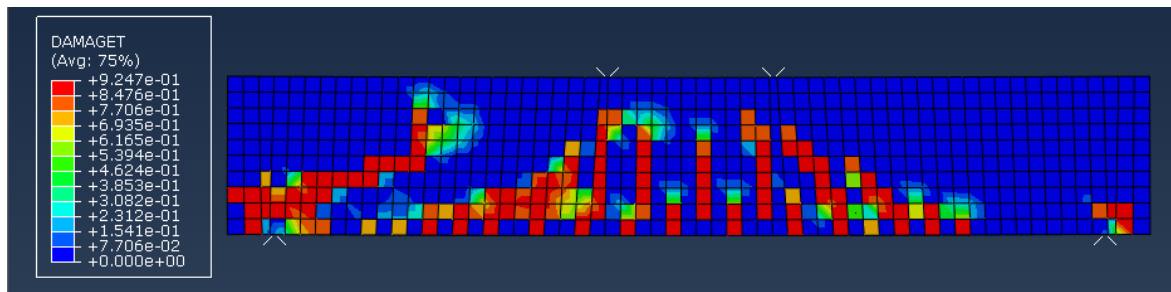


Figure III.34 : Mode de rupture du modèle optimal renforcé par un PRFJ.

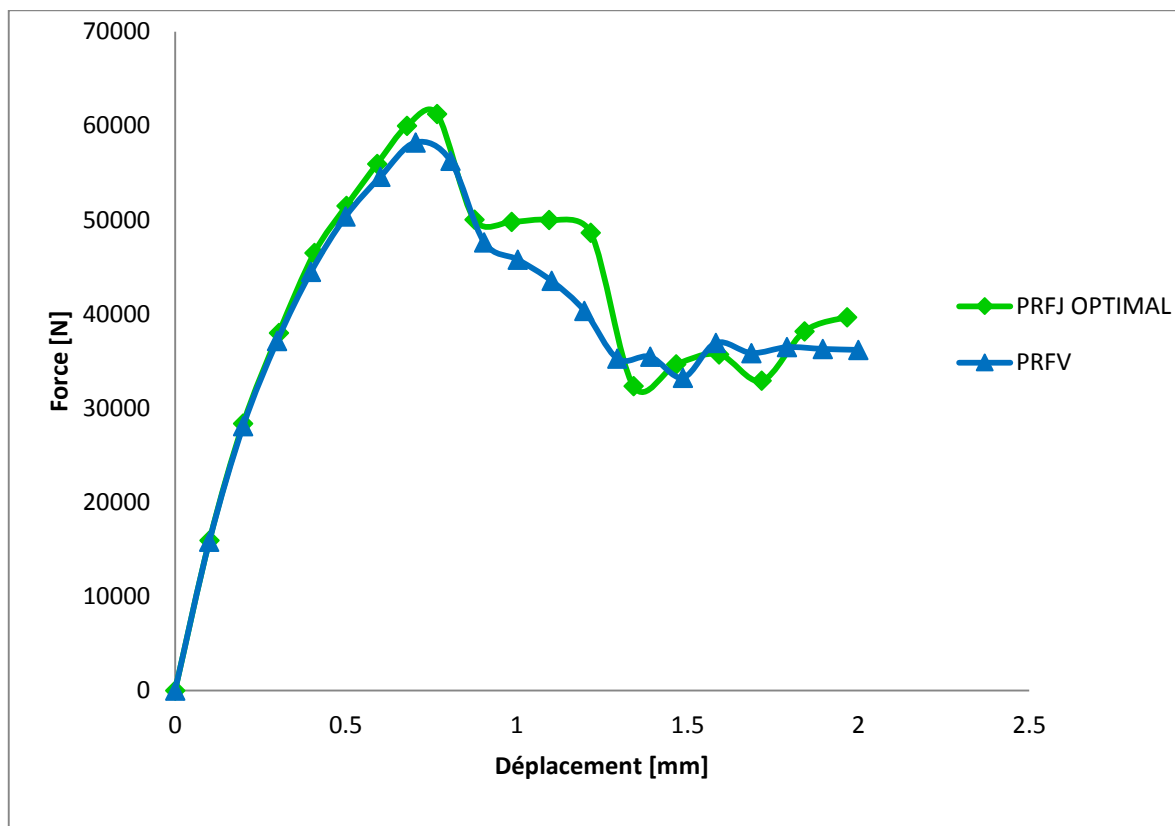


Figure III.35 : Confrontation des résultats de la poutre renforcée optimale et ceux de la poutre renforcée avec PRFV.

