

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2023

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

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA  
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'études  
Présenté par :

Melle. KHELEFI Samah  
Melle. BADIS Asma

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2  
**Filière** : Génie Civil  
**Spécialité** : Structures

Thème :

**Simulation numérique du comportement des poutres en béton de fibres  
métalliques courtes alignées**

**Devant le jury composé de :**

Dr. . M OUSSAOUI. F	UAMOB / GENIE CIVIL	PRESIDENT
Pr. AIT TAHAR . K	UAMOB / GENIE CIVIL	ENCADREUR
Dr. BOUAMRA. Y	UAMOB / GENIE CIVIL	CO- ENCADREUR
Mme. AIT AHMED. F	UAMOB / GENIE CIVIL	EXAMINATRICE

**Soutenu le 13/09/2023**

*Année Universitaire 2022-2023*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père.*

*Ma chère mère*

*Mes frères : Nabil , Hamza et Abdennour*

*Mes sœurs : Maroua , Hafida , et Asma*

*Mes neveux : Louai , Koussai*

*Ma binôme : Samah et sa famille.*

*Mes collègues: Samah , Fatima , Sara , Halima*

*Enfin a tous ceux qui me sont cher et qui m'ont aidé de  
près ou de loin*

*Asma*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père.*

*Ma chère mère*

*Mes frères : Zakaria , Nedjemeddine*

*Mes sœurs : Chaima , Rahil , Hiba , Israa , Malak*

*Ma binôme Asma et sa famille.*

*Mes collègues que j'oublierais jamais : Asma , Fatima ,  
Sara , Halima*

*Mes amis : Meriem, Randa, Cherifa, Hanane*

*Enfin a tous ceux qui me sont cher et qui m'ont aidé de  
près ou de loin*

*Samah*

# Remerciement

*Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements :*

*Avant tous, nous remercions ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.*

*A nos familles : qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études.*

*A nos promoteurs monsieurs : **Ait tahar.K** et **Bouamra.Y** pour avoir accepté de nous guider sur le bon chemin du travail.*

*Aux membres de jury : pour avoir accepté de juger notre travail.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

## **Résumé**

L'étude du béton renforcé de fibres métalliques (BFM) intéresse de nombreux chercheurs dans le domaine des éléments de structure. Cependant, l'évaluation correcte de la contribution des éléments BFM en termes de durabilité, de capacité de déformation et de capacité de charge est encore difficile et nécessite de nombreuses recherches. Pour la plupart des travaux effectués, le matériau BFM est amené sur toute la section transversale ; sur toute la poutre ou seulement dans la partie sollicitée. Le but des travaux présentés ici est de montrer qu'il est acceptable d'appliquer le BFM à une certaine hauteur de la zone de tension des poutres à partir d'un point de rentabilité.

Pour résoudre le problème présenté, les travaux de recherche s'appuient sur des simulations numériques, qui d'une part étudient le comportement mécanique et les mécanismes de rupture et, d'autre part, valident l'approche multicouche de renforcement des poutres en béton avec des fibres métalliques courtes ciblées. .

En résumé, la décomposition de la hauteur de la zone de tension de la poutre en plusieurs couches de même épaisseur sous l'influence de la position de la couche de fibres par rapport à l'axe neutre permet de souligner l'amélioration de la résistance, ce qui permet l'optimisation de la couche de renfort pour obtenir une meilleure performance de la pièce face aux charges externes. La concentration des contraintes est toujours obtenue à partir de la partie médiane de la poutre.

**Mots clés** : Béton - Fibres métalliques – multicouches- rupture - Simulation numérique

**Abstract:**

Research on metal fiber concrete (BFM) currently arouses the interest of many researchers in the field of structural components. However, correct assessment of the contribution of elements in BFM in terms of resistance, deformability and load-bearing capacity remains difficult and still requires extensive research. In most of the work performed, BFM material is placed throughout the cross-section; along the beam or only in the tensile sections. The work presented here aims to show that, in terms of economic efficiency, it makes sense to apply BFM to a certain height in the tension zone of the beam.

In order to address the questions raised, this study is based on numerical simulation that on the one hand study the mechanical behavior and fracture mechanisms and on the other hand validates the method of multi-layer reinforcement of concrete beams by aligned short beams. metal fiber

In summary, dividing the height of the tension zone of the beam into several layers of equal thickness can highlight the influence of the position of the fiber bed relative to the neutral axis on improving resistance, thereby optimizing the tensile strength of the beam. Reinforcement layer enables the section to obtain better resistance to external loads. The stress concentration is always determined in the middle of the beam.

**Key words:** Concrete - Metal fibers - Multi-layer - bearing - Numerical simulation

## ملخص

تعتبر دراسة خرسانة الألياف المعدنية (BFM) محل اهتمام العديد من الباحثين في مجال العناصر الإنشائية. ومع ذلك، فإن التقييم الصحيح للمساهمة من حيث المقاومة والتشوه والقدرة على تحمل عناصر BFM لا يزال صعباً ولا يزال يتطلب الكثير من البحث. في معظم الأعمال التي يتم تنفيذها، يتم إدخال مادة تلقي اقتراحات المستفيدين وملاحظاتهم وشكاويهم في جميع أنحاء المقطع العرضي؛ على طول العارضة، أو في الجزء المشدود فقط. يهدف العمل المقدم هنا إلى إظهار أنه من حيث الربحية، فمن الحكمة تطبيق آلية تلقي اقتراحات المستفيدين وملاحظاتهم وشكاويهم حتى ارتفاع معين في منطقة التوتر للحزم.

للإجابة على المشكلة المطروحة، تعتمد الدراسة على عمليات محاكاة عددية أجريت، من ناحية، لدراسة السلوك الميكانيكي وآليات التمزق، ومن ناحية أخرى، التحقق من صحة النهج متعدد الطبقات لتعزيز العتبات. الخرسانة بواسطة ألياف معدنية قصيرة متماسكة.

ففي الختام، فإن تحليل ارتفاع منطقة توتر الحزمة إلى عدة طبقات متساوية السماكة يجعل من الممكن تسليط الضوء على تأثير موضع طبقة الألياف بالنسبة للمحور المحايد في تحسين المقاومة، مما يجعلها من الممكن تحسين طبقة التسليح لتحسين أداء القسم فيما يتعلق بالأحمال الخارجية. يتم دائماً الحصول على تركيز الإجهاد في الجزء المركزي من الحزمة

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة - ألياف معدنية - متعدد الطبقات - ثني - نمذجة عددية

# LISTE DES TABLEAUX

<b>TABLEAU I.1</b> LES COMPOSANTS DE BETON .....	7
<b>TABLEAU II.1</b> PARAMETRES UTILISES POUR DEFINIR LE COMPORTEMENT DU BETON ET LES FIBRES .....	25



# LISTE DES FIGURES

<b>FIGURE I.1.</b> CIMENT .....	8
<b>FIGURE I.2.</b> DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS SELON LEURS NATURES .....	9
<b>FIGURE I.3.</b> TYPES DE FIBRES .....	11
<b>FIGURE I.4.</b> FIBRES : (A). FIBRES METALLIQUES, (B). FIBRES DE VERRE, (C). FIBRES DE CARBONE.....	12
<b>FIGURE I.5.</b> FIBRES DE POLYMERES: (D). PLASTIQUES, (E). FIBRES EN CAOUTCHOUC, (F). FIBRES DE POLYPROPYLENE.....	13
<b>FIGURE I.5.</b> FIBRES AGRO-RESSOURCES .....	13
<b>FIGURE I.6.</b> TYPES DE FIBRES METALLIQUES .....	15
<b>FIGURE I.7.</b> QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DES BETONS DE .....	17
<b>FIGURE II.1.</b> MODULE PART .....	20
<b>FIGURE II.2.</b> MODULE PROPERTY .....	20
<b>FIGURE II.3.</b> MODULE ASSEMBLY .....	21
<b>FIGURE II.4.</b> MODULE STEP .....	21
<b>FIGURE II.5.</b> MODULE INTERACTION .....	22
<b>FIGURE II.6.</b> MODULE LOAD.....	22
<b>FIGURE II.7.</b> MODULE MESH .....	23
<b>FIGURE II.8 .</b> LE MODULE JOB.....	23
<b>FIGURE II.9.</b> MODULE VISUALISATION.....	24
<b>FIGURE II.10.</b> MODE CHARGEMENT.....	26
<b>FIGURE II.11.</b> VARIANTE N°1 : POUTRE DE REFERENCE ( P-REF).....	27
<b>FIGURE II.12.</b> ..... VARIANTE N°2 : POUTRE AVEC 01 LIT DE FIBRES A 1,75 CM (P1L)	28
<b>FIGURE II.13.</b> VARIANTE N°3 :POUTRE AVEC 02 LITS DE FIBRES A 1,75 ET 4,25CM : (P2L) ....	29
<b>FIGURE II.14.</b> VARIANTE N°4 : POUTRE AVEC 03 LITS DE FIBRES A 1,75 , 4,25 ET 8 CM : (P3L)	30
<b>FIGURE III.1.</b> EVOLUTION DE L'ENDOMMAGEMENT DANS LA POUTRE DE REFERENCE .....	33
<b>FIGURE III.2.</b> EVOLUTION DES CONTRAINTES (P-REF) .....	33
<b>FIGURE III.3.</b> EVOLUTION DE LA FISSURATION ( P-REF) .....	34
<b>FIGURE III.4.</b> EVOLUTION DE L'AMPLITUDE DE DEPLACEMENT (P-REF) .....	34
<b>FIGURE III.5.</b> COURBE FORCES – DEFORMATIONS (P-REF) .....	35
<b>FIGURE III.6.</b> EVOLUTION DE L'ENDOMMAGEMENT (P1L) .....	35
<b>FIGURE III.7.</b> EVOLUTION DE CONTRAINTES DE VON MISES (P1L) .....	36
<b>FIGURE III.8.</b> EVOLUTION DE LA FISSURATION ( PF-3).....	36
<b>FIGURE III.9.</b> EVOLUTION DE L'AMPLITUDE DE DEPLACEMENT (P1L).....	37
<b>FIGURE III.10.</b> EVOLUTION DE LA DEFORMATION DANS LES FIBRES DE LA POUTRE (P1L).....	37
<b>FIGURE III.11.</b> COURBE FORCES – DEFORMATIONS (P1L) .....	38
<b>FIGURE III.12.</b> EVOLUTION DE L'ENDOMMAGEMENT ( P2L) .....	38
<b>FIGURE III.13.</b> EVOLUTION DE CONTRAINTES DE VON MISES ( P2L) .....	39
<b>FIGURE III.14.</b> EVOLUTION DU CHAMP DES CONTRAINTES ( P2L) .....	39
<b>FIGURE III.15.</b> EVOLUTION DE LA FISSURATION (P2L).....	40

<b>FIGURE III.16.</b> EVOLUTION DE L'AMPLITUDE DE DEPLACEMENT ( P2L).....	40
<b>FIGURE III.17.</b> EVOLUTION DE LA DEFORMATION DANS LES FIBRES ( P2L).....	41
<b>FIGURE III.18.</b> COURBE FORCES – DEFORMATIONS ( P2L).....	41
<b>FIGURE III.19.</b> EVOLUTION DE L'ENDOMMAGEMENT (P3L).....	42
<b>FIGURE III.20.</b> EVOLUTION DE CONTRAINTES DE VON MISES (P3L).....	42
<b>FIGURE III.21.</b> EVOLUTION DU CHAMP DE   DANS LES FIBRES (P3L).....	43
<b>FIGURE III.22.</b> EVOLUTION DE LA FISSURATION (P3L).....	43
<b>FIGURE III.23.</b> EVOLUTION DE L'AMPLITUDE DE DEPLACEMENT (P3L).....	44
<b>FIGURE III.24.</b> EVOLUTION DE LA DEFORMATION DANS LES FIBRES (P3L).....	44
<b>FIGURE III.25.</b> COURBE FORCES – DEFORMATIONS (P3L).....	45
<b>FIGURE III.26.</b> DIAGRAMME EN BARRES DES FORCES.....	45
<b>FIGURE III.27.</b> CONFRONTATION DES COURBES FORCES- DEPLACEMENTS.....	46
<b>FIGURE III.28.</b> EVOLUTIONS DE LA RESISTANCE ET DE LA QUANTITE DE FIBRES METALLIQUES UTILISEES DE TOUS LES SPECIMENS CONSIDERES.....	46

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	2
----------------------------	---

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES BETONS DE FIBRES

Introduction .....	6
I.2. Le matériau béton .....	6
I.2. 1 . Composition du béton .....	7
I.2. 1. 1 Le ciment .....	7
I.2. 1. 2. Les agrégats .....	8
I.2. 1. 3. L'eau de gâchage .....	9
I.2. 1. 4. Les adjuvants .....	9
I.3. Familles de fibres .....	10
I.3.1. Classification .....	11
I.3.2. Fibres utilisées dans le béton .....	11
I.3.3. Fibres métalliques .....	14
I.3.4. Exemples d'applications des bétons de fibres .....	15
Conclusion du chapitre .....	17

## CHAPITRE II: SIMULATION NUMERIQUE ET VARIANTES D'ETUDE

II.1 Introduction : .....	19
II.2. Présentation des étapes à suivre.....	19
II .3. Présentation des modeles de poutres .....	24
II.3.1. Dimension et géométrie .....	24
II.3.2. Maillage et modèle élément fini .....	25
II.3.3. Chargement, conditions aux limites et comportement des matériaux .....	25
II.3.4. Variantes proposées .....	26
1-Variante N°1 : Poutre de référence ( P-Ref).....	26
2-Variante N°2 : Poutre avec 01 lit de fibres à 1,75 cm (P1L).....	28
3-Variante N°3 : Poutre avec 02 lits de fibres à 1,75 et 4,25cm : (P2L) .....	29
4-Variante N°4 : Poutre avec 03 lits de fibres à 1,75 , 4,25 et 8 cm : (P3L) .....	30
Conclusion du chapitre.....	31

## CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction :	32
III.2. Résultats	32
III.2.1. Poutre de référence (P-Ref):	32
III.2.2. Poutre avec 01 lit de fibres à 1,75 cm (P1L)	35
III.2.3. Poutre avec 02 lits de fibres à 1,75 et 4,25cm : (P2L)	38
III.2.4. Poutre avec 03 lits de fibres à 1,75, 4,25cm et 8 cm : (P3L)	41
Conclusion du chapitre	47
CONCLUSION GENERALE	49

---

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

---

## INTRODUCTION GENERALE

Les bétons de fibres ont toujours fait l'objet de recherche et développement à ce jour pour élargir les domaines d'application au vu de leurs performances mécaniques. Le recours à ces matériaux est très manifesté lorsque les éléments sont minces ou ont des épaisseurs faibles de sorte que l'on ne puisse pas disposer les armatures longues (enrobage insuffisant).

Les différentes études menées sur les bétons armés de fibres de nature diverse et plus particulièrement des fibres métalliques, ont montré que l'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire permet d'augmenter les résistances en particulier la résistance en traction par flexion d'une manière significative, alors que la résistance de compression augmente légèrement.

Le peu d'applications dans le domaine de génie civil et de la construction, malgré les différents essais réalisés sur des éléments de structures porteurs, est imputable d'une part à la restriction d'emploi imposée des bétons de fibres là où existaient des problèmes technologiques qui rendaient l'emploi du béton armé d'armatures longues traditionnelles onéreuses ou aléatoire et à l'absence de notes et méthodes de calcul pour mener une étude structurale convenable afin d'apprécier correctement l'apport structural de ces matériaux dans le cas des poutres. L'utilisation des bétons de fibres peut être également considérée comme une solution à la fois économique et de meilleure qualité.

Pour décrire le comportement mécanique des bétons de fibres, généralement deux échelles sont considérées : comportement de type matériau et comportement de structure.

- Au niveau du matériau des microfissures sont réparties d'une manière aléatoire et vu que leurs épaisseurs sont très fines, elles peuvent être facilement cousues par les fibres courtes présentes en abondance dans la matrice cimentaire.
- Par contre au niveau structure, qui correspond à la formation des macro fissures (coalescence des microfissures), le comportement apparait comme un mécanisme de blocs séparés et reliés par les fibres qui limiteront ainsi la vitesse d'ouverture des microfissures et retarderont donc la rupture de l'élément de structure.

En s'inspirant du principe des multicouches, nous proposons de décomposer la hauteur de la zone tendue de la poutre en trois couches identiques et de disposer les fibres courtes alignées au milieu de la couche tout le long de la longueur et sur toute la largeur. Trois cas sont considérés :

- utiliser seulement un lit de fibres dans la première couche la plus tendue ( P1L)
- Utiliser deux lits de fibres dans la première et la deuxième couche, en partant de la sous face de la poutre (P2L)
- Utiliser les lits de fibres dans les trois couches (P3L).

L'objectif consiste à étudier l'influence sur la réponse globale de l'élément prismatique soumis à un chargement de flexion 4-points en fonction du cas de renforcement par les fibres continues alignées/

Après avoir présenter une introduction générale est sur la thématique considérée, la structuration du mémoire de recherche comporte trois Chapitres.

Le premier chapitre présente le matériau béton et les différents types de fibres les plus utilisés dans une matrice cimentaire. On y trouve synthèse bibliographique contenant un ensemble de définitions et généralités qui font l'état de l'art des différentes connaissances afférentes aux matériaux renforcés par des fibres de nature différentes ainsi que leur domaine d'application et l'intérêt procuré au matériau béton en termes de performances mécaniques.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les principales étapes et modules utilisés de simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS de la génération de la géométrie jusqu'au lancement du calcul et les différentes variantes de renforcement considérées.

Le troisième chapitre est entièrement axé sur la présentation et analyses des résultats. Les résultats de la simulation numérique sont présentés sous forme de cartographies et histogrammes de résistances et courbes contrainte - déformation qui permettent de décrire le comportement des poutres renforcées par des fibres courtes alignées. Une analyse est conduite ultérieurement afin de montrer l'influence de la disposition des fibres courtes alignées en termes de résistance.

Enfin, ce travail est ponctué par une conclusion générale mettant en évidence les points essentiels de cette recherche.



