

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mouloud MAMMERRI TIZI-OUZOU**

**Faculté du Génie de la Construction**

**Département de Génie Civil**



**Mémoire de Master**

**Spécialité : Génie-Civil**

**Option : Structures**

## ***Intitulé***

**Modélisation numérique du comportement  
d'un prisme en béton renforcé par des  
matériaux composites.**

**Proposé et dirigé par :**

**M<sup>me</sup> KHELOUI.F**

**Réalisé par :**

**HAMDADACHE Cylia**

**GAHAZ Karima**

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout, Dieu le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la foi pour accomplir ce travail.*

*Nos vifs remerciements s'adressent, en premier lieu à notre Encadreure **M<sup>me</sup> KHELOUI Fatma** pour sa disponibilité permanente, ses orientations, sa modestie et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour travailler dans les meilleures conditions.*

*Nous remercions vivement **Mr ALMANSBA Madjid** d'avoir consacré énormément de son temps pour répondre à nos interrogations et nous permettant ainsi de résoudre les problèmes rencontrés dans **ABAQUS**.  
Nous le remercions aussi pour ses conseils, sa gentillesse et ses encouragements.*

*Nous remercions également les doctorants de génie mécanique **HANNOU Aghilas**, **BOUDEDJA Amar** et **BENCHRIF Mokhtar** pour tous les conseils qu'ils nous ont donné ; Pour leurs aides et leur disponibilité ; pour le temps qu'ils nous ont consacré lors de la réalisation de cette étude malgré leurs nombreuses responsabilités.*

*Nous tenons à remercier le doctorant **Mr BENCHABEN.T**, pour, ses orientations, son savoir, et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères gratitude pour Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui m'ont apportés leur soutien, leur support et leur encouragement durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.*

*Mes frères et mes sœurs qui m'ont toujours aidée chaque fois que j'en ai eu besoin.*

*Mon fiancé Radjiv.*

*Enfin, ma belle-famille, mes amis et collègues sans exception.*



**KARIMA**



# Dédicaces

*Que ce travail témoigne mes respects à **mes Parents** ; Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Les mots ne suffisent pour leur rendre hommage et ne pourraient exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A mes frères,*

*A mes sœurs,*

*Mon neveu Racim et ma petite nièce Léane.*

*A tous mes amis(es), tous mes collègues ; sans oublier mon binôme Karima Gahaz.*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, je vous remercie.*

**CYLIA**



## **Résumé :**

Les recherches réalisées depuis plusieurs années, sur la possibilité d'utilisation de nouveaux matériaux dans le génie civil ont porté leurs fruits. À travers ces études, des systèmes de renforcement ont été testés et ont pu démontrer leur efficacité du point de vue comportement mécanique. Ces études expérimentales menées à ce jour confirment aisément que cette méthode de renforcement présente beaucoup plus d'avantages que les méthodes traditionnelles, de part la grande résistance, légèreté et la durabilité des matériaux composites. Dans cette recherche, une modélisation numérique, basée sur la méthode des éléments finis, du comportement d'un prisme en béton, renforcé d'une plaque composite dans la partie inférieure est traité, pour mesurer l'efficacité en terme de gain en résistance et en déformation. Trois charges telles que la poudre de liège, de fonte et de plomb associés à une résine ont été analysées avec des pourcentages bien définis. À préciser que les valeurs des différents pourcentages étudiés sont issues de l'étude expérimentale élaborée par Ben chabane (2013). Plusieurs pourcentages ont été étudiés pour quantifier la meilleure variante qui proposait de meilleures performances en termes de résistance et de limitations des fissures. Les résultats de la modélisation numériques sont repris sous forme de figures et histogrammes.

**Mots clés :** Prisme en béton, matériaux composites, renforcement, modélisation numérique, comportement mécanique, analyses.

**Abstract:**

Research carried out for several years on the possibility of using new materials in civil engineering has borne fruit. Through these studies, reinforcement systems have been tested and have been able to demonstrate their effectiveness from the point of view of mechanical behavior. These experimental studies carried out to date easily confirm that this reinforcement method has many more advantages than traditional methods, due to the great strength, lightness and durability of composite materials.

In this research, a numerical modeling, based on the finite element method, of the behavior of a concrete prism, reinforced with a composite plate in the lower part is treated, to measure the efficiency in terms of resistance gain and in deformation.

Three charges such as cork powder, cast iron and lead associated with a resin were analyzed with well defined percentages. Note that the values of the different percentages studied come from the experimental study developed by Ben Chabane (2013). Several percentages were studied to quantify the best variant which offered better performance in terms of resistance and crack limitations. The results of the numerical modeling are shown in the form of figures and histograms.

**Keywords:** Concrete prism, composite materials, reinforcement, numerical modeling, mechanical behavior, analyzes.

# SOMMAIRE

Remerciement

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

**Introduction générale..... 1**

## **Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition .....	3
I.3 .Constitution des matériaux composites .....	4
I.3.1. Matrices.....	5
I.3.2 Renforts.....	7
I.3.3. Différents types de résines .....	9
I.3.3.1. Les résines thermodurcissables.....	9
I.3.3.2 .Les résines thermoplastiques .....	9
I.3.3.3. Les matrices naturelles.....	9
I.3.3.4. Résines époxydes .....	9
I.3.3.5. Phénoplastes ou phénols-formols .....	9
I.3.3.6. Les résines thermostables.....	9
I.4. Les charges.....	10
I.4.1. Les charges organiques .....	10
I.4.2. Les charges minérales .....	10
I.4.3. Oxydes et hydrates métalliques .....	10
I.4.4. Le verre .....	10
I.4.5. Le carbone.....	11
I.5. Classification des Matériaux Composites.....	11
I.5.1. Classification suivant la forme des constituants .....	11
I.5.2. Classification suivant la nature des constituants.....	11
I.6. Légèreté et résistance .....	13