**Tableau III.4:** Résultats de la combinaison de l'épaisseur et de la longueur du PRFJ.

Modèle	Force (KN)
PRFV	58,22
PRFJ optimal	61,24

Visiblement, la combinaison des deux paramètres donne la meilleure résistance en comparaison avec toutes les variantes testées. En effet, on enregistre dans ce cas, un gain de 9.4 % par rapport à la poutre témoin. Par ailleurs, cette poutre présente un gain de 5.2 % par rapport à la poutre renforcée avec le PRFV, ce qui conforte l'idée de la possibilité du remplacement du PRFV par le PRFJ.

### III.5. Evolution des dommages

Afin de mieux visualiser l'étendue des dommages sur les deux modèles, de référence et renforcé, cinq étapes de la simulation sont illustrées sur la **figure III.36**, pour le modèle renforcé avec 4 couches de PRFJ en guise d'exemple.

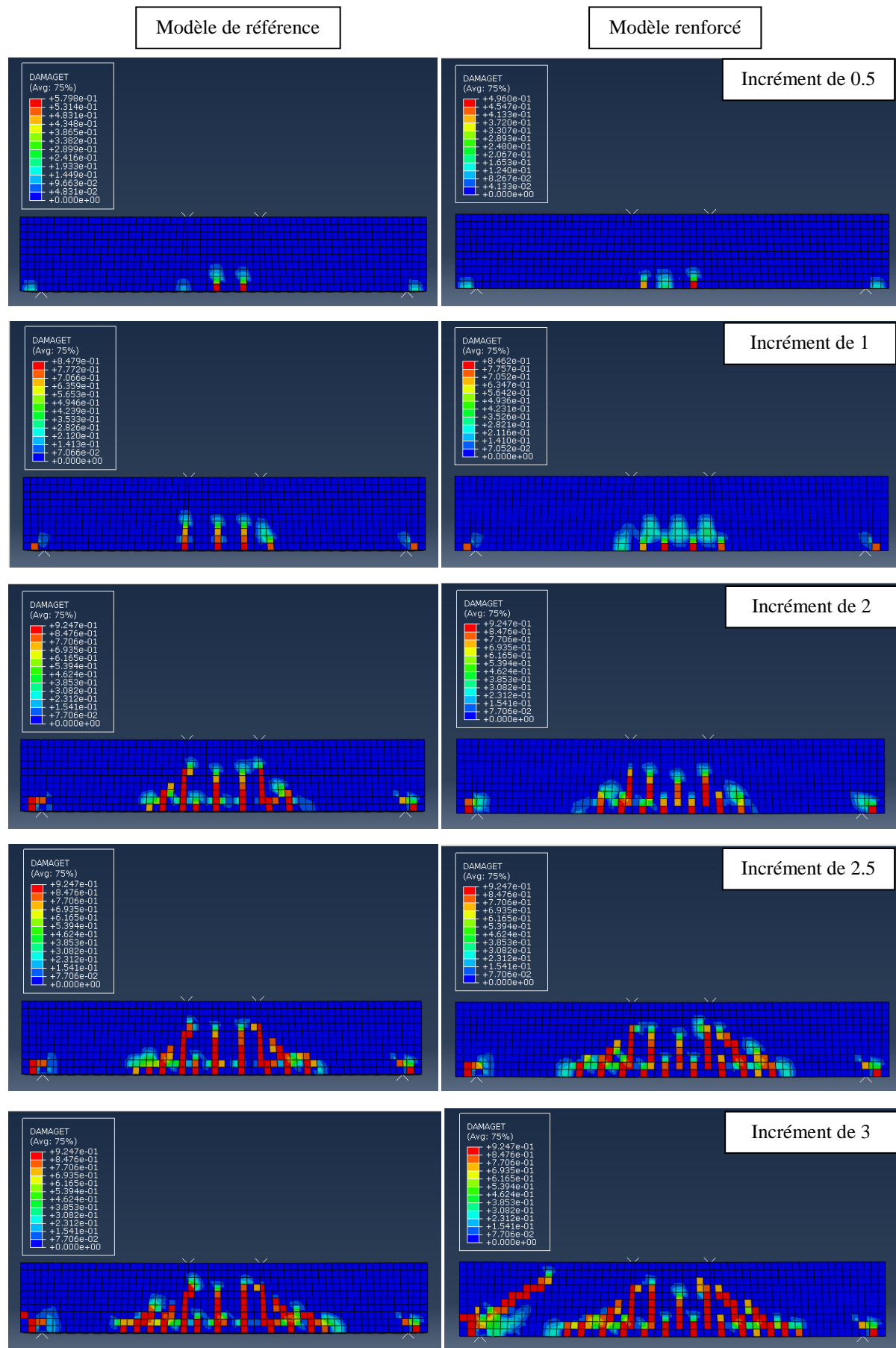


Figure III.36 : Evolution des dommages.