---

---

**CHAPITRE I. ETAT DE L'ART SUR LES  
BETONS DE FIBRES**

---

---

## CHAPITRE -1 : ETAT DE L'ART SUR LES BETONS DE FIBRES

### 1.1 Introduction

Le béton fibré est un matériau composite composé d'une matrice de béton traditionnel et d'un renfort de fibres de diverses natures (métalliques, organiques). Ces fibres sont réparties uniformément dans la matrice de béton. En conférant au béton des caractéristiques mécaniques très intéressantes, elles garantissent la tenue mécanique, ce qui améliore sa résistance et son comportement en général.

Selon les technologies d'élaboration considérées, les fibres ont des formes et des dimensions différentes. Les propriétés spécifiques du béton fibré comprennent la nature, la forme géométrique, l'élancement et la teneur en volume de la fibre. Dans ce chapitre nous rappelons les différentes définitions et propriétés mécaniques des deux principaux constituants, à savoir : le matériau béton (rôle de la matrice) , les types de fibres et les bétons de fibres ainsi que leur applications.

### 1.2. Le matériau béton

Le béton est connu pour sa grande résistance à la compression et sa faible résistance à la traction. Son utilisation accrue en tant que 'matériau de construction' remonte aux Romains, puis s'est développée avec l'invention du béton armé. L'invention du béton armé est due à Joseph Lambot, (1848), qui a fabriqué une barque en ciment armé, puis en (1849) Joseph Monier, construisit des bacs à fleurs. Dès 1906, l'emploi du béton armé dans la conception et le calcul des ponts et des bâtiments est codifié. Depuis les années 1970, beaucoup de recherches ont été menées pour développer davantage les caractéristiques physico-mécaniques des bétons, en particulier en s'intéressant plus principalement aux constituants actifs,

Dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 - 150 Méga Pascals (MPa) ont été mis en œuvre aux États-Unis et au Japon. Dans les laboratoires, on a même obtenu des résistances supérieures à 600 MPa . Les améliorations obtenues grâce à l'industrie des liants hydrauliques (qualité des ciments), développement de nouveaux adjuvants spécifiques de synthèse et surtout le recours aux

ultrafines (fillers). Le béton est un matériau constitué de ciment, de granulats, d'eau et des adjuvants.

### I.2. 1. Composition du béton

Le béton est un agglomérat de sables et de graviers, liés entre eux par un liant hydraulique - le ciment, lors du malaxage. Pour un béton hydraulique, la prise du ciment est obtenue grâce à la présence d'eau. Le durcissement du mélange est obtenu progressivement dans le temps. Les propriétés mécaniques sont directement liées à la nature, les pourcentages des constituants, le malaxage et la mise en œuvre,

**Tableau I .1.** Les composants de béton

	<b>Granulat</b>	<b>ciment</b>	<b>Eau</b>	<b>air</b>
<b>Volume</b>	60% -78%	7% -14%	14% -22%	1% -6%
<b>Poids</b>	63% -85%	9% -18%	5% -9%	

#### I.2. 1. 1 Le ciment

Le ciment est considéré comme un liant hydraulique qui prend prise en présence d'eau. C'est une poudre minérale fine, composés essentiellement de silicates de chaux, d'alumine et de fer, qui mélangée à l'eau, elle forme une pâte qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.



**Figure I.1.** Ciment

### I.2. 1. 1. Les agrégats

Les agrégats sont généralement les graviers et le sable. Ils constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive (formations géologiques). Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières (ou sablières) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés (obtenus à partir des carrières).

Les familles de granulats :

- fillers 0/D où  $D < 2$  mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sablons 0/D où  $D < 1$  mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sables 0/D où  $1 < D < 6,3$  mm ;
- graves 0/D où  $D > 6,3$  mm ;
- gravillons d/D où  $d > \text{let } D < 125$  mm ;
- ballasts d/D où  $d > 25$  mm et  $D < 50$  mm.

Classification des granulats selon les diamètres :

- Granulats petits : de 3 à 8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- Granulats moyens : de 8 à 15 mm.
- Granulats gros : de 15 à 25 mm.
- Granulats très gros : de 25 à 40 mm



**Figure I.2.** Différents types de granulats selon leurs natures

### **I.2. 1. 2. L'eau de gâchage**

En général, l'eau de gâchage doit être propre. L'eau de mer ne doit pas être utilisée pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. Car elle contient environ 30 g/l de chlorure de sodium,

### **I.2. 1. 3. Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) pour améliorer quelques propriétés indispensables et souhaitées. Les adjuvants doivent être bien mélangés dans la matrice béton lors du malaxage, pour assurer une certaine homogénéité afin d'augmenter leur efficacité

Les principaux adjuvants sont :

- Les plastifiants ont une double fonction. D'une part, ils permettent la défloculation des grains de ciment pour obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide, ce qui les rend très maniables. D'autre part, ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton à une maniabilité spécifique. En conséquence, la résistance du béton durci peut être considérablement augmentée. Ces adjuvants ont une durée d'action de 1 à 3 heures..
- Les retardateurs de prise de ciment prolongent la durée de vie du béton frais. Ils peuvent être utilisés pour transporter du béton sur de longues distances ou pour l'installer par pompage, en particulier pendant la saison chaude. Ils sont également utilisés pour éviter les ruptures lors des reprises de bétonnage.
- Les accélérateurs de prise et de durcissement sont utilisés pour réaliser des scellements ou des étanchements et pour acquérir une résistance au béton durci plus rapidement.
- Les entraîneurs d'air : aident le béton durci à résister aux gels et dégels répétés en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de manière uniforme. Le volume d'air occlus doit représenter environ 6 % du volume du béton durci.

### 1.3. Familles de fibres

Les recherches sur le béton fibré se sont véritablement accélérées depuis les années 1960 grâce aux travaux de Romualdi, Batson et Mandel [1]. Le mécanisme de propagation et d'arrêt des fissures dans les matrices fragiles est décrit, montrant l'effet de l'espacement moyen des fibres sur le comportement du composite. [2] a proposé une description physique du fonctionnement de ces matériaux. Il soutient que les fibres ont deux niveaux d'action différents : matière et structure.

Ils existent de nombreux types de fibres sur le marché. Les fibres peuvent être classées par famille. Chaque type de fibre a des propriétés particulières qui le distinguent des autres types de fibres. La sélection des fibres dépend de l'utilisation prévue.

Par conséquent, le choix de la fibre aura un impact sur les propriétés suivantes :

- Densité, → Résistance tension et en compression, → Résistance aux impacts et à la fatigue,
- Module d'élasticité, → Conductivités thermique et électrique, → Stabilité dimensionnelle,
- Résistance aux conditions environnementales, → Coût,

#### 1.3. 1. Classification

Les fibres peuvent être classées selon leur origine :

- Fibres naturelles minérales et végétales telles que l'amiante et la cellulose.
- Fibres minérales synthétiques : verre, carbone, fibre métallique
- Fibres synthétiques organiques telles que polyamide, polypropylène, acrylique, Kevlar,

Les trois types de fibres utilisées dans la fabrication du béton sont les suivants :

- Les micro-fibres synthétiques : non structurelles, elles sont en polypropylène, de longueur 6 à 12mm, et un diamètre de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ . . Le dosage en fibres est de 0,6 à 0,9 kg/m<sup>3</sup>
- Les macro-fibres synthétiques : structurelles, elles sont à base de polypropylène, de longueur 25 à 60mm, et diamètre  $\sim 100\mu\text{m}$ . Le dosage en fibres est de 2 à 6 kg/m<sup>3</sup>

- Les fibres métalliques : structurelles, elles sont en acier, de longueur 30 à 60 mm, et de diamètre 0,4 à 1mm. Le dosage en fibres est de 10 à 50 kg/m<sup>3</sup>



*Fibres métalliques*



*micro fibres synthétiques*



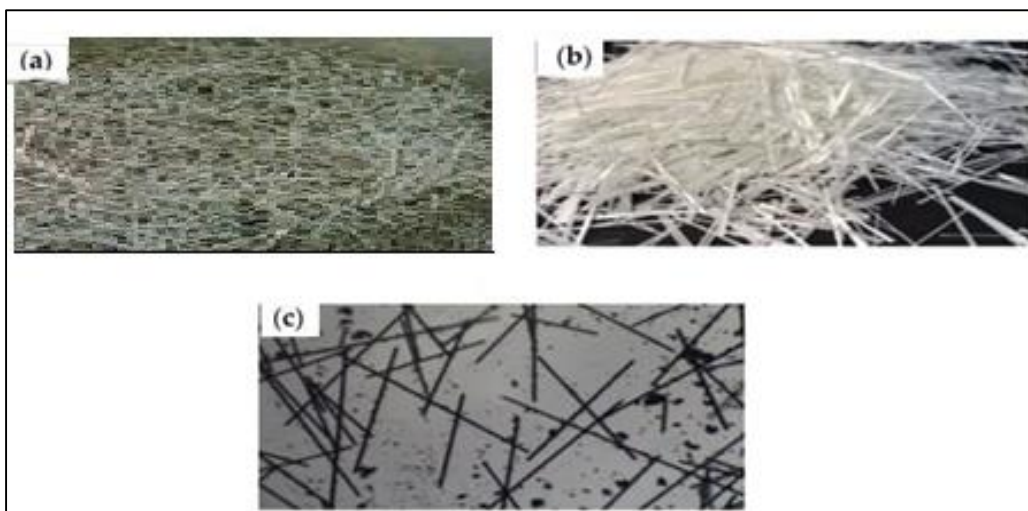
*macro fibres synthétiques*

**Figure I.3.** Types de fibres

### I.3. 2. Fibres utilisées dans le béton

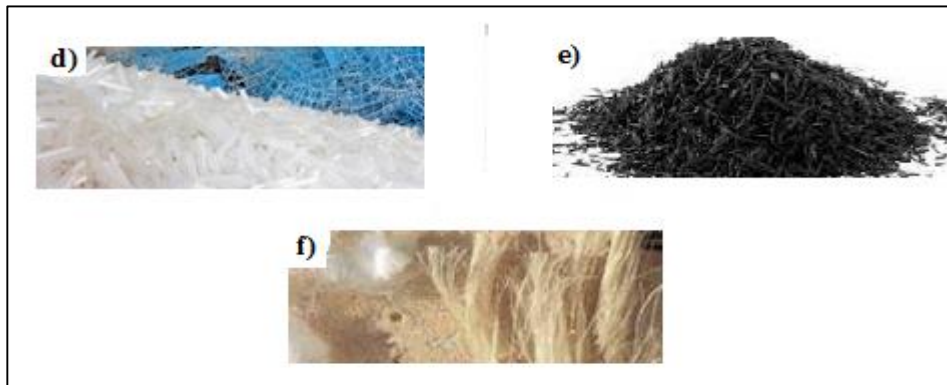
Actuellement, plusieurs types de fibres susceptibles d'être utilisées dans une matrice cimentaire, au vu de la bonne compatibilité du travail mécanique entre les fibres et la matrice béton, sont proposés sur le marché. A titre indicatif, on peut citer :

- ✓ Fibres considérées comme renforts pour bétons structurels et armatures structurelles, utilisées pour améliorer les caractéristiques mécaniques (résistances, ductilité, etc.) : dosage courant 0,5 à 2% en volume 40 à 160 Kg /m<sup>3</sup>
  - (a). Fibres métalliques
  - (b). Fibres de verre
  - (c). Fibres de Carbone



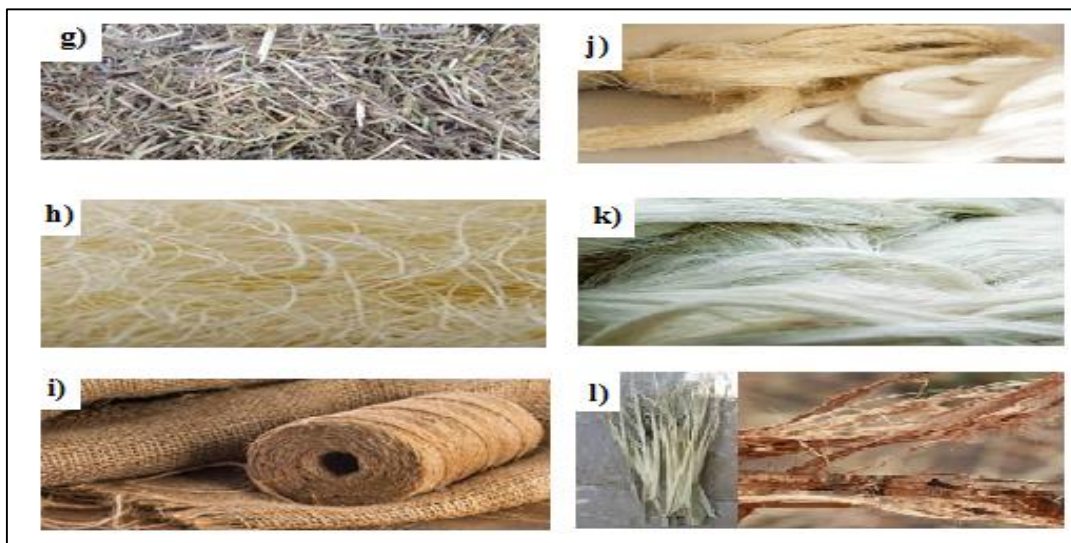
**Figure I.4.** Fibres : (a). Fibres métalliques, (b). Fibres de verre, (c). Fibres de Carbone

- ✓ Fibres à base de polymères utilisées pour la limitation de la fissuration liée au retrait, l'amélioration de la tenue en feu des bétons : dosage courant 0,5 à 2% en volume soit 0,5 à 2 Kg /m<sup>3</sup>
- (d). Fibres en plastique
- (e). Fibres en caoutchouc
- (f). Fibres de Polypropylène



**Figure I.5.** Fibres de polymères : (d). plastiques, (e). Fibres en caoutchouc, (f). Fibres de Polypropylène.

- ✓ Fibres de nature agro ressourcés (Fibres naturelles)
- (g). Fibres de canne à sucre ; (h). Fibres de Sisal
- (i). Fibres de Jute ; (j). fibres de Bambou
- (k). fibres cellulosique (paille) ; (l). fibres de palmiers



**Figure I.5.** Fibres agro-ressourcés : (g). Fibres de canne à sucre, (h). Fibres de Sisal, (i). Fibres de Jute, (j). Fibres de Bambou, (k). Fibre cellulosique, (l). Fibres de palmiers



### I.3. 3. Fibres métalliques

L'incorporation des fibres métalliques dans une matrice cimentaire (béton) permet d'augmenter considérablement la résistance à la flexion du béton en s'opposant à la propagation des fissures et en améliorant sa ductilité [2]. Malgré le développement de la technologie des matériaux, les fibres métalliques restent les fibres les plus employées dans le béton. L'amélioration de l'adhérence au béton a donné naissance à une panoplie de fibres métalliques (fibres de fils d'acier tréfilés, fibres dramix, fils étirés et coupés, ondulées crantées, torsadées, avec crochets, fibres d'usinage, ..).



Figure I.6. Types de fibres métalliques

L'introduction de fibres permet également de contrôler le développement et la propagation des microfissures afin de retarder la rupture de l'élément structural. La couture des macrofissures par les fibres, surtout les fibres qui comportent des crochets aux extrémités permet d'augmenter la faible résistance du matériau béton en traction à cause de leur bonne adhérence mécanique [3]., cependant, cette amélioration est aussi influencée par plusieurs d'autres paramètres tels que : la formulation du béton ; la qualité des constituants, la fraction volumique des fibres, la nature et le type de fibres, la géométrie, l'élancement et l'orientation des fibres (GUILLAUM, casanova). Le choix du type de fibres à utiliser est tributaire du domaine d'utilisation et des performances souhaitées [4.5].

Les fibres à crochets aux extrémités développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice (Rossi), cependant, une formation d'oursins durant le malaxage et la mise en forme de l'élément de structure peut engendrer une répartition non homogène dans le béton. Pour pallier à ce problème, les fibres droites peuvent être utilisées, en bénéficiant juste de l'adhérence fibre-matrice, même si cela entraînerait une diminution de l'efficacité.

#### **I.3. 4. Exemples d'applications des bétons de fibres**

Du fait de leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications là où on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour diminuer le dimensionnement des pièces [6, 7, 8,et9]

A titre indicatif, on citera les quelques exemples suivants :

- Canalisation et coque minces faiblement sollicitées : les fibres permettent d'améliorer la tenue des pièces aux jeunes âges ; de diminuer la vitesse de propagation des fissures ;
- Éléments de structure soumis à un chargement de compression (poteaux, pieux, fondations...etc.) : les fibres permettent d'améliorer la capacité portante et d'éviter la rupture brutale ;
- Dallages, chaussés en béton, éléments de structures soumis à un chargement de flexion : l'incorporation des fibres conduit à une diminution de 40% de l'ouverture de fissures, d'augmenter les résistances au cisaillement et à l'usure ainsi que la rigidité ;

- Tunnels, stabilisation des parois rocheuse, les talus : l'utilisation du béton de fibres conduit à une diminution du coût de réparation, de stabilisation des parois rocheuses et les talus.



**Figure I.7.** Quelques exemples d'application des bétons de fibres : a)-Renforcement des buses métalliques d'assainissement par chemisage à l'aide de la projection de BFM, b)- Renforcement des caniveaux des eaux de ruissellement par la projection de BFM , c)- Mise en œuvre de la coque de la structure de tunnels par projection du BFM (projeté)

Les innovations de conception basées sur l'utilisation de nouveaux matériaux ont permis la vulgarisation des bétons renforcés de fibres de nature différente dans le domaine de génie civil. Les fibres procurent à la matrice béton une amélioration de la résistance à la traction et aux chocs, réduit le poids et l'épaisseur des éléments et réduirait les dommages associés au transport et à la manutention.

## **Conclusion du chapitre**

La synthèse bibliographique a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation des fibres dans une matrice béton. Le recours aux fibres métalliques courtes dans le béton permet non seulement d'améliorer les caractéristiques mécaniques telles que les résistances ; la rigidité mais également les autres propriétés physiques. Cependant, la disposition des fibres dans le béton, le dosage, l'élanement, sont des paramètres très prépondérant dans l'amélioration du comportement mécanique des bétons fibres. D'où une recherche dans le but d'optimiser l'utilisation et la quantité des fibres sans diminuer les résistances mécaniques est d'actualité.