I.7. Procédés de transformation.....	13
I.8. Avantages et inconvénients.....	16
I.8. 1. Avantage .....	16
I.8. 2. Inconvénients .....	17
I.9. Applications des matériaux composites.....	17
Conclusion.....	18
<b>Chapitre II : Renforcement des éléments de structures dans le génie civil</b>	
II.1. Introduction .....	19
II.2. Définitions .....	19
II.2.1 Réhabilitation.....	19
II.2.2 Réparation.....	19
II.2.3 Renforcement.....	19
II.3. Causes de la réhabilitation d'une structure.....	20
II.4. Techniques de renforcement et de réparation des structures .....	21
II.4.1. Réparation des fissures .....	21
II.4.2. Adjonction d'armatures complémentaires.....	22
II.4.3. Chemisage en béton armé.....	23
II.4.4. Chemises en acier .....	23
II.4.5. Tôles d'aciers collés .....	23
II.4.6. Précontrainte additionnelle .....	24
II.4.7. Béton projeté.....	25
II.5 Renforcement des structures à l'aide des matériaux composites.....	26
II.5.1. Renforcement des poteaux.....	27
II.5.2. Renforcement des poutres .....	28
II.5.3. Renforcement des dalles .....	28
II.5.4. Renforcement des murs .....	29
II.6. Comportement du béton renforcé .....	30
Conclusion.....	31
<b>Chapitre III : Simulation et paramètres d'étude</b>	
III.1. Introduction .....	36
III.2. Présentation du logiciel .....	36
III.3. Démarches et étapes de simulation .....	38

III.3.1. Dimension et géométrie .....	39
III.3.2. Sections et assemblage .....	39
III.3.3. Maillage et MEF.....	40
III.3.4. Conditions aux limites.....	41
III.3.5. Gestion du contact Béton- composite.....	42
III.3.6. Gestion des résultats : STEP et JOB .....	43
III.4. Conclusion.....	44

### **Chapitre IV : Présentation des résultats et discussion**

IV.1. Introduction .....	45
IV.2. Principe de l'essai de flexion 3 points .....	45
IV.3. Caractéristiques mécaniques et géométriques.....	46
IV.4. Comportement global de prisme renforcé par les plaques composites .....	46
IV.4.1. Confrontation des courbes forces-déplacements.....	50
IV.4.2. Confrontation des histogrammes des déplacements .....	50
IV.4.3. Confrontation des histogrammes des forces .....	51
IV.4.4. Confrontation des histogrammes des contraintes.....	51
IV.5. Conclusion .....	62
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>63</b>

### **Annexes**

### **Références bibliographiques**

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Matériaux composites .....	4
<b>Figure I.2</b> : Composition des matériaux composite .....	5
<b>Figure I.3</b> : Les différentes familles de matrice .....	6
<b>Figure I.4</b> : Principaux matériaux de renfort.....	7
<b>Figure I.5</b> : Principales formes des renforts.....	8
<b>Figure I.6</b> : Composites souples avec matrice polymère .....	12
<b>Figure I.7</b> : Composites rigides .....	13
<b>Figure I.8</b> : Composites rigides avec matrice minérale.....	13
<b>Figure I.9</b> : Moulage au contact .....	15
<b>Figure I.10</b> : Moulage par projection simultanée.....	15
<b>Figure I.11</b> : Moulage sous vide .....	16

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Adjonction d'armatures supplémentaires .....	22
<b>Figure II.2</b> : Chemisage en béton armé.....	23
<b>Figure II.3</b> : Précontrainte additionnelle .....	24
<b>Figure II.4</b> : Technique de béton projeté.....	25
<b>Figure II.5</b> : Procédé de béton projeté .....	26
<b>Figure II.6</b> : Poteau en BA confiné par des matériaux composites.....	27
<b>Figure II.7</b> : Poutres renforcés par des matériaux composites.....	28
<b>Figure II.8</b> : Renforcement des dalles.....	28
<b>Figure II.9</b> : Renforcement des dalles.....	29
<b>Figure II.10</b> : Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné.....	30

<b>Figure II.11</b> : Effet de la pression de confinement sur le comportement du béton.....	31
<b>Figure II.12</b> : Essai sur des poutres renforcées. ....	33
<b>Figure II.13</b> : Écrasement d'un prisme en béton renforcé par des matériaux composites [39]. ....	34
<b>Figure II.13</b> : Poutres renforcées selon El-Saikaly et al. (2014).....	35

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1</b> : Présentation de l'interface ABAQUS .....	37
<b>Figure III.2</b> : Modélisation des géométries des éléments .....	38
<b>Figure III.3</b> : L'assemblage des éléments.....	40
<b>Figure III.4</b> : Maillages adoptés lors des simulations numériques des éléments.....	41
<b>Figure III.5</b> : Assemblage et conditions aux limites.....	42
<b>Figure III.6</b> : Modélisation du contact : Béton-Composite.....	42
<b>Figure III.7</b> : Le module STEP et JOB .....	43

### **Chapitre IV**

<b>Figure IV.1</b> : Essai de flexion trois 03 points.....	45
<b>Figure IV.2</b> : Courbe force-déplacement du béton témoin .....	47
<b>Figure IV.3</b> : Courbe force-déplacement du béton renforcé par plaque de renfort en Plomb 10% .....	47
<b>Figure IV.4</b> : Courbe force-déplacement du béton renforcé par plaque de renfort en Fonte 5% .....	48
<b>Figure IV.5</b> : Courbe force-déplacement du béton renforcé par plaque de renfort en Liège 15% .....	48
<b>Figure IV.6</b> : Superposition des courbes forces-déplacements .....	49
<b>Figure IV.7</b> : Histogramme des déplacements des prismes renforcés et non renforcé .....	50
<b>Figure IV.8</b> : Histogramme des forces des prismes renforcés et non renforcé .....	50
<b>Figure IV.10</b> : Évolution des contraintes du prisme renforcé par la plaque en Fonte.....	52

<b>Figure IV.11</b> : Évolution des contraintes du prisme renforcé par la plaque en Plomb .....	53
<b>Figure IV.12</b> : Évolution des déformations du prisme renforcé par la plaque en Liège .....	54
<b>Figure IV.13</b> : Évolution des contraintes du prisme non renforcé .....	55
<b>Figure IV.14</b> : Évolution des contraintes du prisme non renforcé .....	57
<b>Figure IV.15</b> : Évolution des déformations du prisme renforcé par la plaque en Fonte .....	58
<b>Figure IV.16</b> : Évolution des déformations du prisme renforcé avec la plaque en Plomb .....	59
<b>Figure IV.17</b> : Évolution des déformations prisme renforcé avec plaque en Liège .....	60
<b>Figure IV.18</b> : Courbe contraintes-déformations des différents prismes .....	61