L'analyse des graphiques montre que les dommages pour le modèle renforcé sont retardés par rapport au modèle de référence. Ils sont, de plus, moins intenses pour le modèle renforcé. Il est à noter qu'à la dernière étape, des dommages en cisaillement, sur le modèle renforcé, apparaissent. Ce phénomène a été observé dans tous les modèles renforcés étudiés. Ceci peut être expliqué par le fait que le renfort agit efficacement en flexion si bien qu'il dirige la rupture vers le cisaillement.

### III.6. Evolution des déplacements

Dans cette section, les déplacements des deux modèles précédents sont illustrés par la **figure III.37**, puis des valeurs sont données dans le **tableau III.5**, afin de mieux percevoir la différence entre eux.

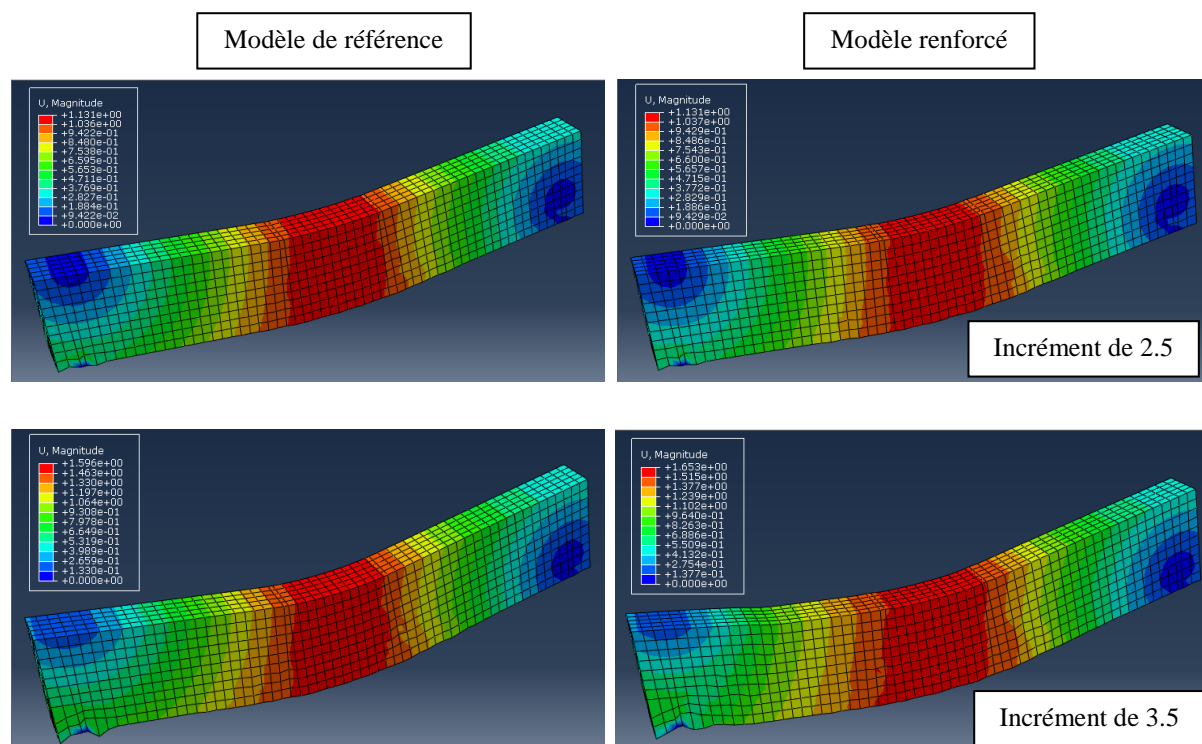


Figure III.37 : Evolution des déplacements globaux.

Tableau III.5 : Forces maximales et leurs déplacements respectifs.

Modèle	Force max [KN]	Déplacement [mm]
Modèle de référence	55,980498	0,70366836
Modèle renforcé	60,5648613	0,7677747

Il est évident que le modèle renforcé soit plus résistant, cependant, une amélioration en terme de déplacement est remarquée. En effet, l'amélioration au pic est de 8.89%, ce qui peut indiquer une amélioration de la ductilité de la poutre.