---

---

**CHAPITRE II. SIMULATION  
NUMERIQUE ET VARIANTES D'ETUDE**

---

---

## CHAPITRE II. SIMULATION NUMERIQUE ET VARIANTES D'ETUDE

### II.1 Introduction :

Pour prédire le comportement d'une structure, à savoir la connaissance des déplacements, déformations, contraintes de rupture,...), on recourt de plus en plus aux nouvelles techniques de simulation numérique par éléments finis, vu leurs performances, leurs fiabilité et le temps de calcul rapide. Le traitement des résultats permet une exploitation efficace des données.

Le code de calcul utilisé est un code de calcul par éléments finis (ABAQUS) qui permet de faire des analyses linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques. Il est utilisé pour simuler la réponse des structures soumises à des chargements mécaniques, thermiques, et autres conditions.

### II.2. Présentation des étapes à suivre

Le logiciel possède en tout neuf (9) modules

- - huit (8) modules permettent de modéliser et introduire toutes les données essentielles : Module Part, Module Property, Module Assembly, Module Step, Module Interaction, Module Load, Module Mesh et Module Job
- Un (01) module complémentaire pour visualiser les résultats : Module Visualization

a) **Module Part** : création des objets géométriques du problème

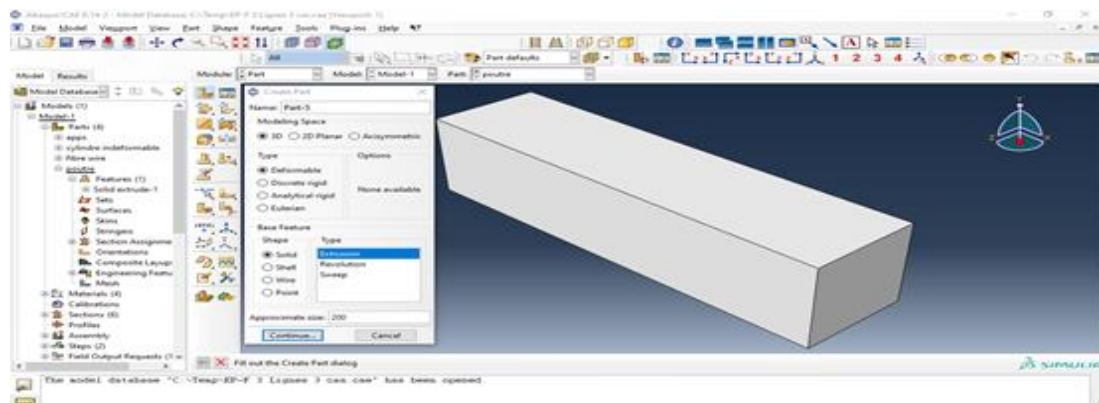


Figure II.1. Module Part

b) **Module PROPERTY** : permet de définir les propriétés matérielles (mécaniques, thermiques ou acoustiques) de l'objet

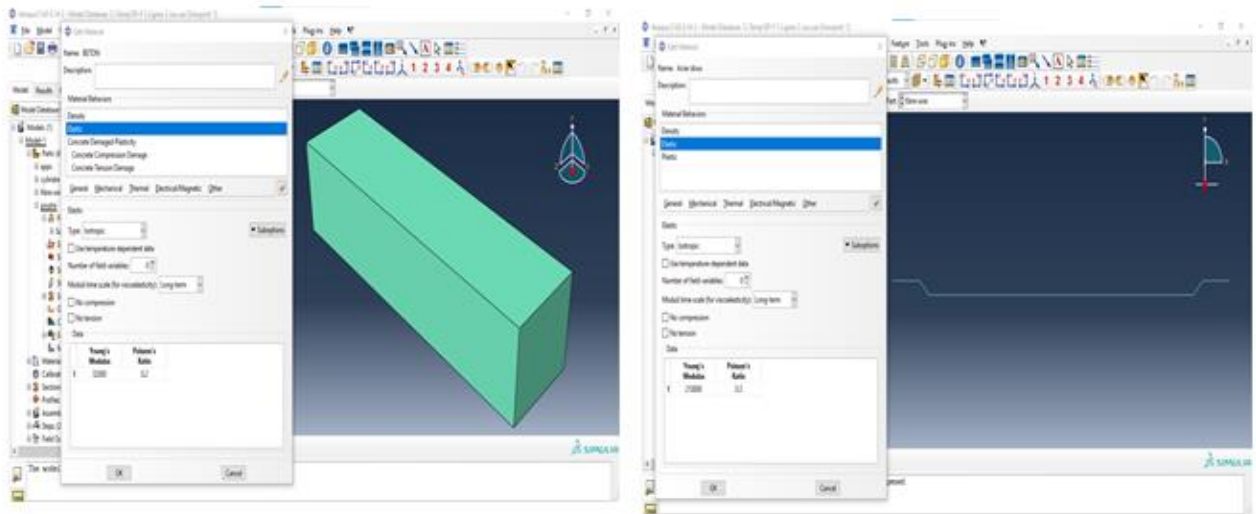


Figure II.2. Module PROPERTY

c) **Module ASSEMBLY** : permet d'assembler les différents objets géométriques dans un seul objet

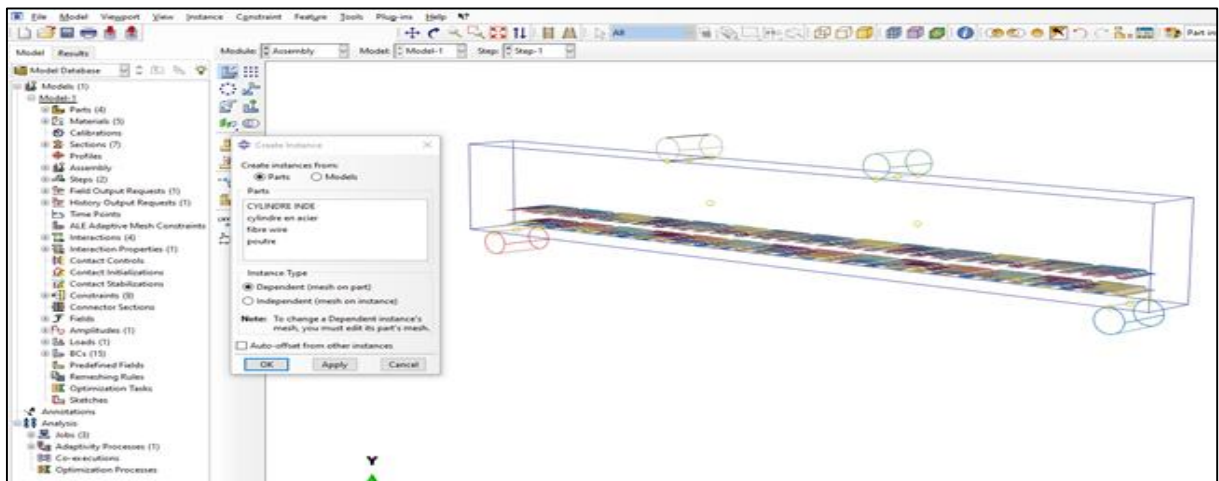


Figure II.3 : Module ASSEMBLY

d) **Module Step** : permet de définir toutes les requêtes pour le post traitement

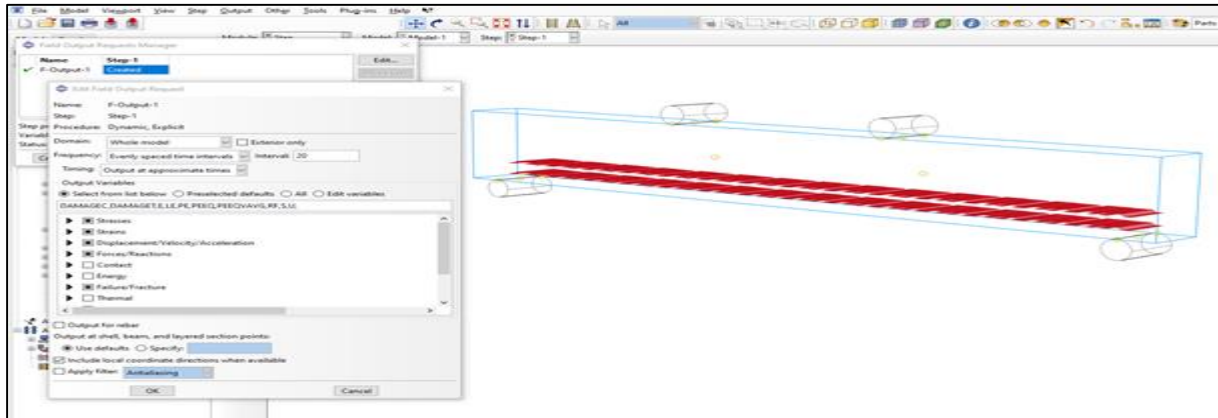


Figure II.4. Module Step

e) **Module Interaction** : permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle et d'introduire les premières hypothèses portant sur les contacts, les contraintes et les connexions éventuelles

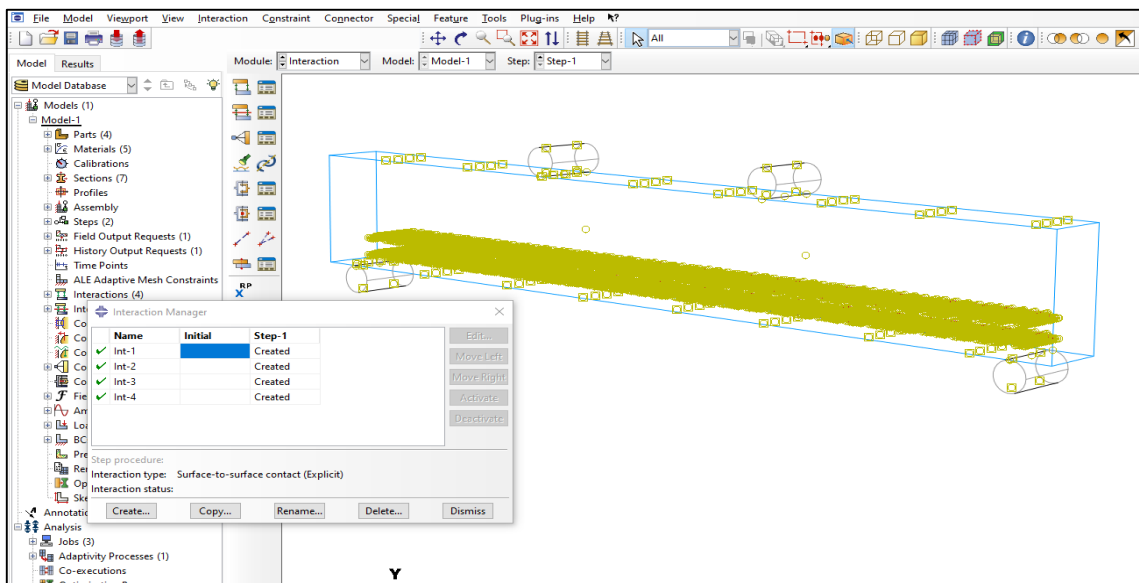


Figure II.5 : Module Interaction



f) **Module Load** : regroupe l'ensemble des forces (chargements, conditions aux limites et champs). les chargements et les conditions limites soient dépendants des Steps

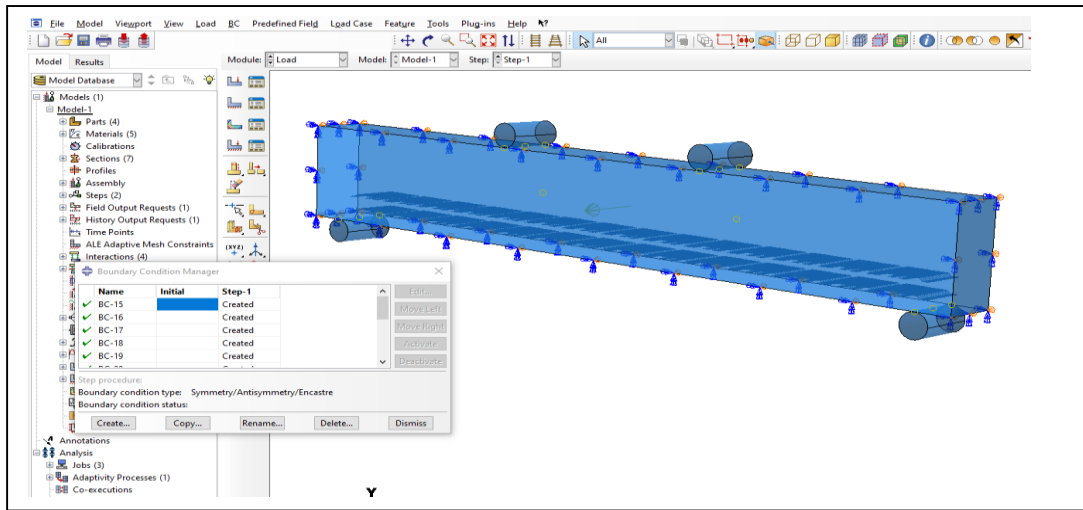


Figure II.6 : Le module 'Load'

g) **Module Mesh** : contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage

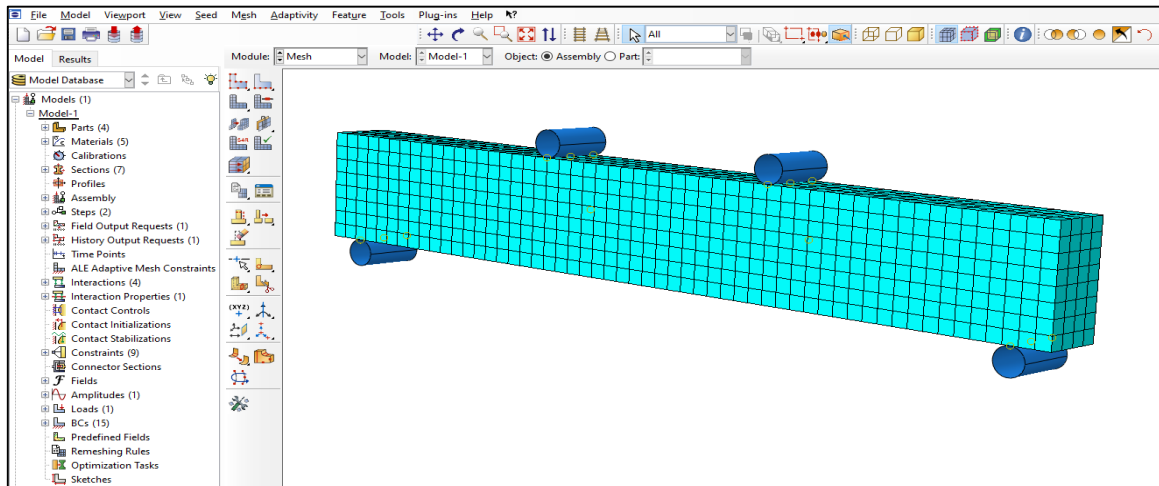


Figure II.7. Module Mesh

h) Le module Job : lancement des calculs des paramètres sélectionnés dans le module 'Step'.

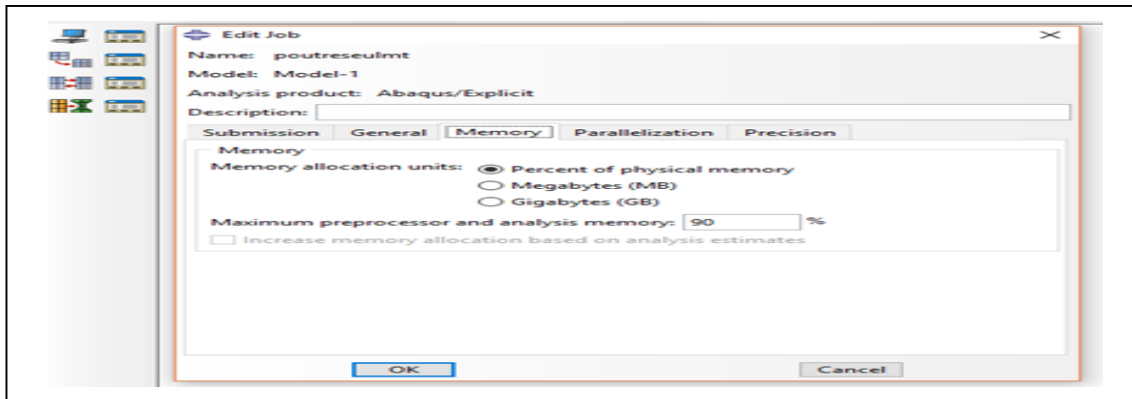


Figure II.8. Le module Job

i) **Module Visualisation** : permet de visualiser le modèle et les résultats ( les courbes de charges, les déformations, les contraintes,...