## Liste des Tableaux

### Chapitre I

**Tableau I.1:** Propriétés des fibres. .... 6

**Tableau I.2 :** Propriétés mécaniques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA»..... 7

**Tableau I.3 :** Classification des matériaux composites..... 8

### Chapitre IV

**Tableau IV.1 :** Paramètre utilisées pour le comportement des plaques composites ..... 46

**Tableau IV.2 :** Dimension des plaques de renfort ..... 46

## Liste des symboles

$\sigma$ : Contrainte (MPa)

F : la charge appliquée (N)

L : longueur entre appui (mm)

b : largeur de l'éprouvette (mm)

h: Épaisseur (mm)

Re : limite élastique

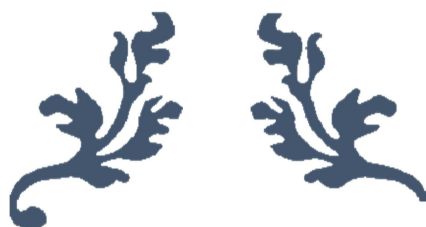
E : Module de Young

$F_{cc}$  : Résistance à la compression du béton confiné.

$F_{co}$  : Résistance à la compression du béton non confiné.

$\epsilon_{cc}$  : Déformation axiale maximale du béton confiné.

$\epsilon_{co}$  : Déformation axiale maximale du béton non confiné.



---

# Introduction générale

---



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement des technologies nouvelles, pour la réparation et la réhabilitation des ouvrages en génie civil, exige l'utilisation des matériaux présentant des propriétés mécaniques bien spécifiques à leur utilisation. Les techniques proposées consistent à chercher à compenser les pertes de rigidité dues à la fissuration et diminuer le risque de ruine. Le renforcement des structures en génie civil a pour but de réparer et de mettre en conformité des structures existantes, soit pour des raisons de pertes de propriétés initiales, pour des raisons de remise à niveau liées à de nouveaux règlements ou de nouveaux usages, soit pour des raisons esthétiques.

Dans la littérature, plusieurs auteurs proposent la réparation des structures en béton armé par des chemises en acier, tôles collées, incorporation de profilés métalliques, modification de la section structurelle (Chemisage en béton armé), précontrainte additionnelle externe et plus récemment, par des matériaux composites.

Ces matériaux présentent de divers avantages à savoir : faible coût de production, faible densité, stabilité de forme, sécurité, résistance au choc, excellente durabilité, dégradation de l'environnement réduite, très grande capacité de charge, maintenance réduite et facilité de réparation. A cet effet, plusieurs études ont été réalisées et se poursuivent sur ces matériaux dans le but de maîtriser leurs comportements dans des environnements spécifiques.

Ce travail de mémoire a pour objectif l'analyse numérique du renforcement des structures en béton par des plaques composites conçu à l'aide d'une résine et des déchets de récupération. L'intérêt de notre proposition est la mise en évidence de la contribution de cette technique dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques des structures. Le mémoire est structuré en quatre chapitres et est terminé par une conclusion générale, il se décompose comme suit :

Après une introduction générale sur la thématique traitée dans ce travail de recherche, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les matériaux composites. Une description de leurs constituants, propriétés, comportements et de leurs structures sont reportés. Le comportement mécanique, l'intérêt de leurs utilisations ainsi que leurs avantages et les différents domaines d'application sont aussi présentés.

## Introduction générale

Le deuxième chapitre comporte une revue détaillée sur le renforcement des éléments de structures dans le génie civil. Le renforcement et la réhabilitation des structures dans le génie civil dépendent de nombreux paramètres tels que : la qualité de conception, l'environnement d'implantation, les matériaux utilisés ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Le troisième chapitre, est dédié à la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Abaqus. Il donne un aperçu sur les principales étapes de la simulation par éléments finis. Cette analyse est consacrée à la modélisation du comportement des structure composite chargée en flexion jusqu'à la rupture. Les différents matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques après identification de leurs paramètres mécaniques à partir des essais au laboratoire. Les actions principales permettent de créer la géométrie et les conditions aux limites du modèle ainsi que le fonctionnement du code de calcul par éléments finis sont détaillées.

Le quatrième chapitre regroupe l'ensemble de tous les résultats de l'analyse des différents éléments modélisés. Les résultats mettent en évidence l'intérêt du renforcement externe par des plaques composites du pont de vue résistances et déformations. Les différents résultats sont présentés sous forme de cartographies, courbes contrainte déformation et histogrammes qui décrivent le comportement du prisme en béton renforcé et non renforcé. Une analyse est ensuite réalisée pour mettre en évidence l'apport de ce renforcement en termes de résistance et de ductilité.

Ce travail est finalisé par une conclusion générale.



---

# Chapitre I

*Généralités sur les matériaux composites*

---



## *1.1. Introduction :*

L'objectif de ce chapitre est la recherche bibliographique sur les matériaux composites par une description de leurs constituants, propriétés, comportements et de leurs structures.

Étant donné l'importante diversité de ces matériaux, il est nécessaire de recenser les différents constituants de ces derniers. On présentera le procédé de fabrication, domaine d'utilisation, avantages et inconvénients,...

Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par apport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite et liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils offrent une meilleure isolation thermique et phonique, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique [01].

L'intégration de ces nouveaux matériaux dans nos constructions est le nouveau défi des concepteurs, dont le premier souci est de prolonger la durée de vie des structures, tout en respectant bien sûr les normes de sécurité et de performances mécaniques de plus en plus sévères, c'est dans cette optique que sont nés les matériaux composites. Si avant l'approche privilégiée était celle de la démolition et reconstruction, actuellement, pour des raisons économiques, une attention de plus en plus grande est portée à l'option de renforcement et réparation par ces matériaux composites.

## *1.2. Définition:*

Un matériau composite peut être défini comme étant l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux. L'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice.

La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite.

# Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons.