### **Conclusion**

Les PRF ont un apport important en termes de résistance et de ductilité de poutres renforcées en flexion. La fibre de jute possède d'assez bonnes aptitudes lui permettant de rivaliser avec celle du verre. Cependant, pas moins de trois plaques de jute sont nécessaires pour y arriver.

L'idée de faire varier les longueurs du PRFJ n'est pas à exclure. Sans se soucier du problème de décollement, il a été possible de le modéliser avec une longueur optimale afin d'obtenir un maximum de résistance. Par ailleurs, la combinaison de la meilleure longueur et de la meilleure épaisseur de PRFJ a donné une solution optimale, qui donne, non seulement la meilleure résistance, mais aussi la solution alternative à l'utilisation d'une couche de PRFV de même longueur.

---

# **Conclusion générale et perspectives**

---

### Conclusion générale et perspectives

Le béton a la particularité de se combiner avec d'autres matériaux de plusieurs façons tout en s'imprégnant de leurs propriétés. A cause de sa faible résistance en traction, sa combinaison avec ces derniers devient indispensable.

L'apport des tissus en PRF est assez intéressant en termes de résistance et de déformabilité. En général, des plaques de PRF sont directement collées à la surface du béton. Cependant, l'inconvénient principal de cette configuration est le décollement du PRF, la cause en général est que le PRF est soit trop proche, soit trop éloigné des points d'appuis, ce qui provoque une rupture soudaine et dangereuse de la structure. La configuration du PRF interne que propose cette étude arrive à éliminer complètement ce problème sans se soucier du facteur distance des points d'appuis. Ces procédés font, classiquement, intervenir des fibres synthétiques telles que le verre ou le carbone. Néanmoins, la fabrication des fibres synthétiques est coûteuse et demande une grande consommation énergétique, ce qui a pour conséquence d'affecter notre environnement. Les fibres végétales quant à elles sont exactement à l'opposé, il suffit d'optimiser leur utilisation pour qu'elles deviennent un substitut potentiel aux fibres synthétiques.

La fibre de jute et les fibres végétales, en général, demeurent des matériaux valables pour la construction puisqu'elles sont économiques et écologiques. Ne possédant pas une résistance équivalente aux fibres synthétiques, il a fallu miser sur leur quantité afin de pouvoir concurrencer avec ces dernières. Il a fallu, donc dans cette étude, faire varier les caractéristiques géométriques du PRF à base de fibres de jute, en matière d'épaisseur et de longueur, afin de trouver la variante qui pourrait remplacer le PRF à base de fibres de verre utilisé dans le renforcement de poutres en béton.

Plusieurs expériences ont été ainsi menées grâce à l'analyse numérique du logiciel ABAQUS, afin de simuler le comportement de ces poutres renforcées avec PRF. Les résultats de cette analyse numérique, ont permis un certain nombre de conclusions.

En effet, le renforcement interne, en flexion, de poutres en béton avec des PRF à base de fibres de verre, a montré une amélioration dans la résistance des poutres, puisqu'on obtient un apport de 4% pour une plaque de PRFV.

Il en est, également, ressorti que la résistance de la poutre est proportionnelle à l'épaisseur du PRFJ. Il a été aussi montré qu'à une plaque de PRFV, il est possible de substituer un minimum de 3 plaques de PRFJ, puisqu'on obtient un apport en résistance de 1.23 % ou carrément par 4 plaques de PRFJ avec un apport de 4.02%.

Aussi, une plaque de PRFV de 100 cm présente une résistance quasi identique à celle d'une plaque de PRFJ de 115 cm de longueur.

Une optimisation de la configuration de renforcement a été envisagée, puisqu'une combinaison des deux meilleures variantes de renforcement pour l'épaisseur du PRF et sa longueur a été retenue. La poutre renforcée avec 4 plaques de PRFJ de 115 cm de longueur apporte un gain de résistance de l'ordre de 5.2%.