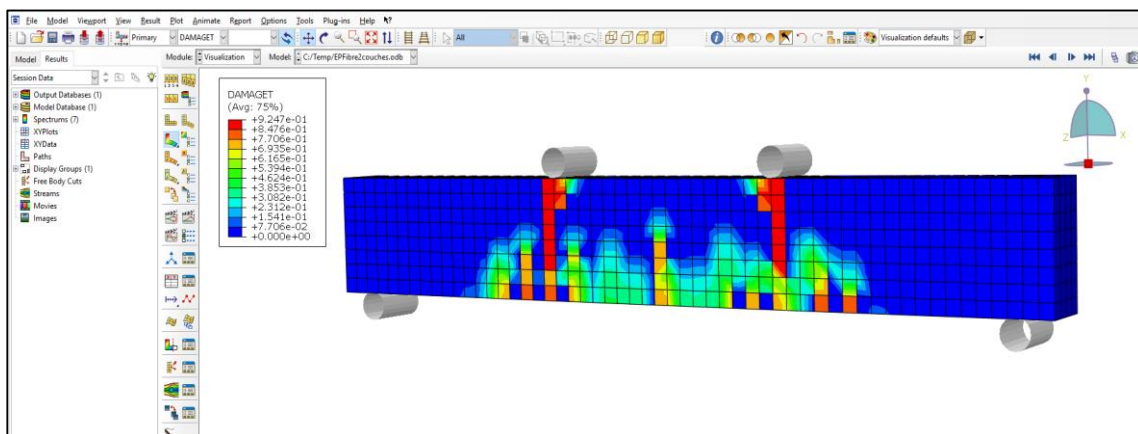


Figure II.9. Module Visualisation

## II.3. Présentation des modèles de poutres

### II.3.1. Dimension et géométrie

Les modèles objets de la simulation numérique sont composés des poutres en béton renforcées de fibres courtes alignées dans la direction de la longueur de l'élément poutre de section carrée de 08cm x 16 cm et de longueur de 110 cm. Les fibres utilisées sont de type métallique de longueur totale de 60 mm et de 0,6mm de diamètre. Les fibres présentent des crochets à leurs extrémités. La disposition des lits de fibres métalliques dans la poutre est réalisée de trois manières différentes :

- **Modèle 1** : Un (01) lit de fibres disposées dans la fibre de béton à la hauteur égale à 1,75 cm à partir de la fibre la plus tendue (P1L)
- **Modèle 2** : Deux (02) lits de fibres dont un lit de fibres est disposé dans la fibre de béton à la hauteur égale à 1,75 cm et l'autre lit de fibres à 4,25 cm, à partir de la fibre la plus tendue (P2 L)
- **Modèle 3** : Trois (03) lits de fibres dont un lit de fibres est disposé dans la fibre de béton à la hauteur égale à 1,75 cm, le deuxième à 4,25 cm et le troisième à 6,75 cm, à partir de la fibre la plus tendue (P3L)

### **II.3.1. Maillage et modèle élément fini**

Le maillage adéquat des différentes pièces constituant notre modèle :

- **La poutre en béton** : La forme quadratique de type « Hexhedra » est utilisée pour les poutres prismatiques, le nombre total de nœuds pour la poutre est de 8632 nœuds.
- **Les fibres** : le type « tétraèdres » est utilisé

### **II .3.3. Chargement, conditions aux limites et comportement des matériaux**

Toutes les variantes proposées de poutres en béton renforcées par des fibres courtes alignées sont soumises à un chargement de flexion 4 –points. Le modèle numérique « Damaged plasticity » intégré dans le code élément finis Abaqus permet de décrire le comportement anélastique de béton et d'autres matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures, ce modèle est un modèle de dommages, continu, basé sur la plasticité, pour le béton.

Tableau III.1 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton et les fibres.

Paramètres		Dénotation
Notations	Valeur	
$f_c$ (MPa)	25	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.6f_c$ (MPa)	15	Contrainte élastique en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06f_c$ (MPa)	2,1	Contrainte maximale en traction
$E = 11000(f_c)^{1/3}$ (MPa)	32164	Module de Young instantané
$f_{ft}$	400	Contrainte maximale en traction
$\nu$	0,2	Coefficient de poisson
$\psi$	32°	Angle de dilatation sous compression axiale.
$A_e$	0.1	Paramètre du potentiel d'écoulement

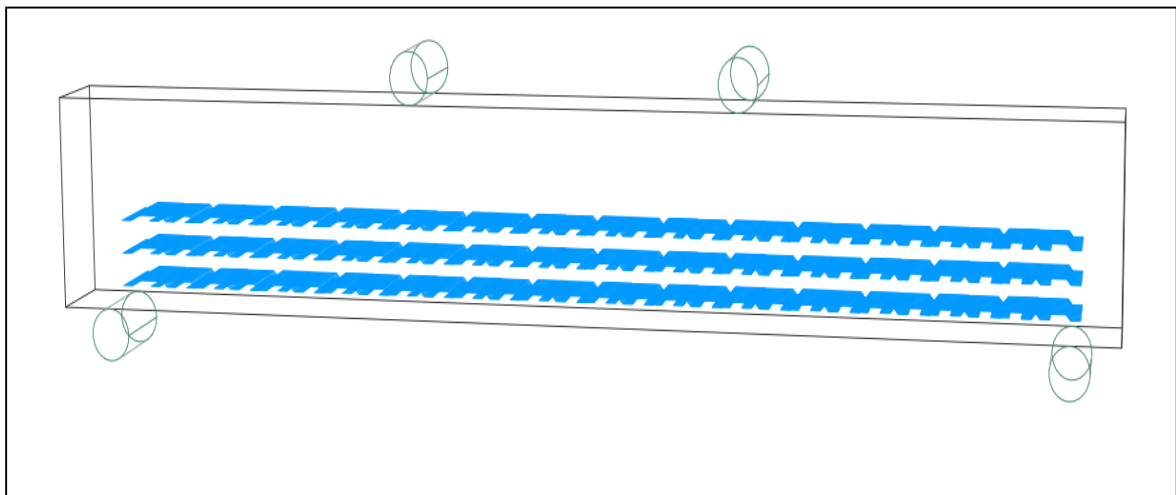
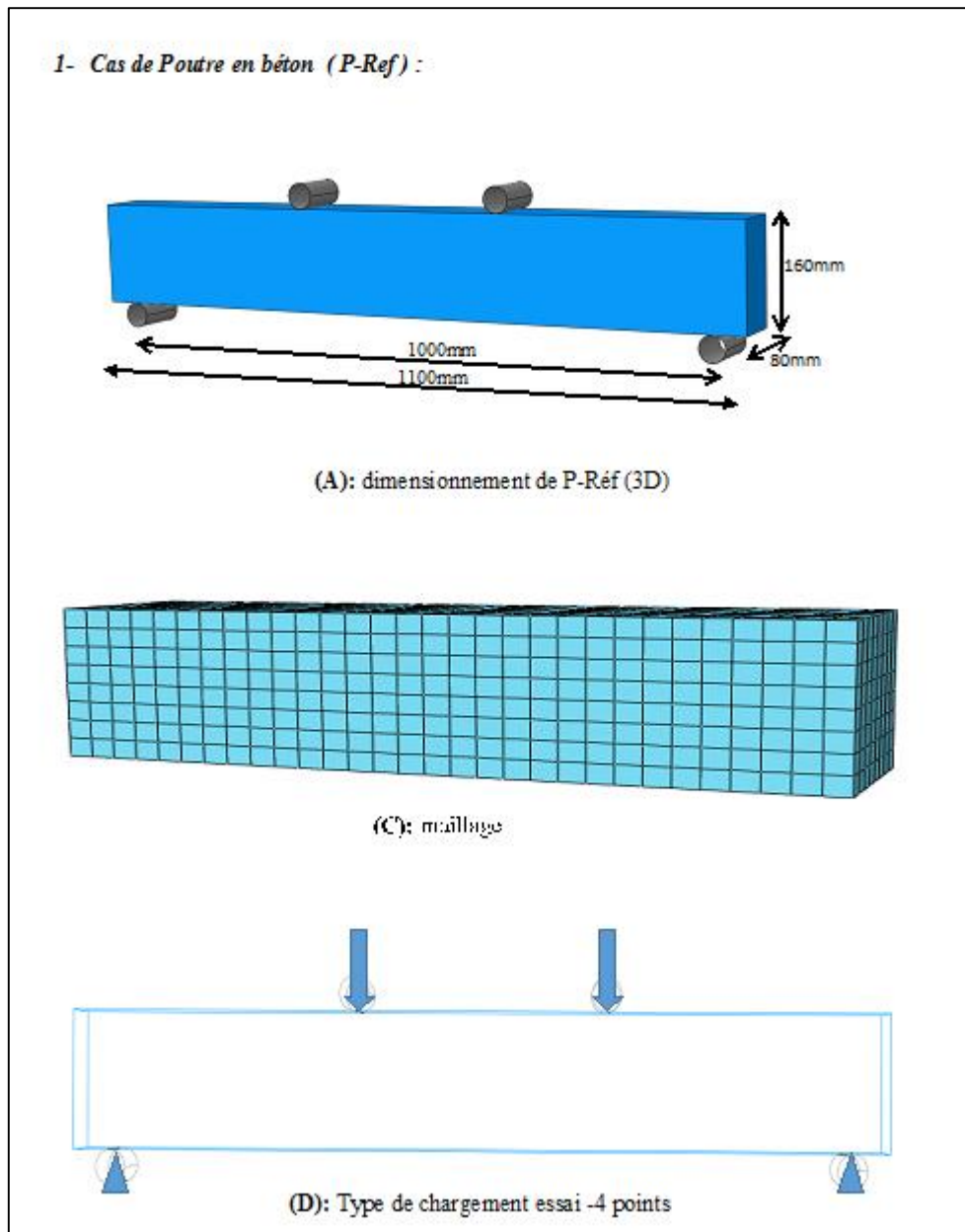


Figure II.10. Mode chargement

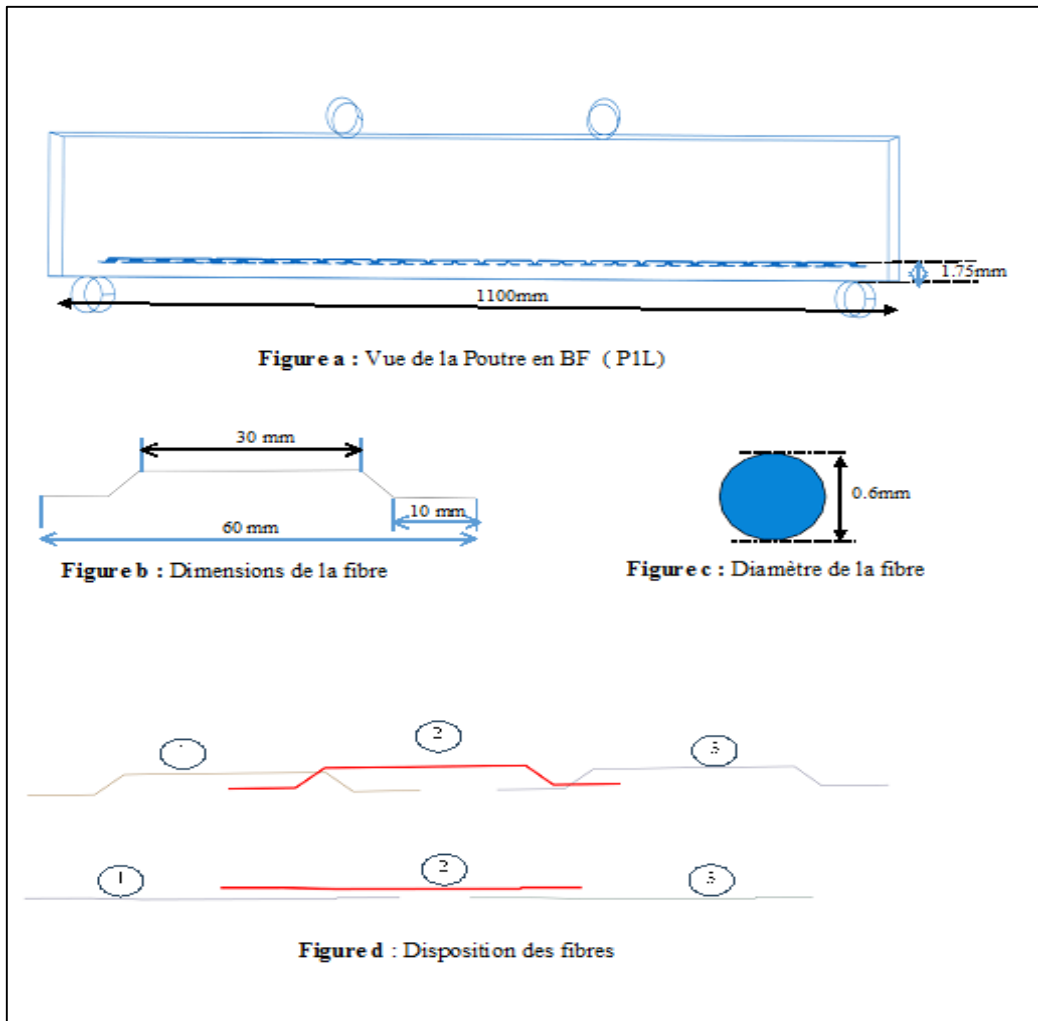
### II .3.4. Variantes proposées

Les différentes configurations de renforcement des poutres par des fibres métalliques courtes disposées à mi-hauteur de la ou les couches de béton, alignées tout le long de la portée de la poutre, ainsi que toutes les dimensions géométriques sont illustrées ci-après :

#### 1- Variante N°1 : Poutre de référence ( P-Ref)



2- Variante N°2 : Poutre avec 01 lit de fibres à 1,75 cm (PIL)



**3-Variante N°3 :Poutre avec 02 lits de fibres à 1,75 et 4,25cm : (P2L)**

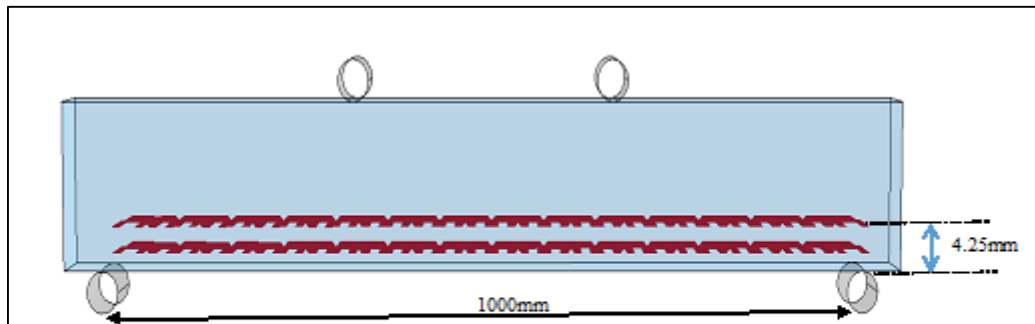


Figure a : Vue de la poutre avec 02 Lits de fibres métalliques

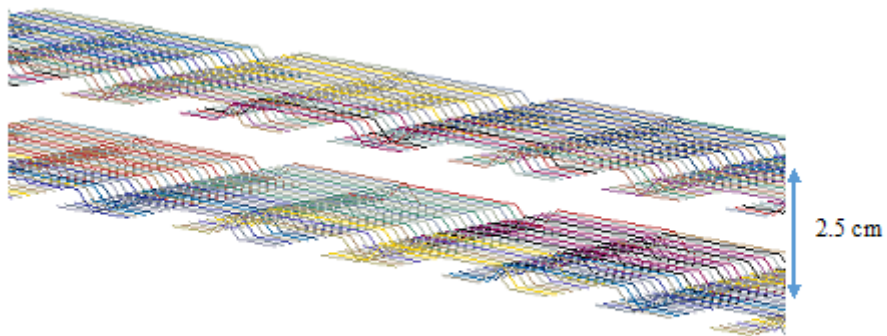
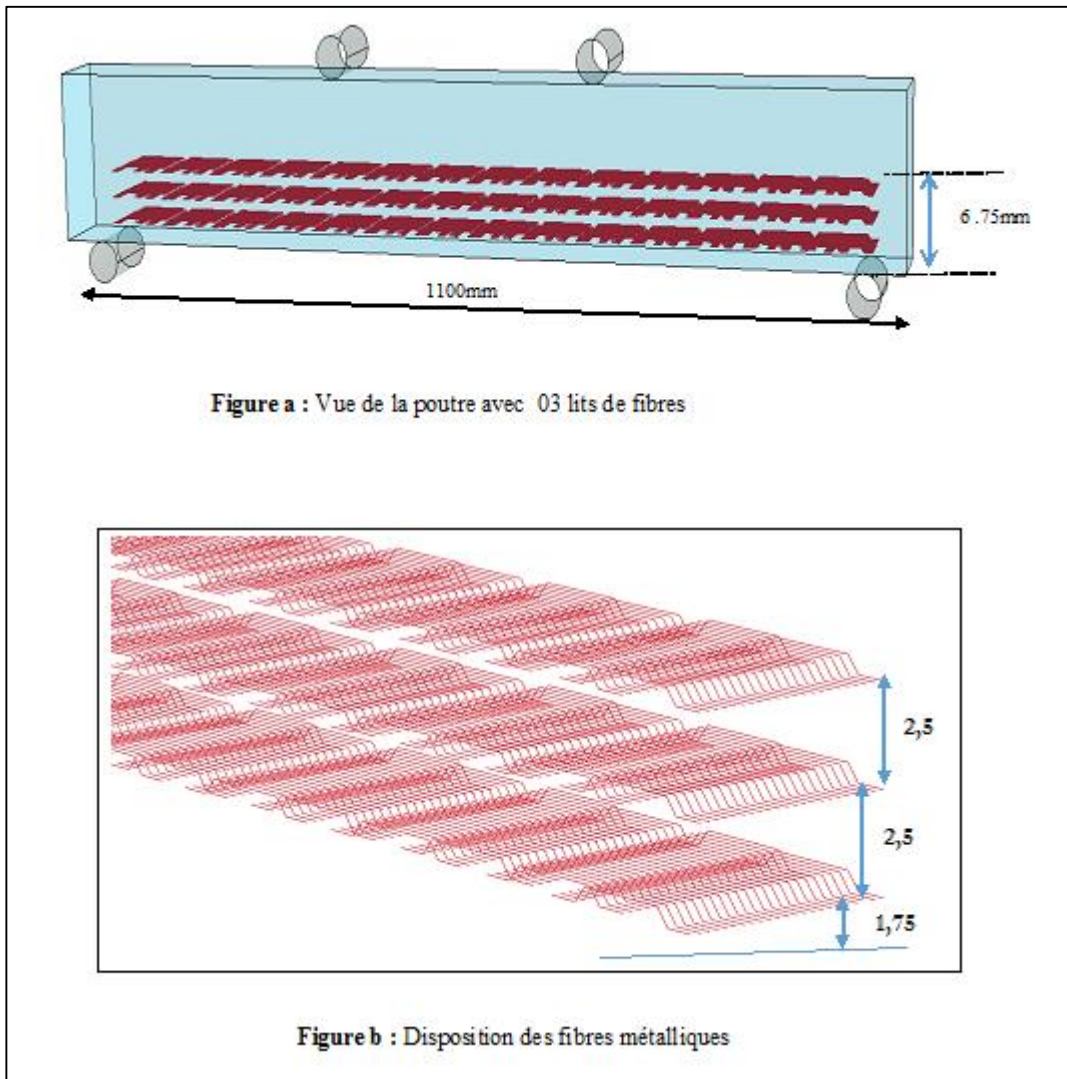


Figure b : Disposition des 02 Lits de fibres métalliques

*4-Variante N°4 : Poutre avec 03 lits de fibres à 1,75 , 4,25 et 8 cm : (P3L)*



### Conclusion du chapitre

Les résultats de la simulation du comportement en flexion des différentes variantes de poutres renforcées par des fibres courtes discontinues (courtes) et disposées dans une couche ou plusieurs couches de béton tout le long de la longueur en alignement, seront présentés dans le chapitre III. L'analyse des différents résultats est effectuée pour quantifier l'évolution de la résistance de l'élément poutre en béton de fibres en fonction du nombre de lits de fibres utilisés et de la disposition des fibres par rapport à l'axe neutre.