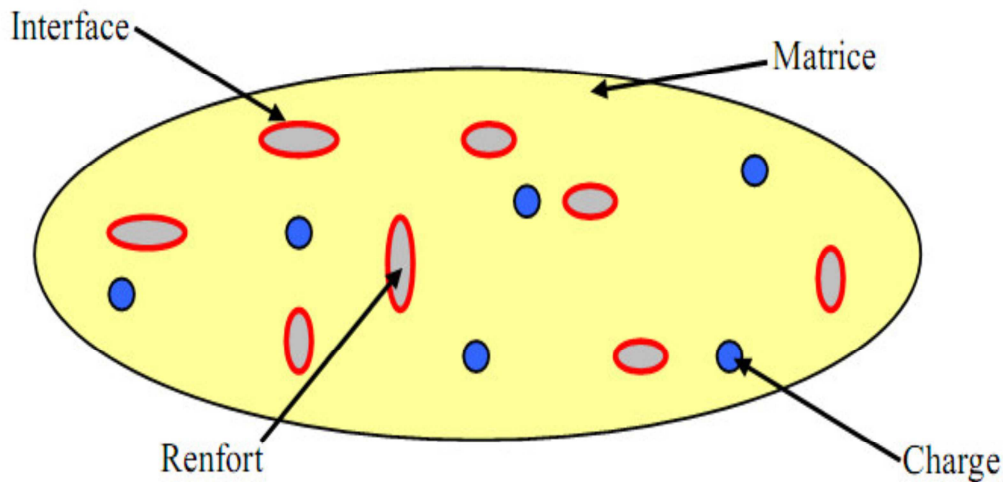


Figure I.1 : Matériaux composites [02]

## *1.3. Constitution des matériaux composites :*

Un matériau composite est constitué de deux phases :

**Une phase continue** qui est la matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, assure la protection des fibres et le transfert des efforts vers ces dernières, plus rigides et plus résistantes. Son rôle consiste à maintenir les fibres en place, de transmettre et de distribuer les sollicitations mécaniques extérieures au renfort, de fournir un support latéral agissant contre le voilement des fibres sous compression et de les protéger contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales.

**Une phase discontinue** constituée de renforts ou fibres qui assurent la fonction mécanique (résistance). Le comportement mécanique des matériaux composites est gouverné par plusieurs facteurs principaux, tels que: le type et nature des fibres de renfort, le type de matrice, la fraction volumique des constituants.

# Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

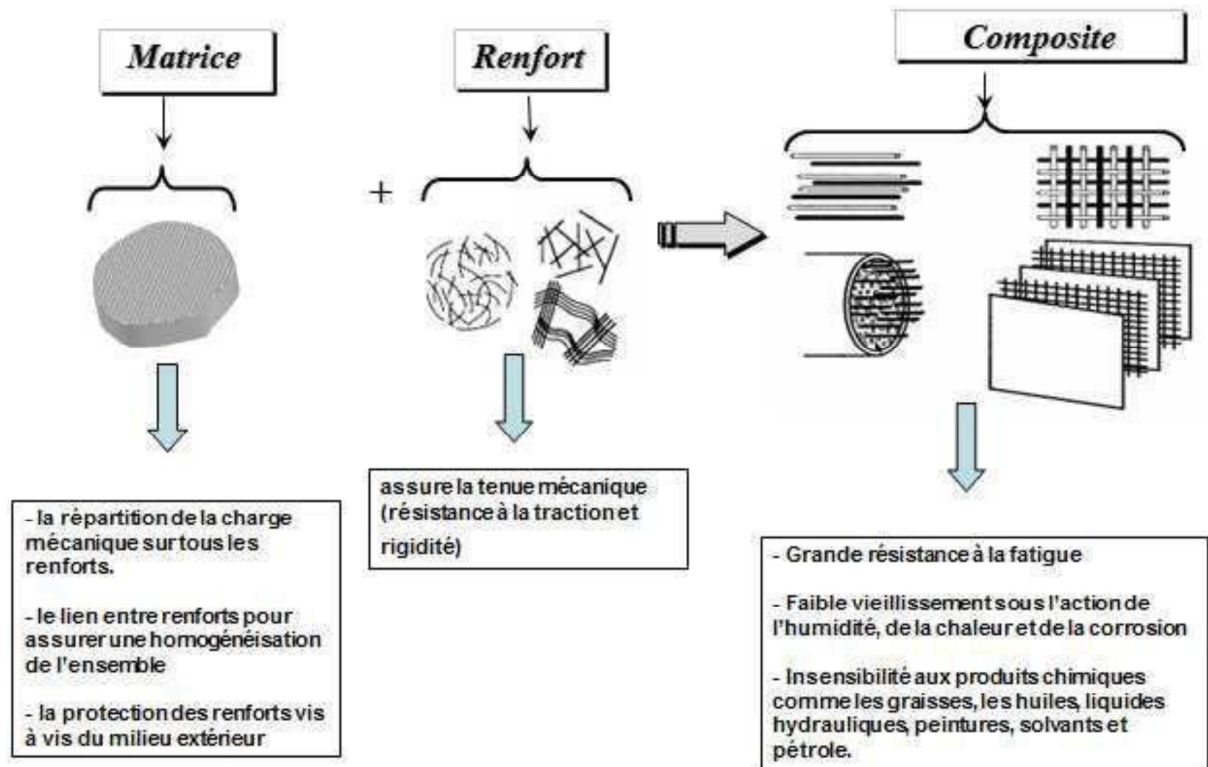
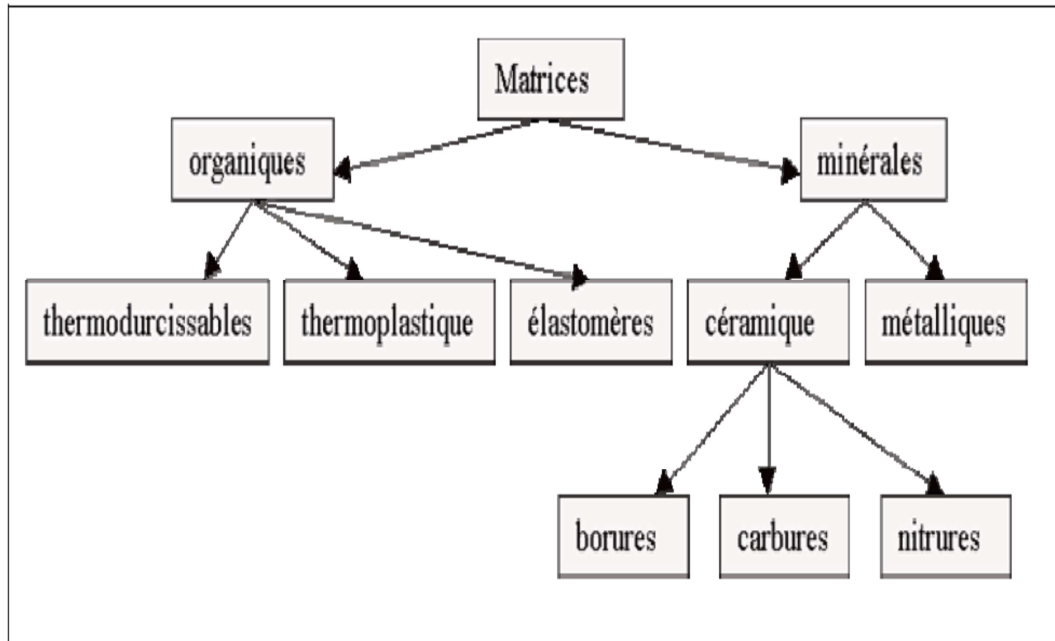