Pour corroborer notre travail de recherches, des travaux complémentaires devraient être réalisés. Nous suggérons, en guise de perspectives, de :

- Conforter les résultats de cette étude numérique par une étude expérimentale;
- Reprendre les mêmes procédures avec d'autres fibres végétales;
- Tester d'autres valeurs de la longueur du PRFJ, afin d'optimiser au mieux ce renforcement;
- Essayer de combiner ce type de renforcement avec un renforcement à l'effort tranchant, puisque dans les poutres testées, le mode de rupture montre que la rupture se dirige vers une rupture par cisaillement;
- Faire une étude technico-économique approfondie pour démontrer la rentabilité de cette technique;
- Comparer les résultats avec un modèle ayant subi un renforcement externe en commençant par une poutre isostatique et aller en augmentant le nombre d'appuis, ce qui a pour conséquence l'interruption du renforcement externe à chaque appui;
- Etudier les risques de glissement et le comportement à long terme des structures en béton armé renforcées par les PRF notamment le fluage et la fatigue.

---

# **Références bibliographiques**

---

### Références bibliographiques

- [1] **De Luca, A. and Nanni, A.**, Single-Parameter Methodology for the Prediction of the Stress-Strain Behavior of FRP-Confined RC Square Columns, *Journal of Composites for Construction*, 15(3), 2011, p. 392.
- [2] **Pham, T. M. and Hadi, M. N. S.**, Predicting Stress and Strain of FRP Confined Rectangular/Square Columns Using Artificial Neural Networks, *Journal of Composites for Construction* 2014a, 18(6).
- [3] **Pham, T. M. and Hadi, M. N. S.**, Stress Prediction Model for FRP Confined Rectangular Concrete Columns with Rounded Corners, *Journal of Composites for Construction* 2014b, 18(1).
- [4] **Teng, J. G., Jiang, T., Lam, L., and Luo, Y. Z.**, Refinement of a Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete, *Journal of Composites for Construction*, 13(4), 2009, p. 269.
- [5] **Wu, Y. F. and Zhou, Y. W.**, Unified Strength Model Based on Hoek-Brown Failure Criterion for Circular and Square Concrete Columns Confined by FRP, *Journal of Composites for Construction*, 14(2), 2010, p. 175–84.
- [6] **Mirmiran, A. et Shahawy, M.** (1997) “Behavior of concrete columns confined by fiber composites”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No.5, pp. 583-590.
- [7] **NEZAR RAMZI**. Renforcement des poutres en béton armé par polymères renforcés des fibres (PRF) en flexion simple. Mémoire présenté pour l’obtention du diplôme de Master. UNIVERSITE L’ARBI BEN M’HIDI OUM EL BOUAGHI. Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, département de Génie Civil. 2018.
- [8] **SEREIR, Z.** Modèle d’optimisation du volume des plaques en HFRP par MEF. Congrès Français de Mécanique, 6. 2013.

- [9] **D. Poineau.** Consultant. Le traitement des fissures Info-flash STRRES. 25 octobre 2017.
- [10] **MM. Adto et Hermal.** 40 plans de Plans, commentaires & astuces déco maison. 2013.
- [11] **Abdlmadjid SI SALEM.** Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation. Thèse de Doctorat 3ème Cycle L.M.D. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, faculté de génie de la construction, département de génie civil. Mars 2016.
- [12] **Jesse. F, Curbach. M** « Strength of continuous AR-glass-fibre reinforcement for cementitious composites”, RILEM International Workshop High Performance Fiber reinforced cement composite 12, 337-348, 2003.
- [13] **Jeau-Noél Theillot.** Renforcement des structures à l'aide de plat métallique collé.
- [14] **Ze Yi Wu.** Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. Français. NNT : 2004ENPC0021 pastel-00001266.
- [15] **Arduini M., Nanni A.** (1997), Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon, FRP sheets, ASCE Journal of Composites for Construction, May 1997.
- [16] **J.M. Berthelot.** « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN: 2-7430-0771-0. pp 72.
- [17] **Yim J-H, Cho S-Y, Seo Y-J et. Jang B-Z.** "A study on material damping of 0° laminated composite sandwich cantilever beams with a viscoelastic layer". Composites structures 2003; 60:367-374.
- [18] **DENIS ABRY.** Présentation général d'Abaqus. Formation des masters; école central de paris. 2008.

- [19] **PATRICKH ROZICHI**. Formation ABAQUS ; Université de Nantes . France 2007.
  
- [20] **MEFTEH KAMEL**. Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.
  
- [21] **MEFTEH KAMEL**. Présentation Abaqus. Formation des masters ; université de Biskra .2014.
  
- [22] **ABAQUS**. Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit, élève ingénieur ; université de Nantes. 2007.
  
- [23] **STEPHANE BOUCHARE**. Descriptif ABAQUS ; École d'ingénieurs en génie industrie. Bretagne. 2012.
  
- [24] **MICKAEL ABBAS**. Principe et fonctionnement ABAQUS .université de technologie de Compiègne .2011.