---

---

## **CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

---

---

## CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

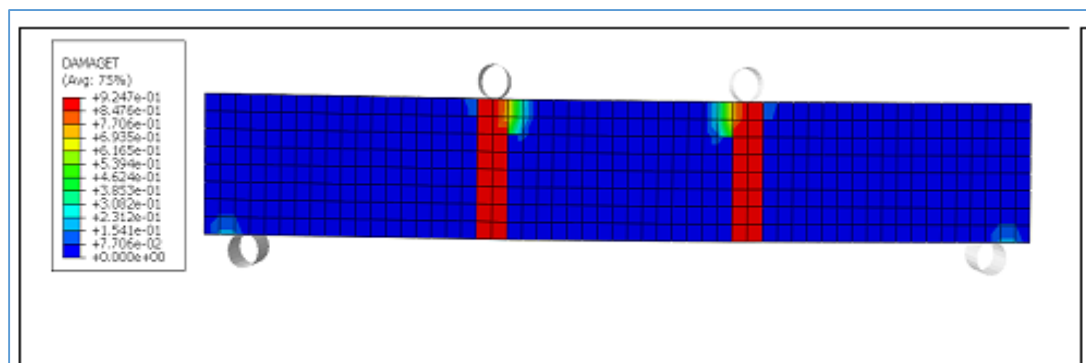
### III.1. Introduction :

Les différents résultats numériques obtenus de la simulation numérique conduite sur des poutres dont une partie de la zone tendue est renforcée par des fibres métalliques courtes orientées selon la longueur de la poutre soumises à un chargement de flexion. Différentes hauteurs de la zone renforcée sont considérées et différentes fractions de fibres quantifiées selon le nombre de lits de fibres sont considérées pour déterminer la hauteur optimale de la zone à renforcer.

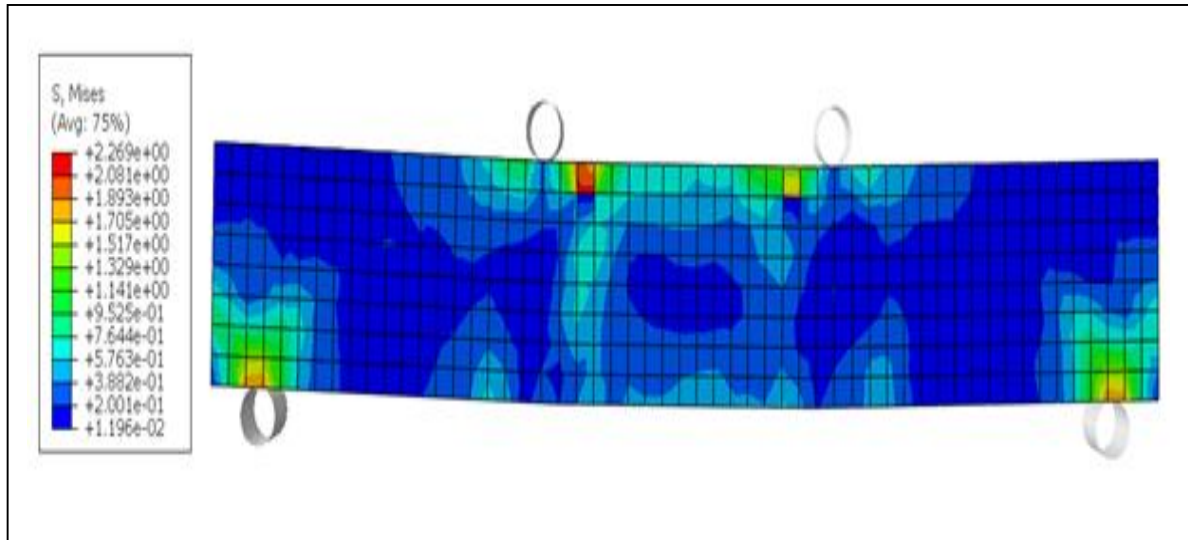
Les résultats en termes de cartographies de champ des contraintes, de champ des déplacements, champ de propagation des fissures et endommagement et surtout les états de comportement sous forme de courbes forces – déplacements sont illustrées et discutées. La détermination de la hauteur de la zone de poutre à renforcer est réalisée en prenant en compte, d'une part, la valeur de la résistance, comparativement à la poutre de référence, et la quantité de fibres utilisées, d'autres part.

### III. 2. Résultats

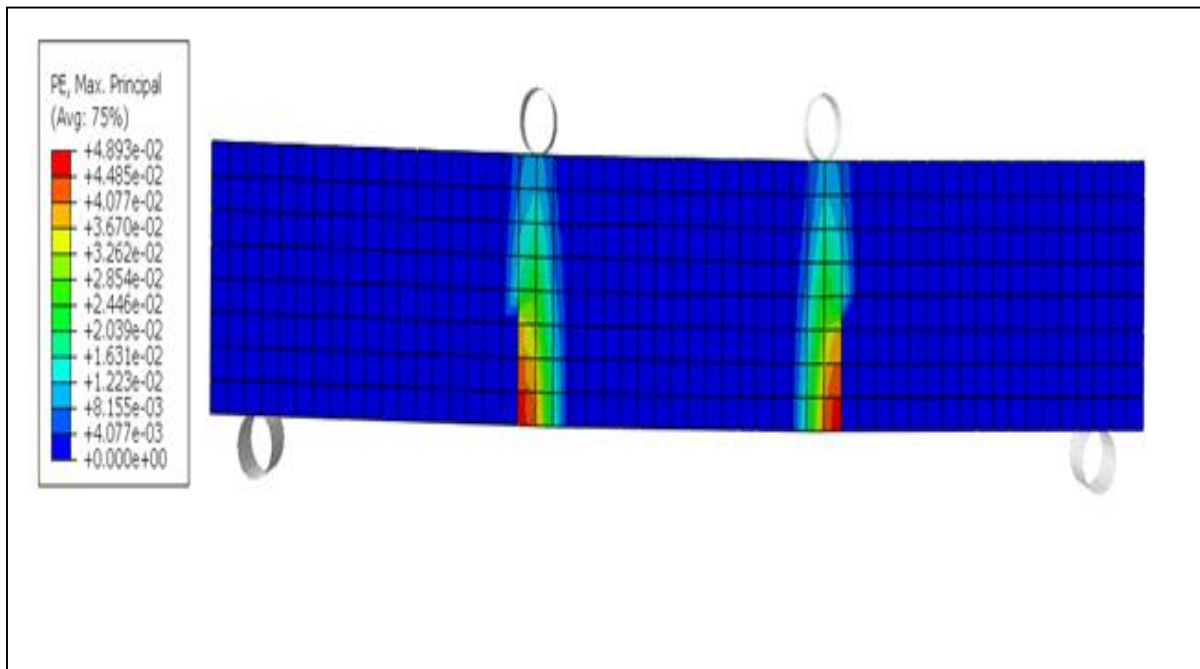
#### III. 2. 1. Poutre de référence (P-Ref):



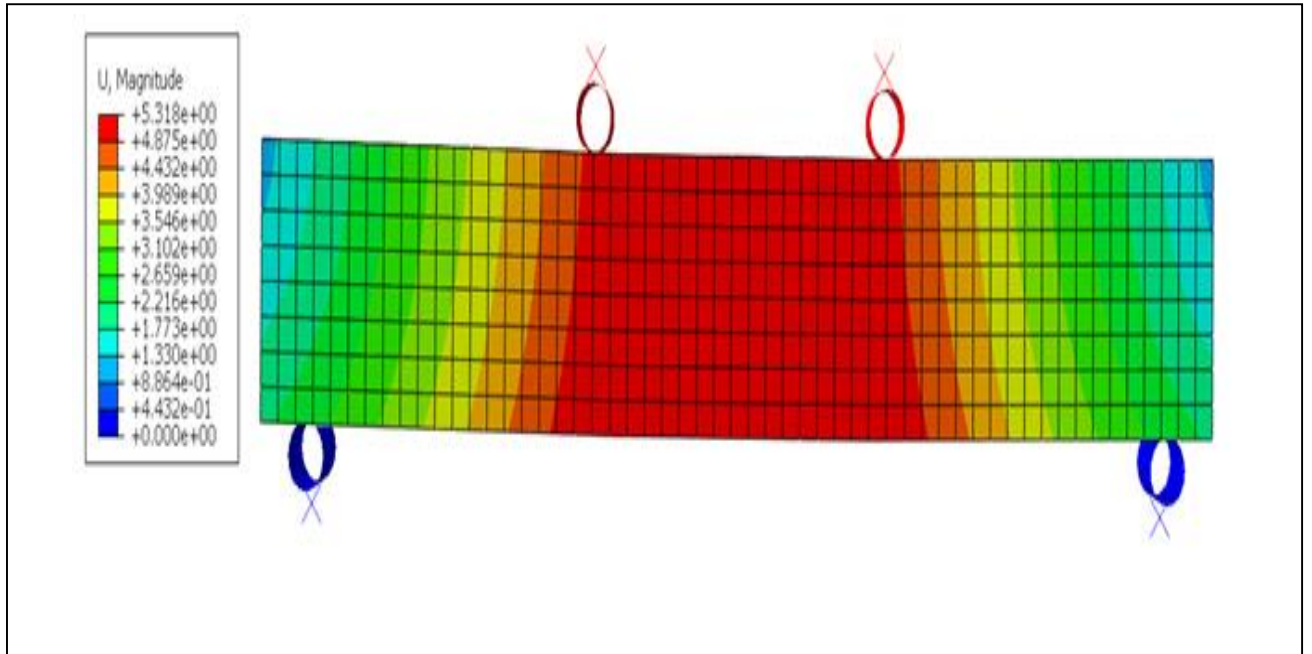
**Figure III.1.** Evolution de l'endommagement dans la Poutre de référence



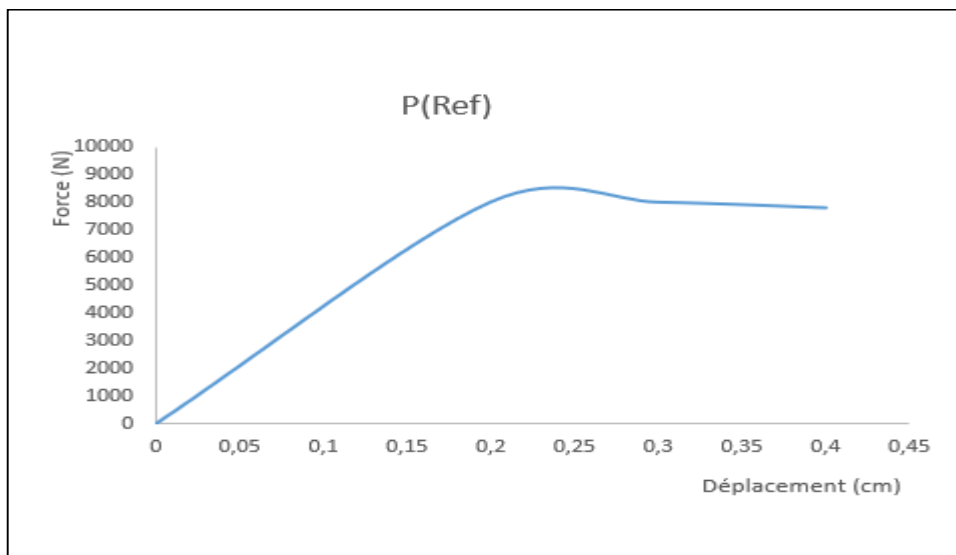
**Figure III.2.** Evolution des contraintes (P-Réf)



**Figure III.3.** Evolution de la fissuration ( P-Réf)



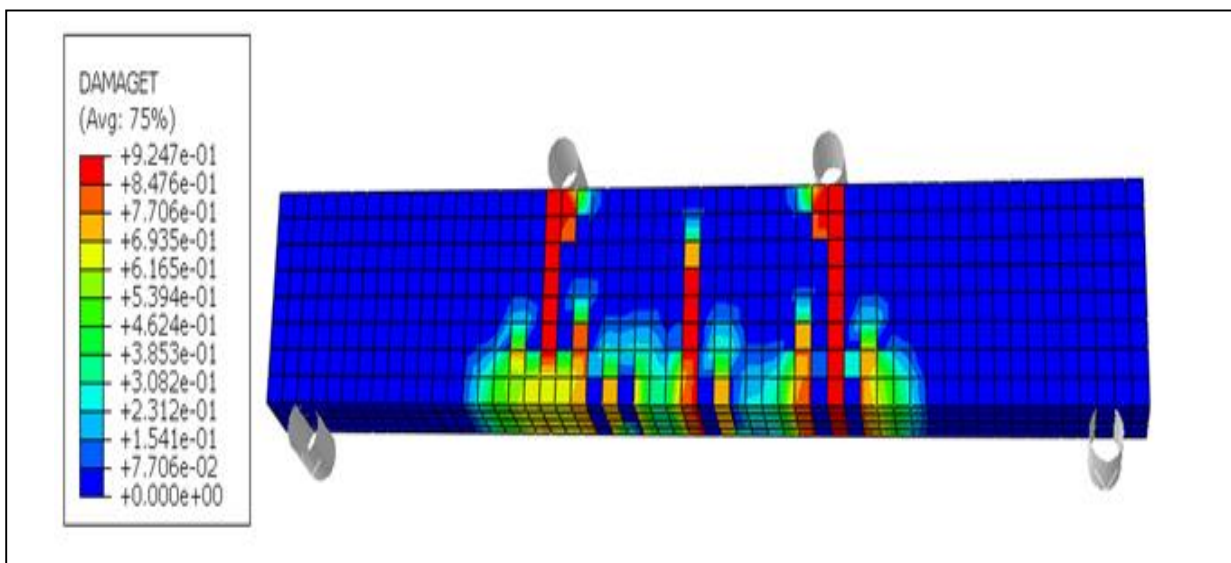
**Figure III.4.** Evolution de l'amplitude de déplacement (P-Réf)



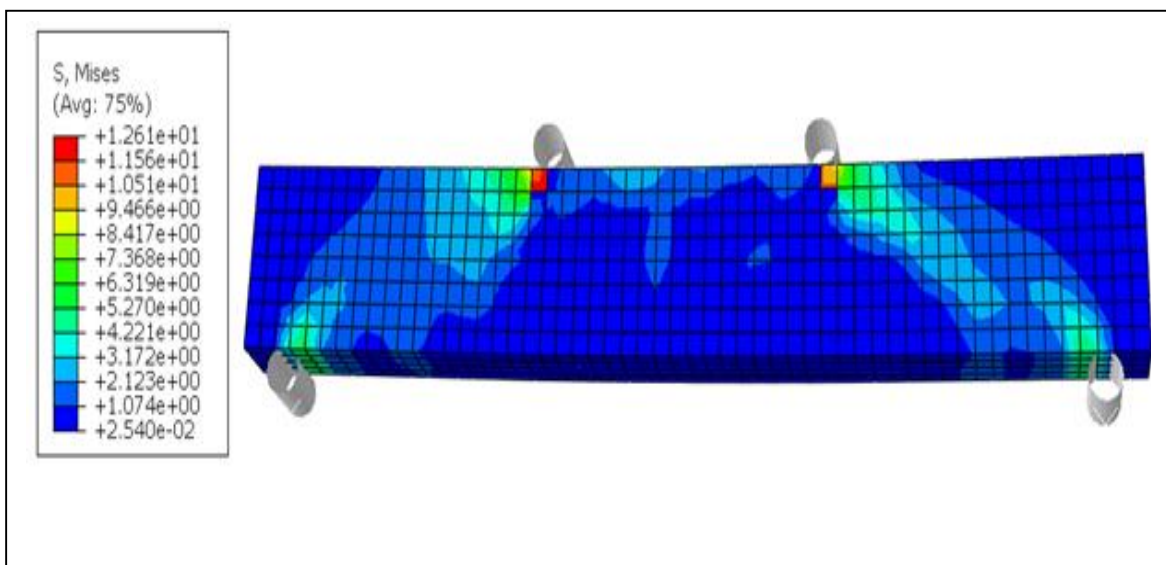
**Figure III.5.** Courbe forces – déformations (P-Réf)

D’après les différentes figures, on observe que les endommagements sont concentrés dans la partie centrale de la poutre, ainsi que les déplacements .C’est un comportement typique des poutres en béton non renforcées ; la rupture est obtenue au milieu de la poutre et le comportement est fragile. La valeur maximale de la force de rupture est égale environ à 8 kN avec un déplacement correspondant de 0,2 mm .