Figure I.2 : Composition des matériaux composite. [15]

## 1.3.1. Matrices :

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes se développe fortement. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes.

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites



**Figure I.3:** Les différentes familles de matrice [04]

En génie civil, les résines thermodurcissables sont utilisées presque exclusivement, telles que les matrices vinylesters, polyesters et époxy. Le Tableau suivant donne un ordre de grandeur des caractéristiques des fibres usuellement employées dans la fabrication des matériaux composites.

**Tableau I.1:** Propriétés des fibres [04].

Filament	Diamètre (µm)	Densité	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température de fusion (°C)
Verre E	3 à 30	2,54	3 400	73 000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2 500	55 000	4,5	–
Verre R	3 à 30	2,48	4 400	86 000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3 500	200 000	1	2 500
Carbone HM	8	1,8	2 200	400 000	0,5	2 500
Aramide HR	12	1,45	3 100	70 000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3 100	130 000	2	480

HR : haute résistance ; HM : haut module.

# Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

## I.3.2 Renforts :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de 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: linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

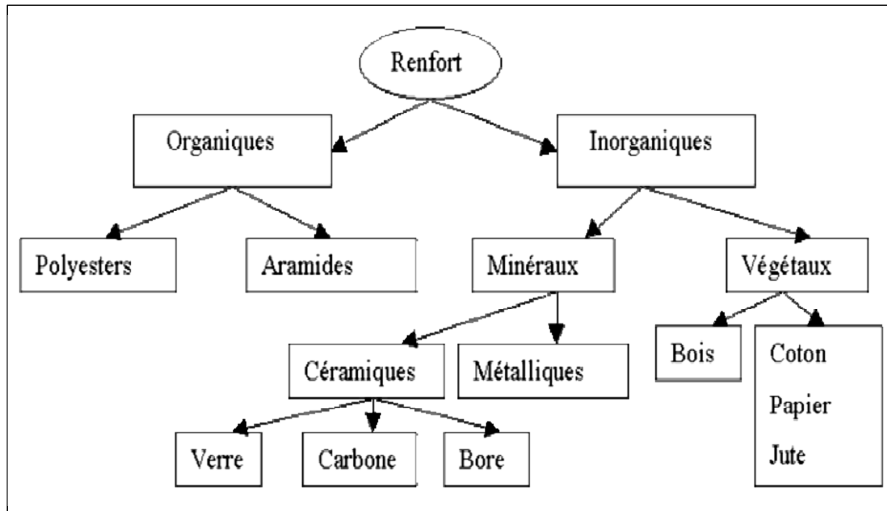


Figure I.4: Principaux matériaux de renfort. [17]

Tableau I.2: Propriétés mécaniques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA».

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (kg / m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

# Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

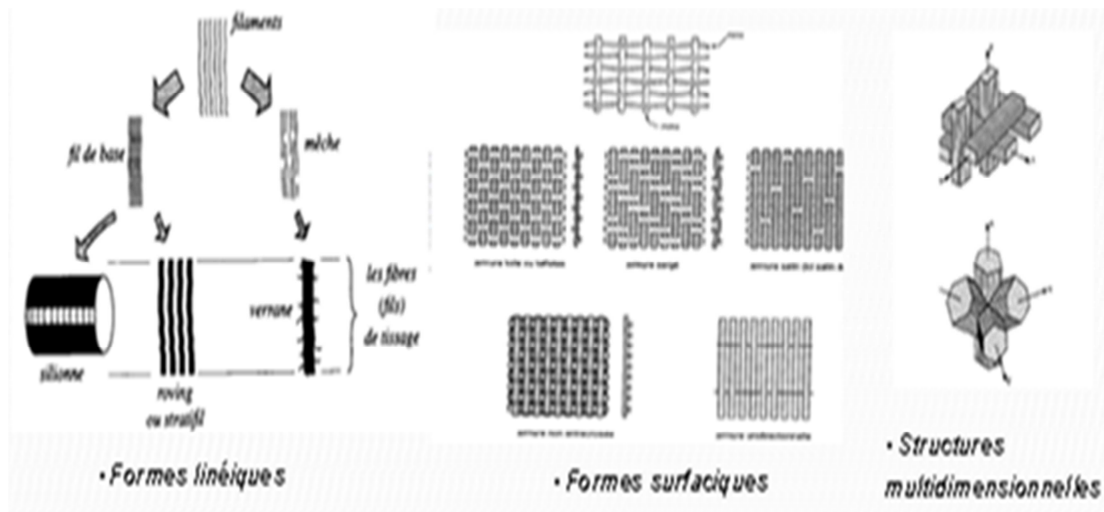


Figure I.5: Principales formes des renforts. [14]

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires,  $\rightarrow$  poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

Nous avons représenté sur le tableau suivant, les différents types de matrices et renforts utilisés actuellement.

Tableau I.3: Classification des matériaux composites [14].

Classe	Exemple	Composantes	Applications
Composites à matrice organique	carton pneus stratifiés	cellulose caoutchouc, acier résines organiques, fibres de verre, carbone, bore etc.	emballages etc. transports structures légères
	plastiques renforcées	résines, fibres courtes	diverses
Composites à matrice minérale	béton	ciment, sable, additifs	génie civil
	composites C-C	C, fibres de C	aérospatial, aviation, sport, biomécanique
	composites céramiques	céramiques et fibres céramiques	composantes thermomécaniques
Composites à matrice métallique		Al/fibres de B Al/fibres de C	aérospatial
Alliages	aciers Alliages d'Al cuivres	C, Fe, Mn, Cr, Al, Cu, Sn etc.	diverses

## *1.3.3. Différents types de résines :*

Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. Ces deux types de résines possèdent la faculté d'être moulés pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée

### *1.3.3.1. Les résines thermodurcissables :*

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois [04].

### *1.3.3.2. Les résines thermoplastiques :*

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement [05].

### *1.3.3.3. Les matrices naturelles :*

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et microorganismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l'amidon, la cellulose la lignine [06].

### *1.3.3.4. Résines époxydes :*

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques dont les principales applications concernent les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone) [07].

### *1.3.3.5. Phénoplastes ou phénols-formols :*

Les phénoplastes sont des matières thermodurcissables obtenues par polycondensation d'un phénol et d'un aldéhyde avec élimination d'eau et formation d'un réseau tridimensionnel [08].

### *1.3.3.6. Les résines thermostables:*

Elles se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace [09].

## *1.4. Les charges :*

On désigne sous le nom de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électrique ou thermiques.

### *1.4.1. Les charges organiques :*

On distingue :

- charges cellulosique, utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes) ;
- les avantages de ces matières cellulosiques sont leur cout peu élève et leur faible densité ;
- farine de bois, farines d'écorces de fruit et de noyaux ;
- fibres végétales ;
- pates de cellulose ;
- Amidons.

### *1.4.2. Les charges minérales :*

- la silice( $\text{SiO}_2$ ), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine sa cristallinités dureté et la taille des particules ;
- les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

### *1.4.3. Oxydes et hydrates métalliques :*

- l'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de poudre fines comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques des résines époxydes, des polyesters insaturés.

### *1.4.4. Le verre :*

- une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie  $13\mu\text{m}$  est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et la compression, elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées ;

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- les billes de verre creuses de densité comprise entre 0.1 et 0.5 sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant.

### *1.4.5. Le carbone :*

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant. Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules. [10]

### *1.5. Classification des Matériaux Composites :*

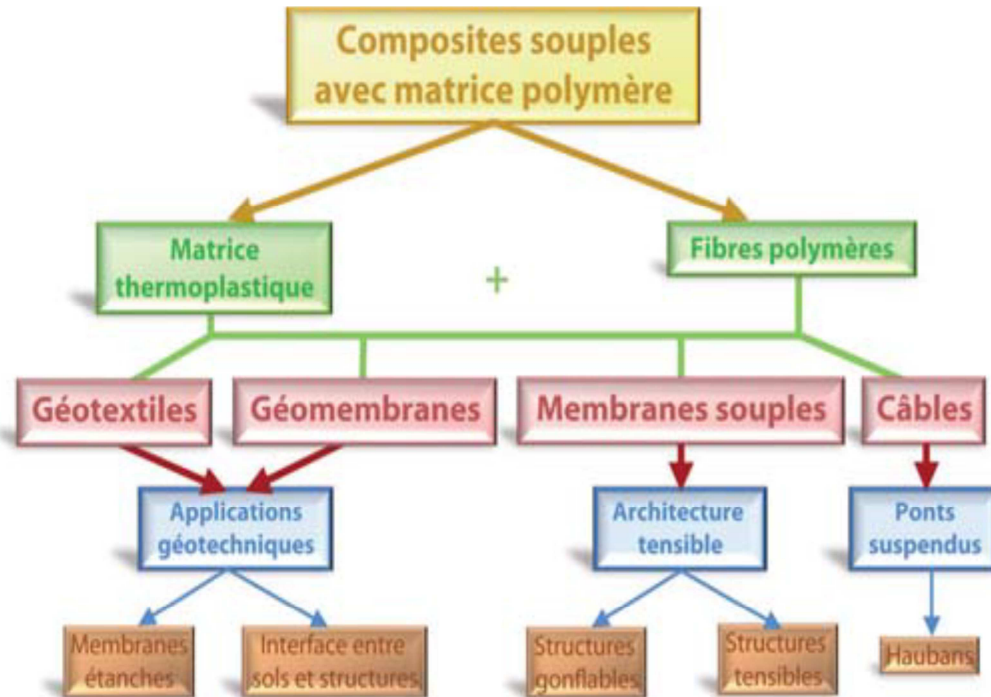
#### *1.5.1. Classification suivant la forme des constituants :*

Suivant la forme des constituants, on distingue les matériaux composites à particules, dans lesquels le renfort se trouve sous forme de particules. Le deuxième type de matériaux est appelé matériaux composites à fibres, dans lesquels le renfort est sous forme de fibres. Ces dernières peuvent être longues ou courtes. L'orientation (disposition) des fibres permet de donner au matériau des propriétés mécaniques selon une direction privilégiée.

#### *1.5.2. Classification suivant la nature des constituants :*

Basée sur la nature des constituants (matrice et renforts). Suivant la nature de la matrice, on distingue les matériaux composites à matrice organique, à matrice métallique et à matrice minérale.

Les matériaux composites sont recherchés pour la construction dans deux domaines différents: les matériaux d'enveloppe (le second œuvre) et les matériaux structuraux (ossature) chargés de supporter les efforts pour la tenue du bâtiment et son exploitation. On les classe en matériaux composites « souples » d'une part et « rigides » d'autre part. Les composites souples peuvent aussi être des géotextiles ou des géo membranes, matériaux d'interfaces entre le bâtiment, l'habitat etc....



**Figure I.6 :** Composites souples avec matrice polymère.

Les composites rigides sont des matrices thermodurcissables renforcées en général par des charges minérales. Ils permettent de réaliser des « bétons de polymères » ou des revêtements routiers comme les bétons de ville quand ils sont associés à des fibres telles que la fibre carbone-aramide. On réalise avec ces composites des structures que l'on appelle matériaux stratifiés, qui sont des empilements de couches et dont les applications sont la réalisation d'éléments d'enveloppe tels que les panneaux de façade.

# Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

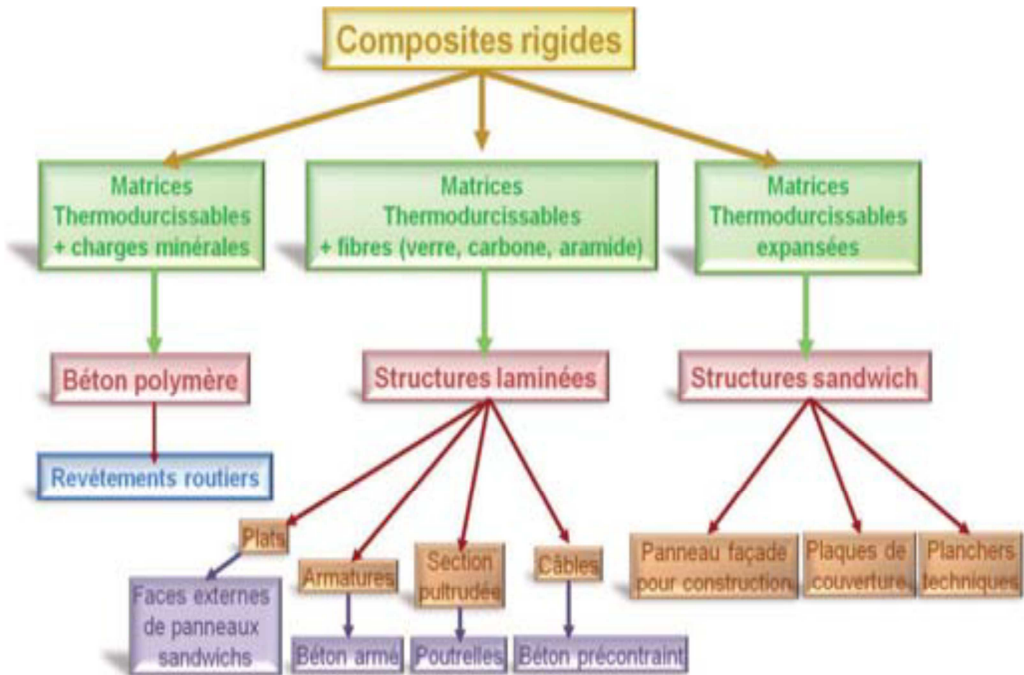


Figure I.7 : Composites rigides.

Malgré tous les atouts des matériaux composites, les matrices cimentaires traditionnelles chargées d'ions minéraux restent majoritairement utilisées. Des matrices cimentaires peuvent être utilisées pour la fabrication de matériaux composites en lieu et place des matrices polymères; des fibres de carbone ou des fibres polymères sont utilisées comme charges.

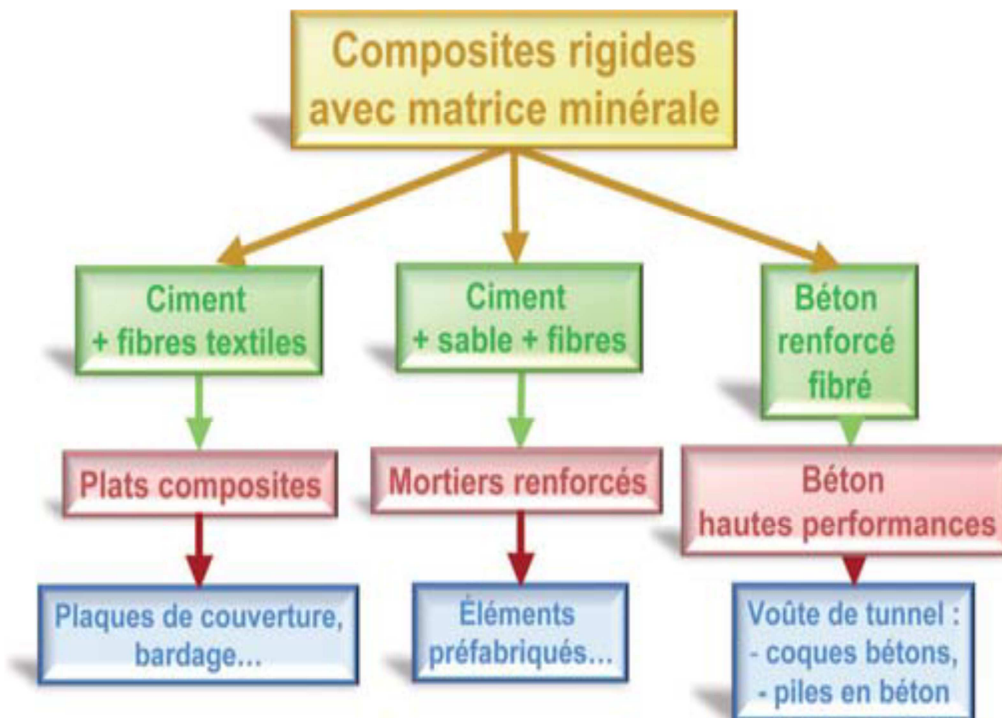


Figure I.8 : Composites rigides avec matrice minérale.

## *1.6. Légèreté et résistance :*

Les matériaux composites disposent d'atouts par rapport à des produits concurrents. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la fatigue), mais aussi grâce à leurs propriétés chimiques (résistance à la corrosion). Ils renforcent également la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions.

## *1.7. Procédés de transformation :*

Le choix du procédé de transformation est guidé à la fois par la nature du matériau (thermoplastique ou thermodurcissable), la forme de la pièce à réaliser, les performances visées, et les impératifs de production en termes de quantité et de cadence. La réalisation de pièces en composites destinées aux marchés de grande diffusion (automobile, électricité, bâtiment) nécessite la mise en œuvre de procédés de transformation fortement automatisés, à productivité élevée. L'utilisation de matériaux pré-imprégnés sous forme de feuilles ou de granulés permet d'obtenir des produits par compression ou injection avec des temps de cycle réduits. Le mélange des constituants élémentaires (résine, renfort, catalyseur, charges) peut être réalisé préalablement à la mise en forme définitive du produit par estampage, compression ou moulage.

- Moulage au contact : Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée.