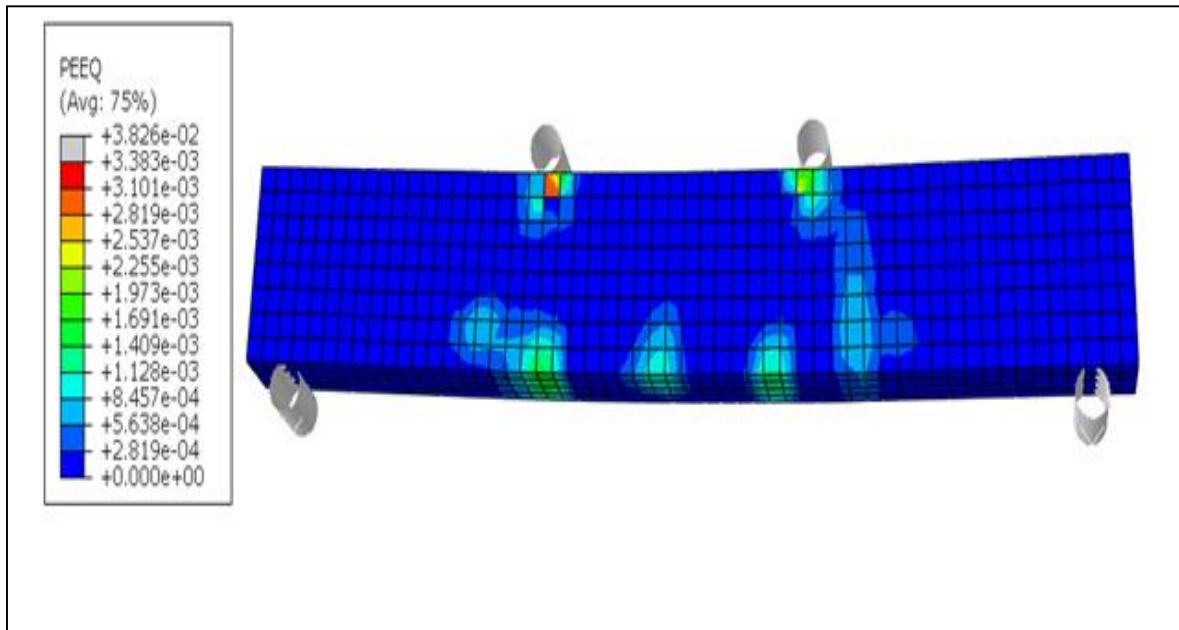
**III. 2. 2. Poutre avec 01 lit de fibres à 1,75 cm (P1L)**



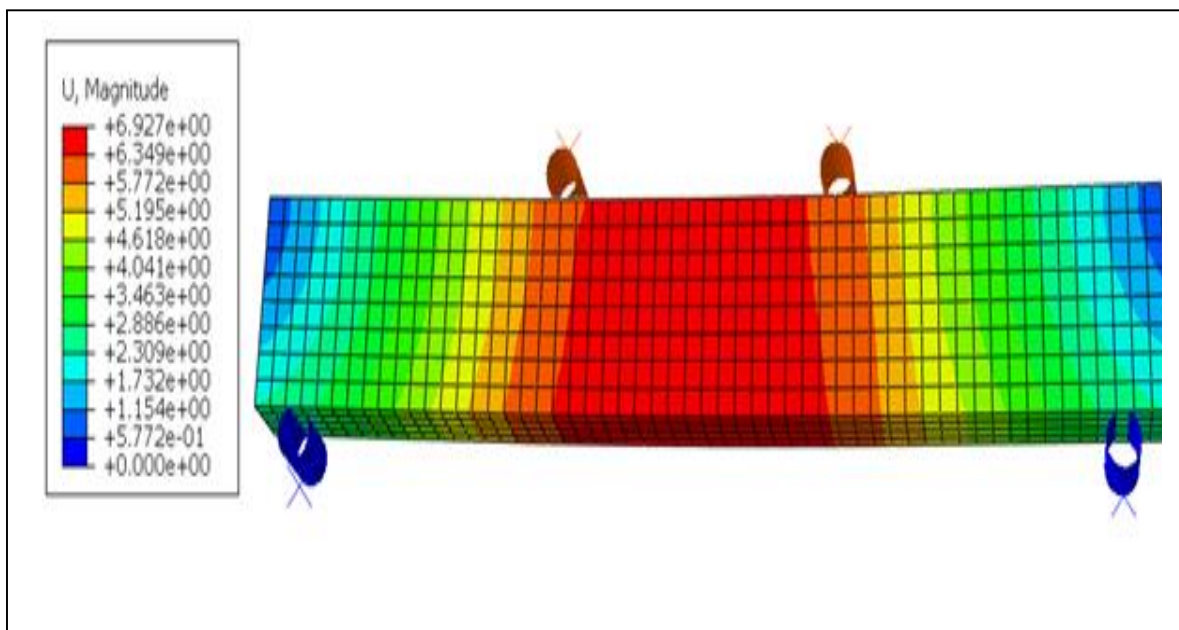
**Figure III.6.** Evolution de l’endommagement (P1L)



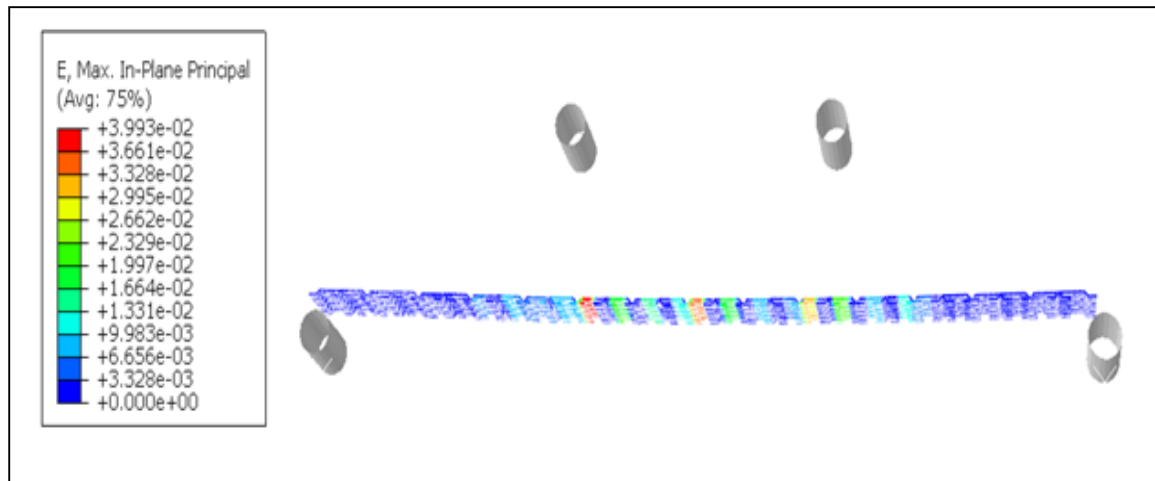
**Figure III.7.** Evolution de contraintes de Von Mises (P1L)



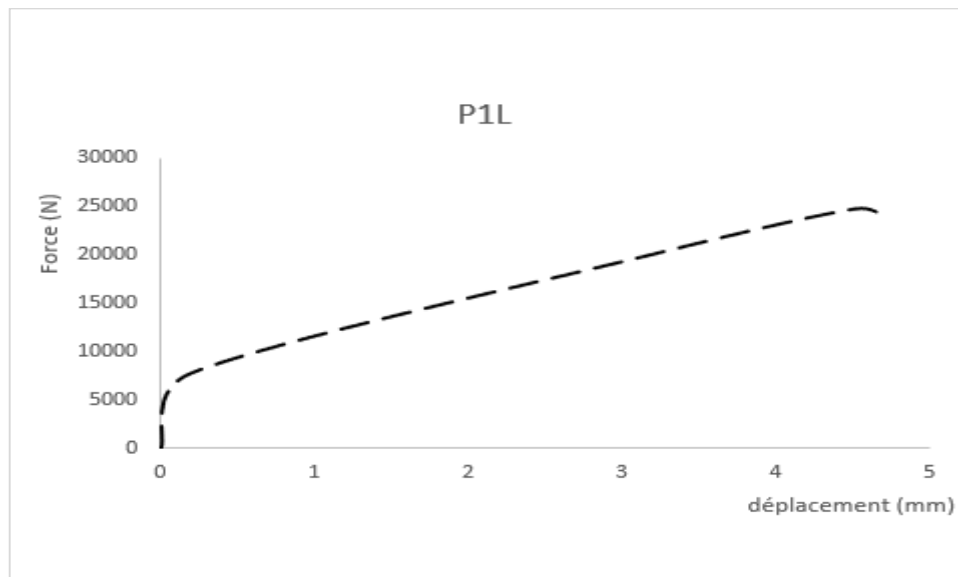
**Figure III.8.** Evolution de la fissuration ( PF-3)



**Figure III.9.** Evolution de l'amplitude de déplacement (P1L)



**Figure III.10.** Evolution de la déformation dans les fibres de la poutre (P1L)



**Figure III.11.** Courbe forces – déformations (P1L)

D'après les figures, on remarque que les déplacements et les endommagements sont plus importants dans la partie centrale mais des fissures inclinées de cisaillement moins importantes sont observées à proximité des appuis.. Pour la poutre renforcée avec 01 lit de fibres disposées selon la longueur à 1,75 cm de la fibre de béton la plus tendue (P1L) , la force maximale appliquée est égale à 24,8 kN avec un déplacement correspondant de 4,52 mm. Comparativement à la poutre de référence, un gain d'environ de 16,8 kN soit 210 % . Le renforcement d'une partie de la zone tendue, la plus proche de la fibre la plus tendue permet d'augmenter significativement la résistance de la poutre.

III. 2. 3. Poutre avec 02 lits de fibres à 1,75 et 4,25cm : (P2L)

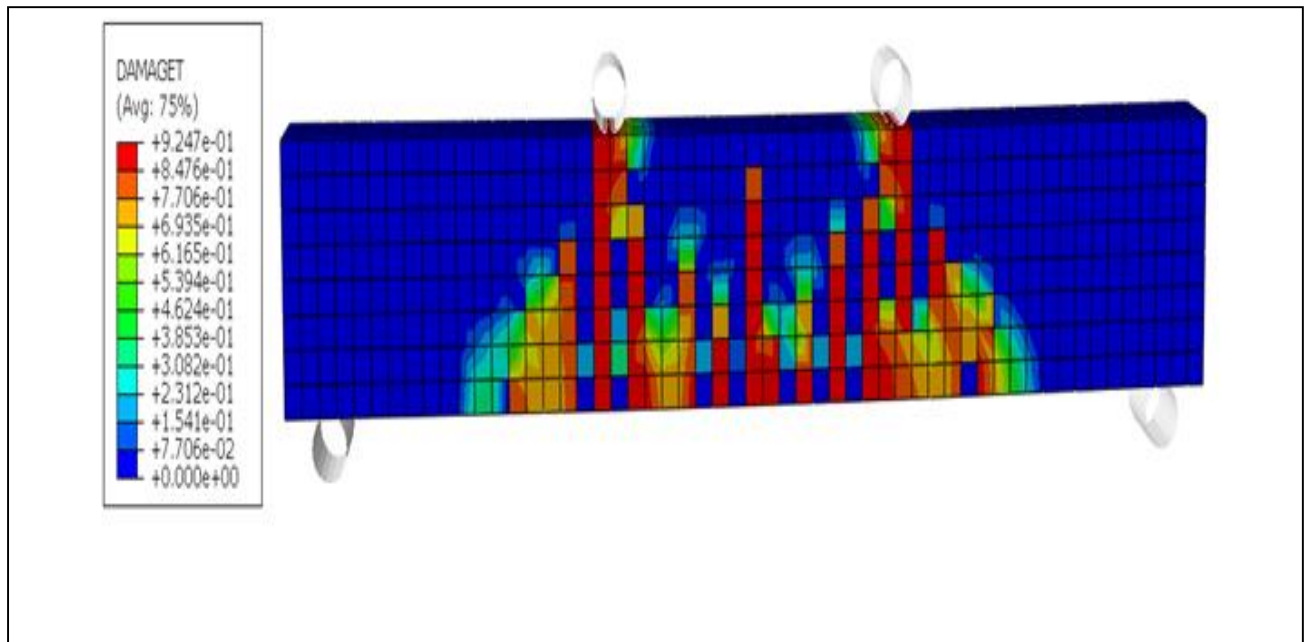


Figure III.12. Evolution de l'endommagement ( P2L)

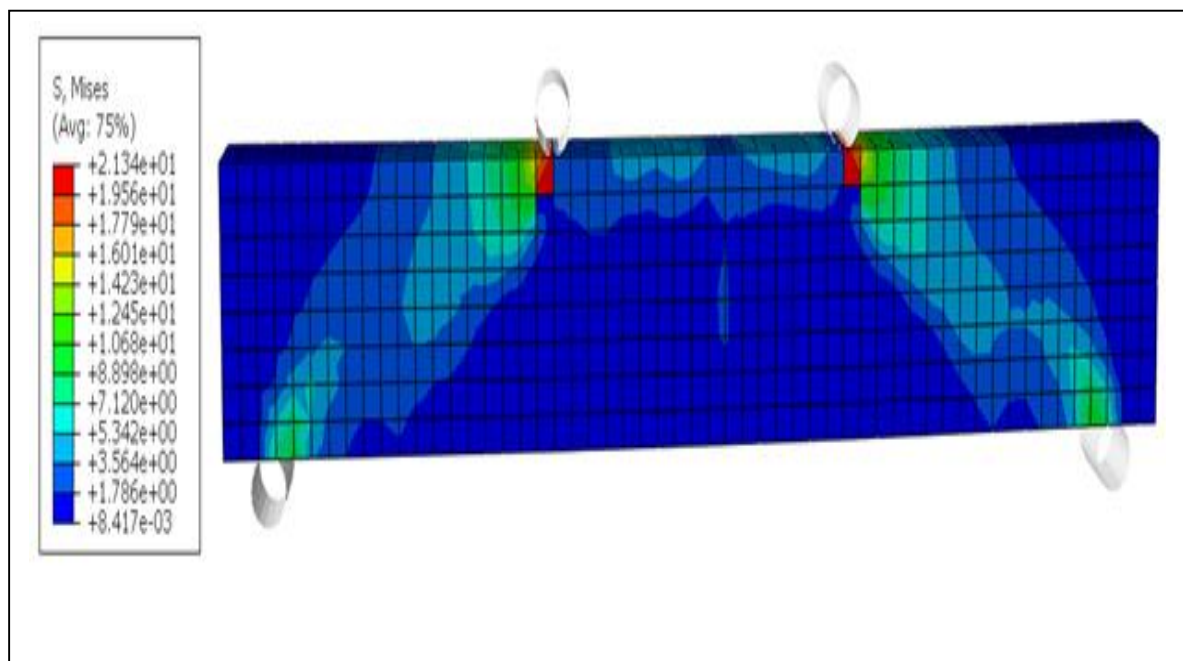


Figure III.13. Evolution de contraintes de Von Mises ( P2L)



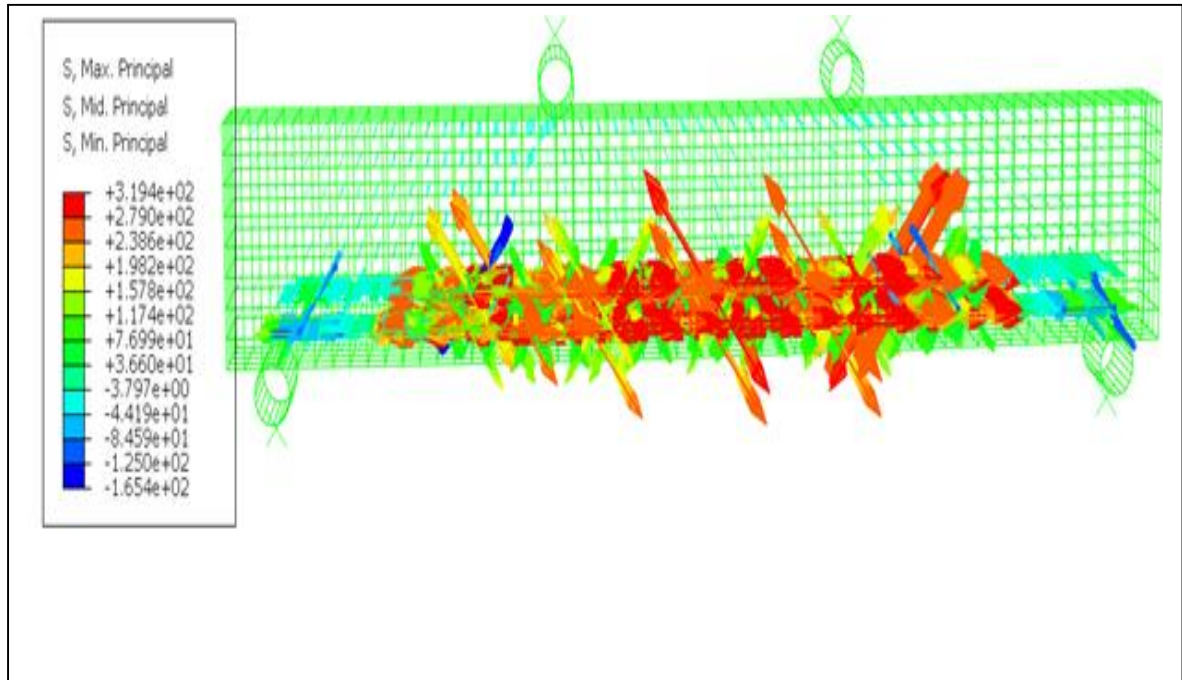


Figure III.14. Evolution du champ des contraintes ( P2L)

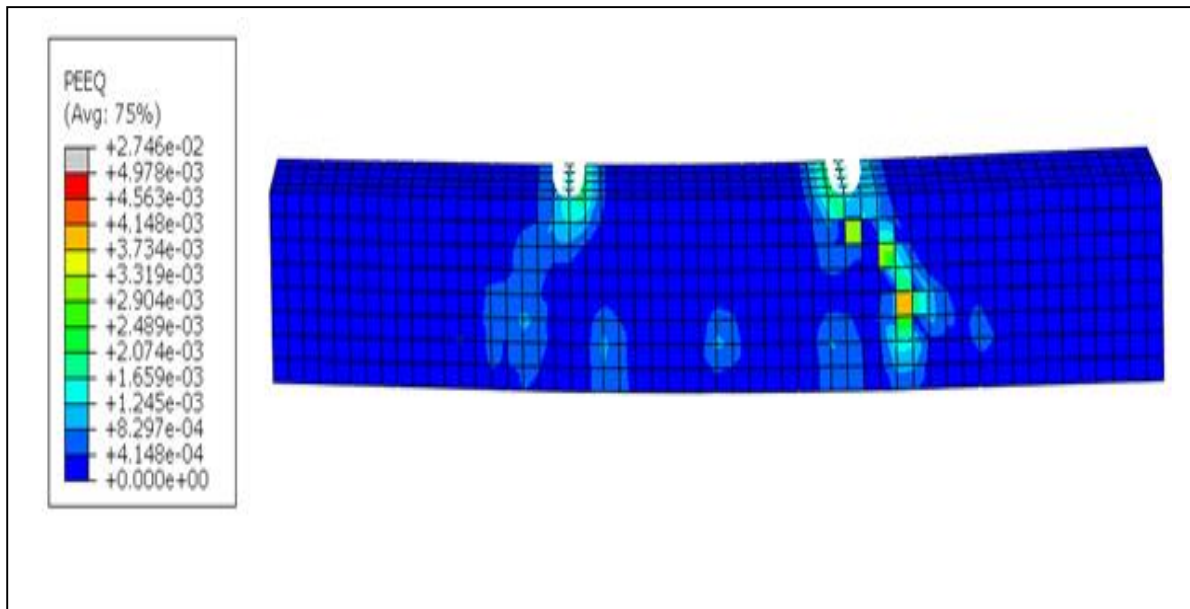


Figure III.15. Evolution de la fissuration (P2L)

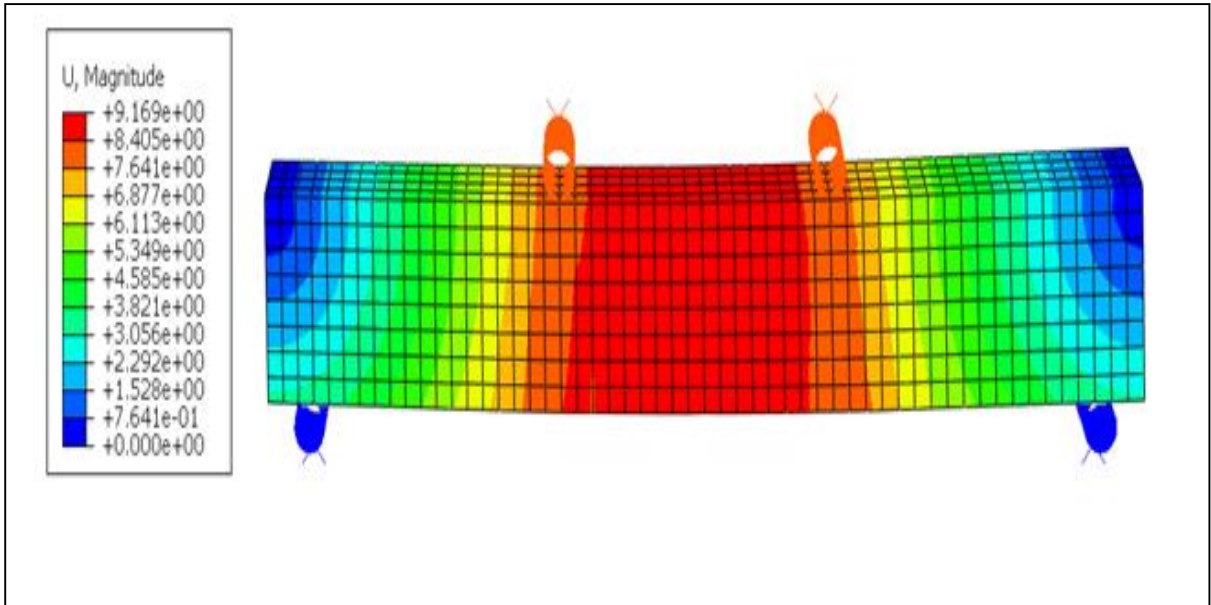


Figure III.16. Evolution de l'amplitude de déplacement ( P2L)

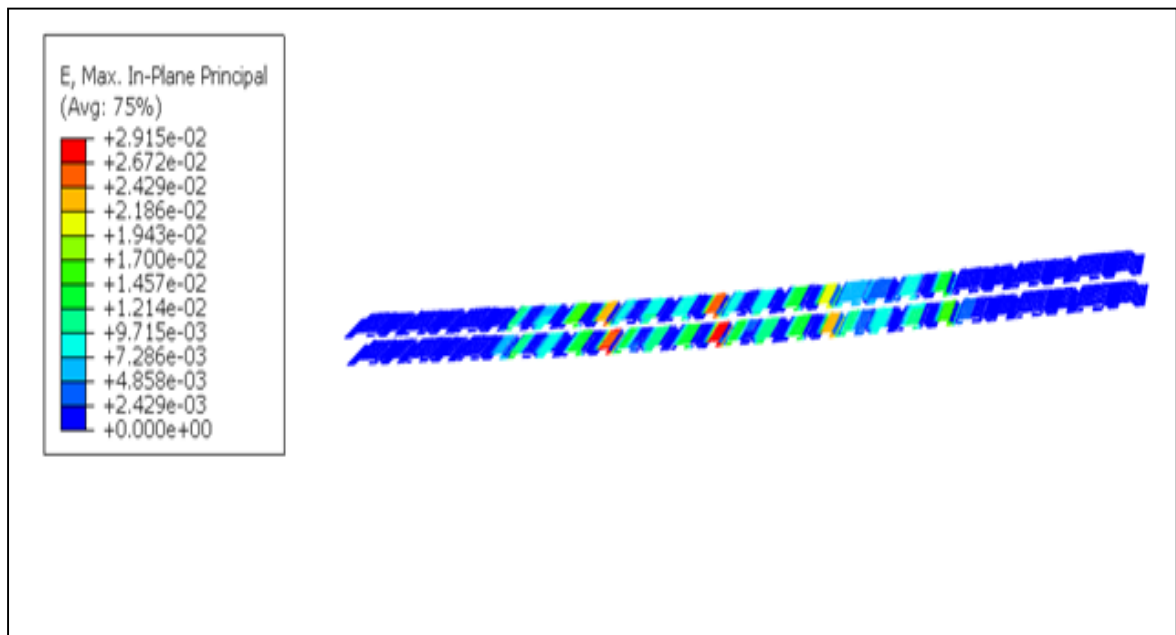
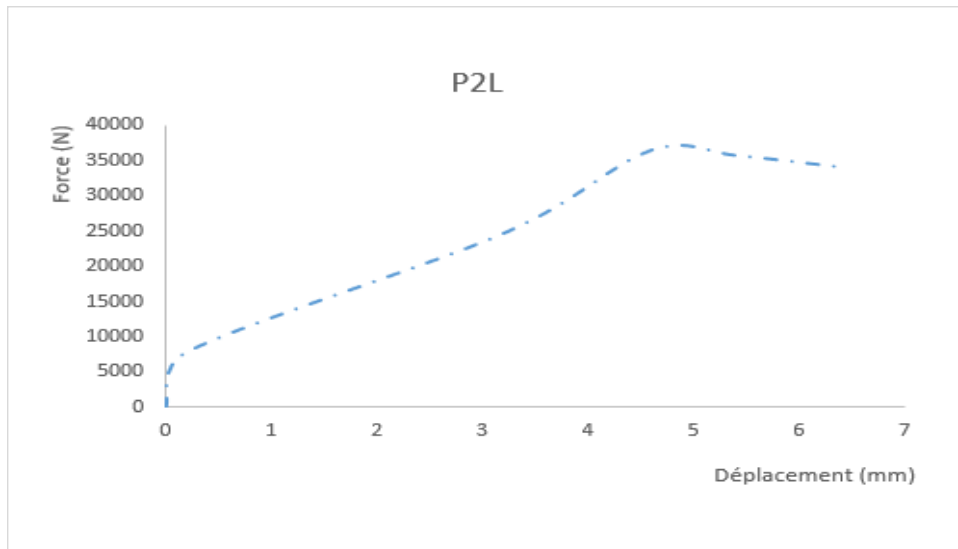


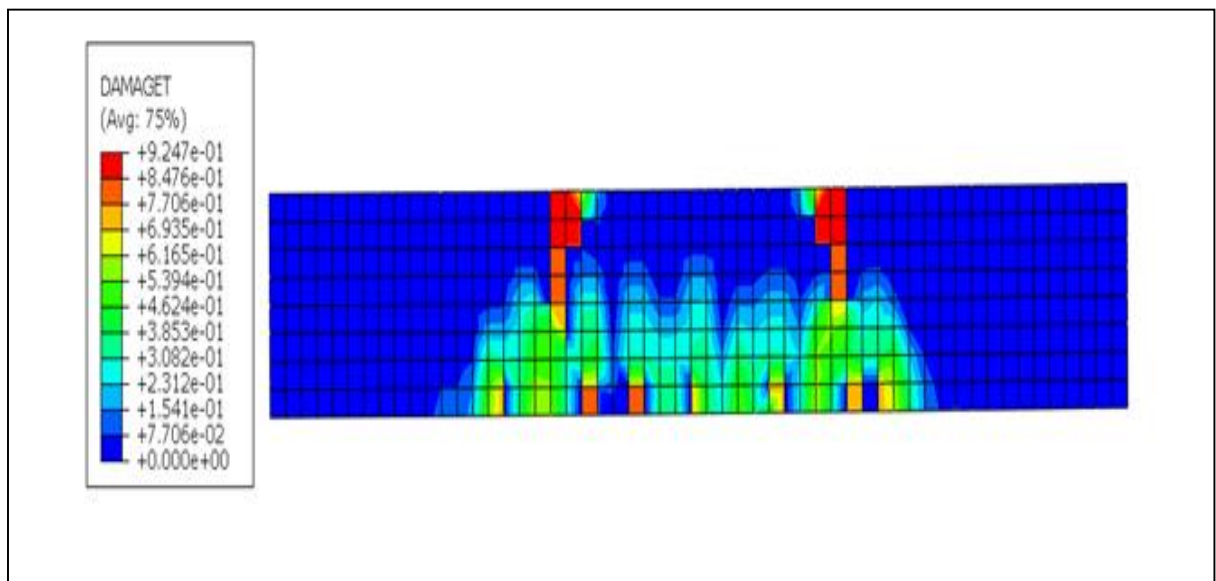
Figure III.17. Evolution de la déformation dans les fibres ( P2L)



**Figure III.18.** Courbe forces – déformations ( P2L)

Les résultats obtenus sur la poutre renforcée dans la zone tendue avec 02 lits de fibres (P2L) montrent qu’une petite ductilité est obtenue juste avant la rupture de la poutre. La force de rupture maximale est de 36,42 kN avec un déplacement correspondant de 4,6 mm Comparativement au cas de renforcement avec 01 seul lit de fibres ( P1L), l’augmentation de la résistance est de 11,6 kN ce qui représente environ 46 %. Avec une quantité de fibres doublée. La rupture est toujours obtenue au milieu de la poutre.

**III. 2. 4. Poutre avec 03 lits de fibres à 1,75, 4,25cm et 8 cm : (P3L)**



**Figure III.19.** Evolution de l’endommagement (P3L)

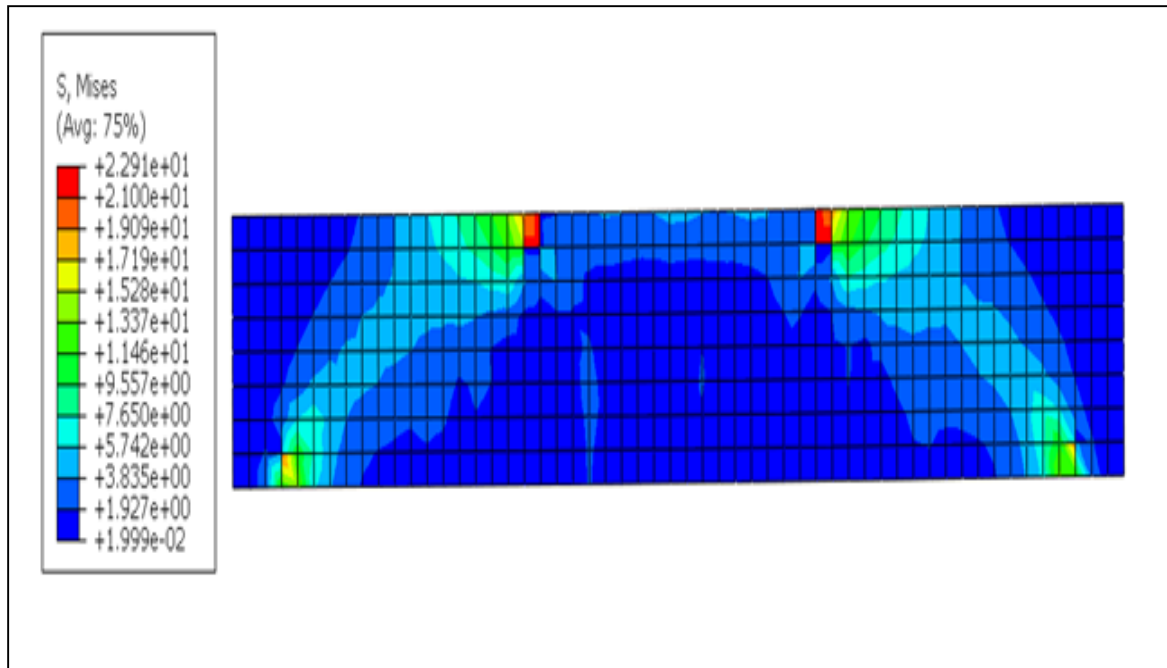


Figure III.20. Evolution de contraintes de Von Mises (P3L)

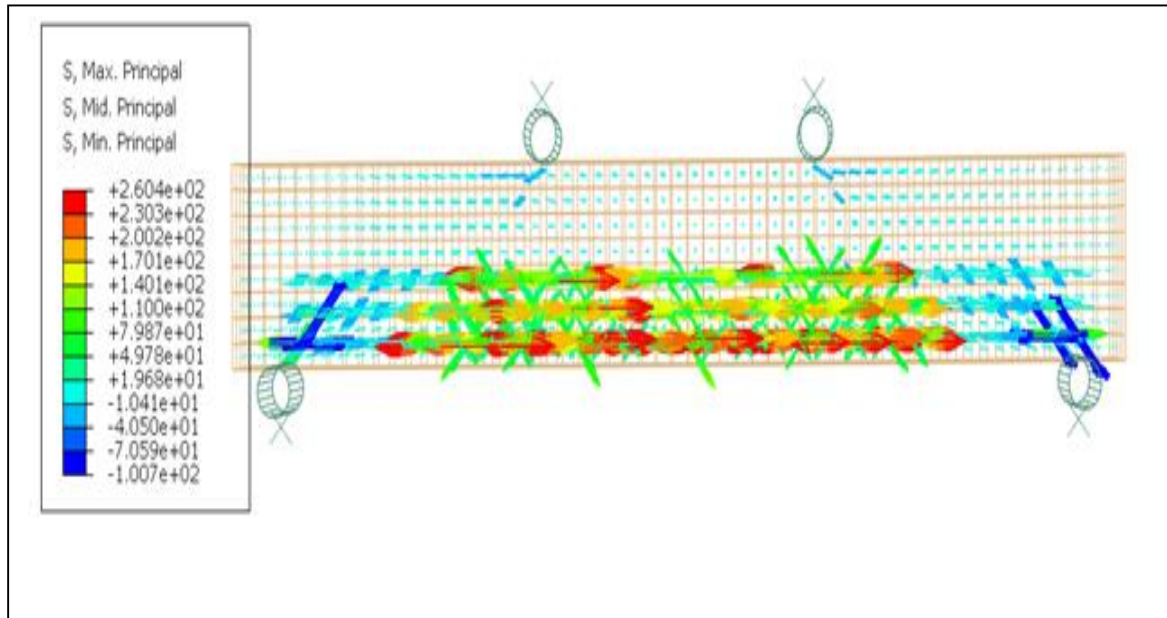
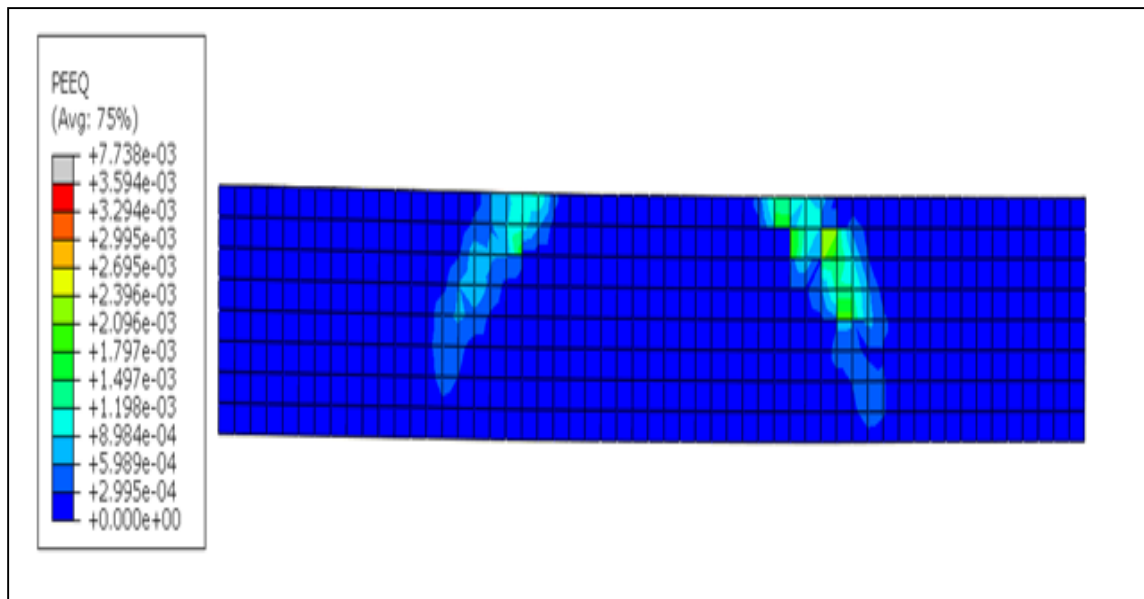
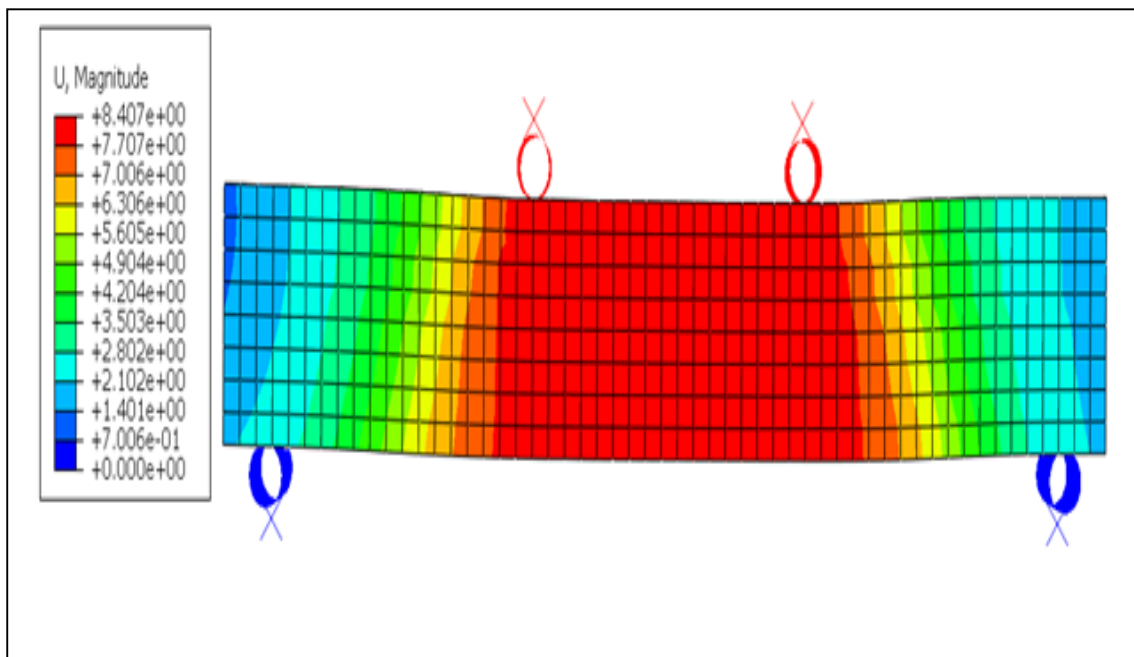


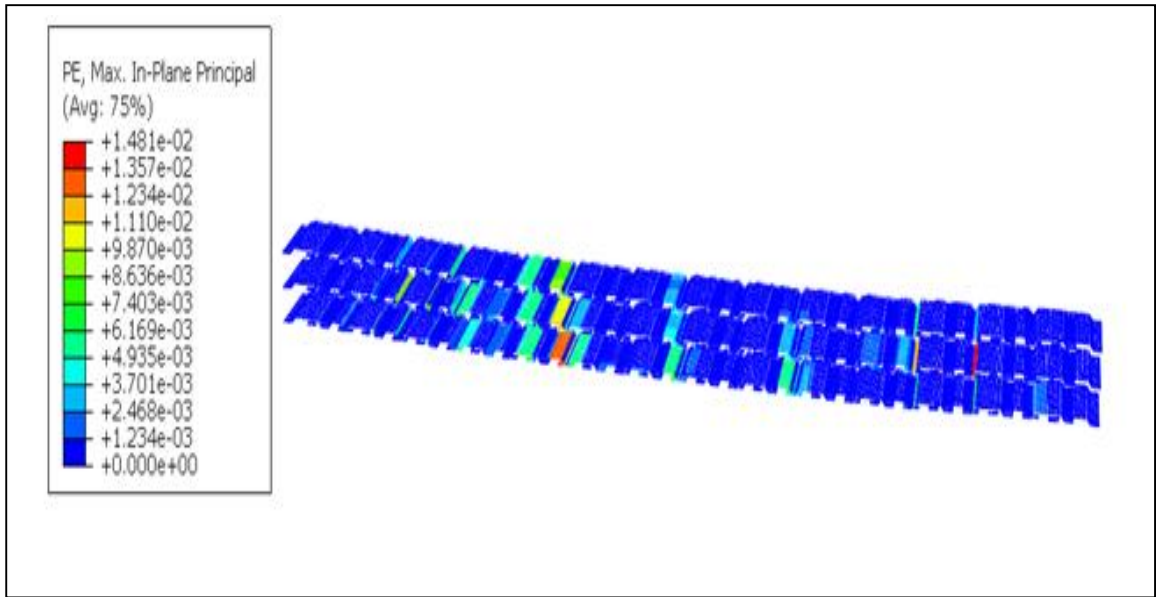
Figure III.21. Evolution du champ de dans les fibres (P3L)



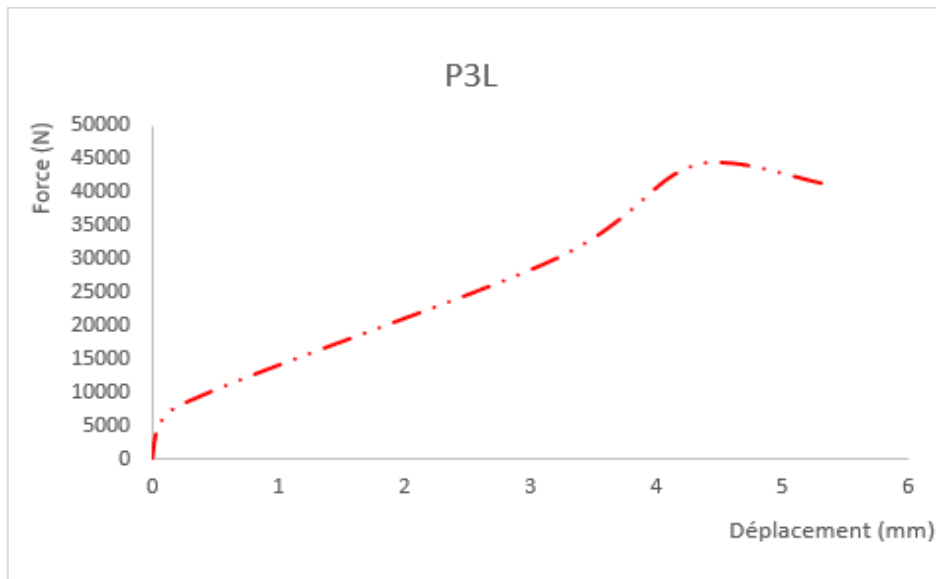
**Figure III.21.** Evolution de la fissuration (P3L)



**Figure III.22.** Evolution de l'amplitude de déplacement (P3L)



**Figure III.23.** Evolution de la déformation dans les fibres (P3L)



**Figure III.24.** Courbe forces – déformations (P3L)

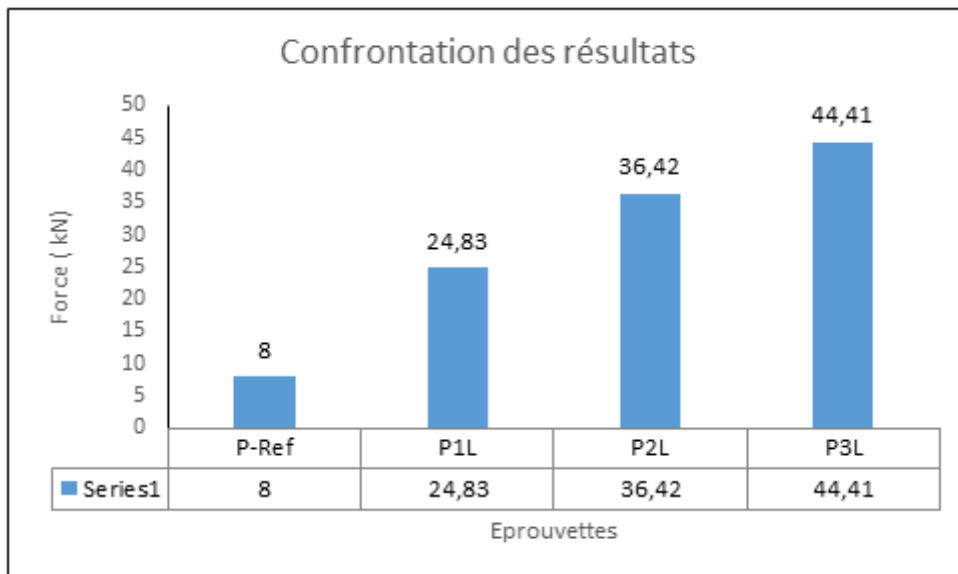


Figure III.25. Diagramme en barres des forces

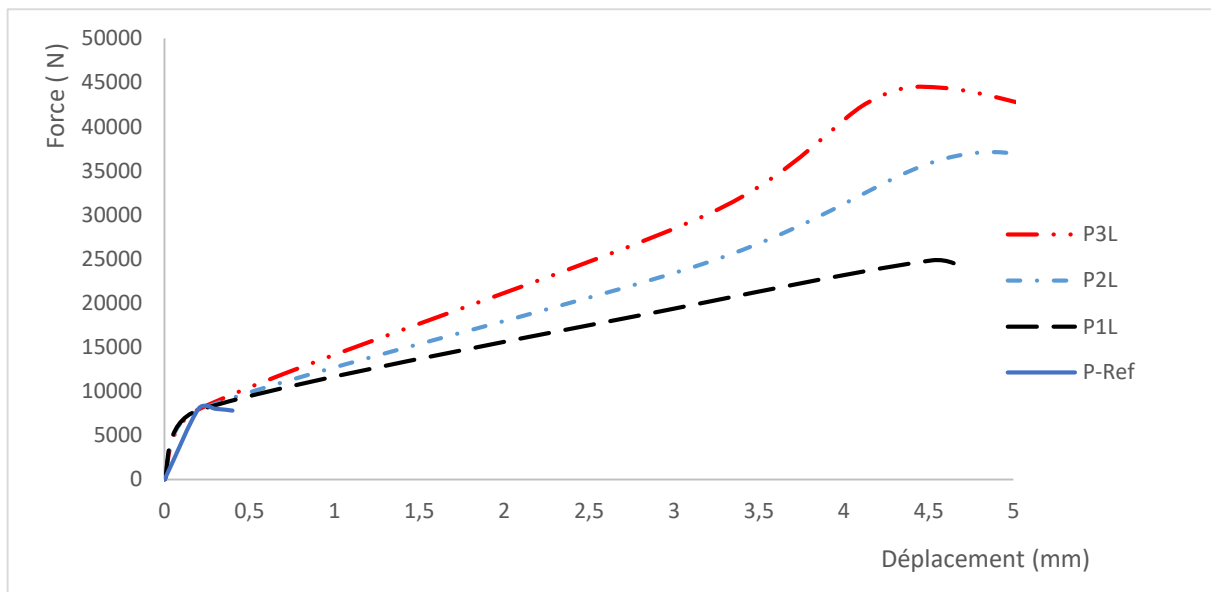
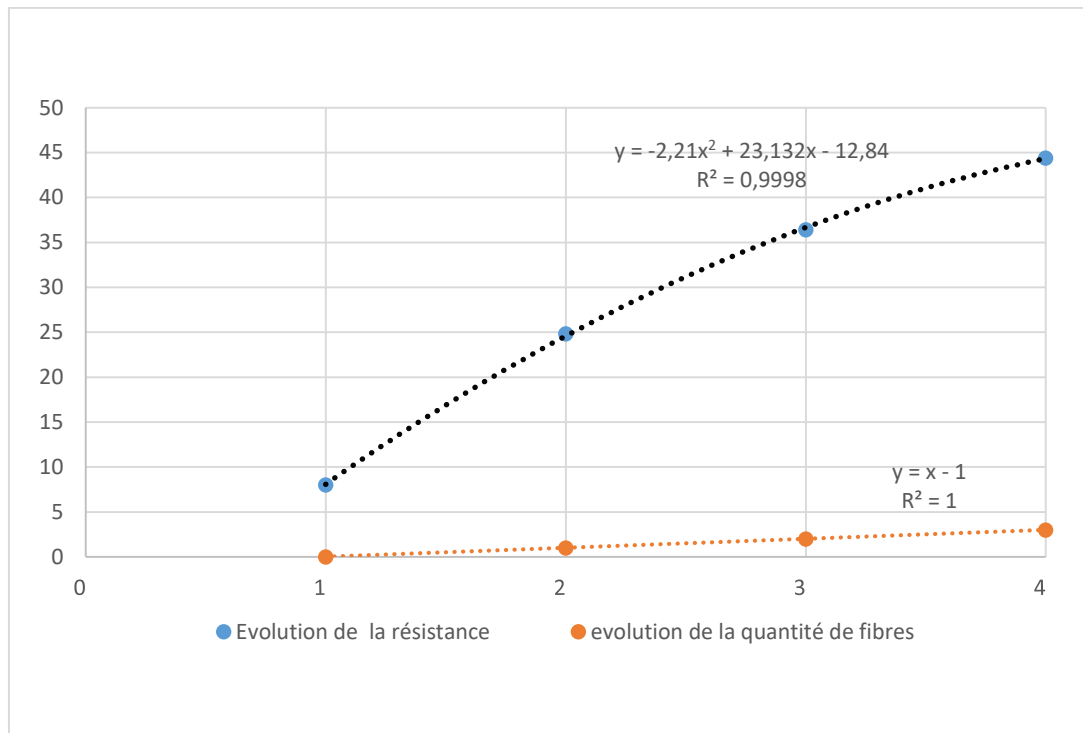


Figure III.26. Confrontation des courbes Forces- déplacements



**Figure III.27.** Evolutions de la résistance et de la quantité de fibres métalliques utilisées de tous les spécimens considérés.

On observe toujours une concentration des contraintes dans la partie centrale de la poutre. Les endommagements et les déplacements sont plus importants dans la partie centrale de la poutre. la force maximale de rupture est de 44,06 kN avec un déplacement correspondant de 4,59 mm . On constate également une augmentation de la résistance d'environ de 11,37 kN pour la variante P2L par rapport à P1L et de 8 kN pour la variante P3L par rapport à P2L ; donc l'évolution de la résistance n'est pas linéaire alors que la quantité de fibres métalliques connaît une évolution linéaire proportionnelle. L'augmentation de la résistance ne suit pas la même loi d'évolution que la quantité de fibres.



### **Conclusion du chapitre**

L'approche par multicouches du renforcement des poutres en béton par des fibres métalliques courtes alignées confirme la fiabilité de disposition des fibres, surtout longues le plus proche de la fibre la plus tendue. En effet, en augmentant la quantité de fibres d'une manière linéaire (proportionnalité), la résistance de la poutre ne suit pas une évolution linéaire, mais plus on s'approche de la l'axe neutre la courbe s'incurve et décline. Aussi, le mode de rupture observé sur toutes les poutres renforcées n'est pas influencé. La concentration des contraintes est toujours obtenue dans la partie centrale de la poutre.

---

---

# CONCLUSION GENERALE

---

---

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette étude consiste à évaluer l'influence d'utilisation des fibres métalliques courtes disposées à mi – hauteur de la ou les couches de béton considérées, tout le long de la portée sur la capacité portante de l'élément prismatique à travers d'une part une simulation numérique en utilisant le code de calcul Abaqus, du comportement de plusieurs poutres de configuration différente et une modélisation analytique en utilisant le modèle de résistance en considérant les équations d'Halpin –Tsai , basées sur les approches des composites, est menée pour quantifier la résistance de l'élément poutre en béton de fibres, en considérant les différentes dispositions des lits de fibres courtes. Les différents résultats obtenus, sont présentés sous forme de cartographies d'évolution des contraintes, des déformations et des dommages et de la fissuration.

Au terme de cette recherche, nous pouvons formuler les quelques conclusions suivantes :

- ✓ L'ajout des fibres métalliques dans une matrice béton procure à l'élément de structure une meilleure résistance comparativement à l'élément de structure témoin ;
- ✓ la position de la couche de béton de fibres par rapport à l'axe neutre est un facteur très prépondérant dans l'amélioration de la capacité portante et du comportement en général ;
- ✓ la décomposition de la hauteur de la zone tendue de la poutre en plusieurs couches d'épaisseur égale permet de mettre en évidence l'influence de la position du lit de fibres par rapport à l'axe neutre dans l'amélioration de la résistance, ce qui permet d'optimiser la couche de renforcement pour un meilleur rendement de la section vis-à-vis des chargements extérieurs ; cette approche peut être considérée comme un facteur économique justifiant la méthode de renforcement.
- ✓ l'utilisation de la même quantité de fibres dans la première couche considérée à partir de la fibre la plus tendue, équivalente à la quantité de fibres utilisée dans les trois couches considérées peut procurer à la poutre une meilleure résistance.
- ✓ Enfin, Il y a lieu d'indiquer qu'une étude comparative avec le cas d'une répartition aléatoire est souhaitée et recommandée pour la validation de cette approche fiable et économique de renforcement des poutres en béton de fibres soumises à la flexion.

---

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

---

## **Références Bibliographiques**

[1] Romualdi 1963 et 1964

[2] Rossi, P., 1998. Les bétons de fibres métalliques. Presse de l'ENPC.

[3] Boulekbache, B., "Etude des bétons de fibres métalliques avec référence aux propriétés rhéologiques et de ductilité sous sollicitations de : Compression, Fendage, Cisaillement direct et Flexion", thèse doctorat en sciences, Université Houari Boumediene, Alger, 2010, 166 pages.

[4] Casanova, P., "bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant", Thèse Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995, 225 pages

[5] GUILLAUME, «Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton», thèse doctorat de l'université de Toulouse septembre 2008.

[6] MOKHTARI Abdessamed : « Influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier » thèse magister, université KASDI Merbah Ouargla 06/11/2006

[7] Le magazine béton : « les fibres métalliques » revue Mars/Avril 2013

[8] Magazine : Tunnel et ouvrage sous terrain : les performances techniques des bétons renforcés de fibres métalliques et polymères » revue n° 198 novembre/décembre 2006.

[9] BELFERAG Alaoua : « valorisation des fibres métallique issues des déchets pneumatique dans les bétons de sable de dunes » thèse magister, université KASDI Merbah de Ouargla, 20 Juin 2006