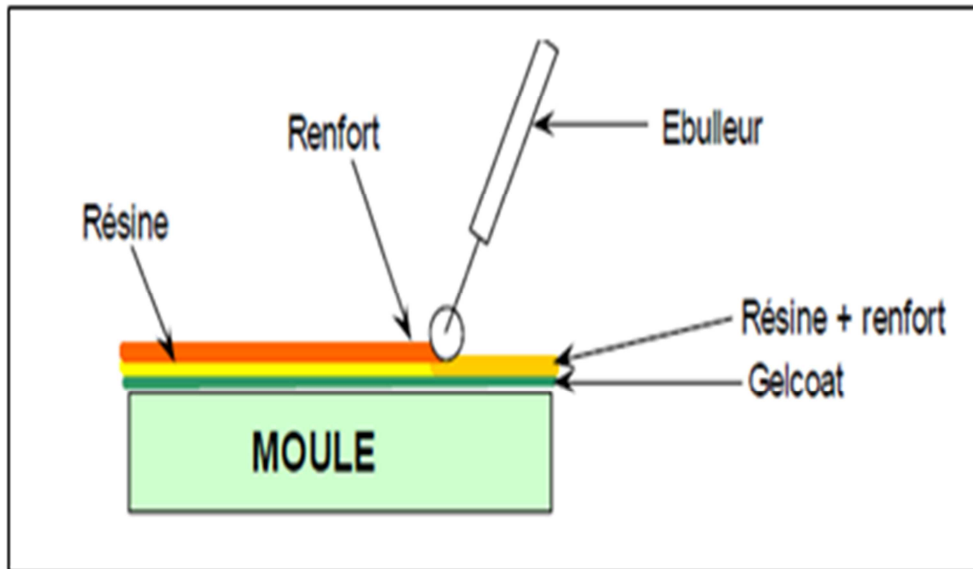


Figure I.9 : Moulage au contact. [16]

- Moulage par projection simultanée: Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection".

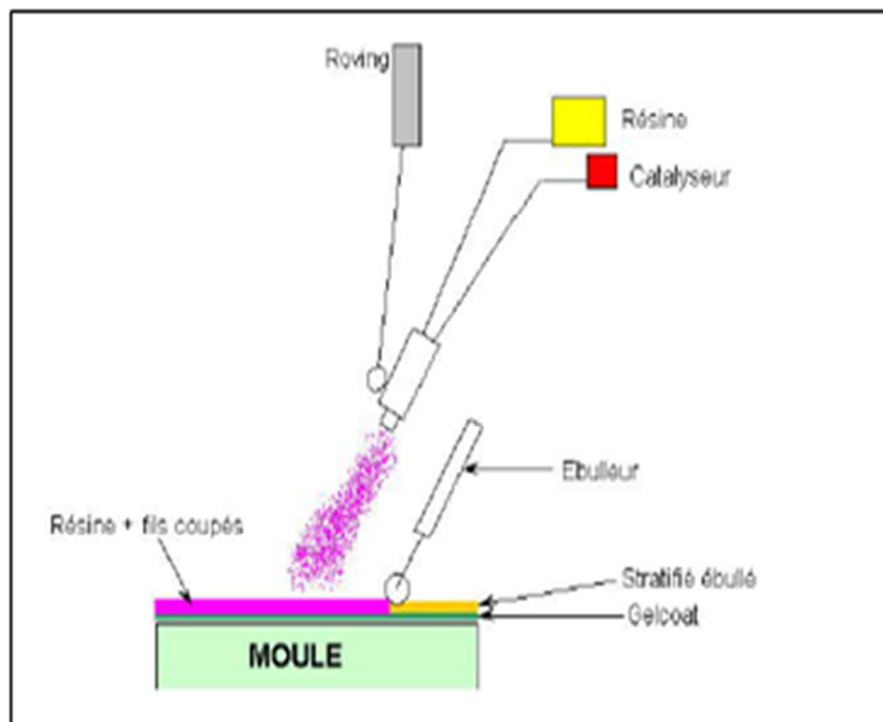


Figure I.10 : Moulage par projection simultanée. [16]

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Moulage sous vide : Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort (mat, tissu) est placé à l'intérieur du moule; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

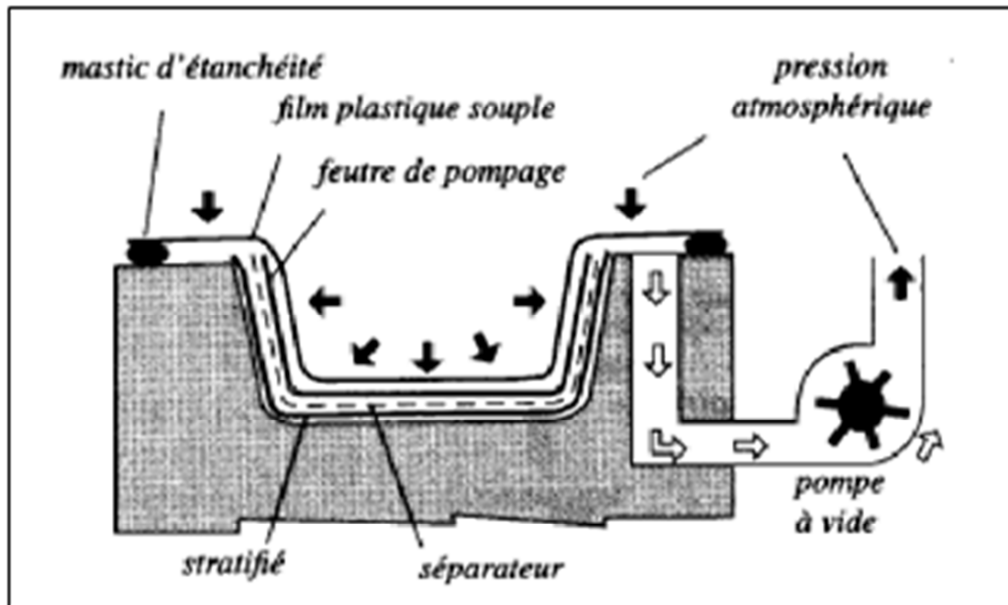


Figure I.11 : Moulage sous vide. [16]

Le moulage au contact et la projection simultanée sont des procédés manuels adaptés à la production en petites séries de pièces, aussi bien en composites de grande diffusion qu'en composites à hautes performances. Il en va de même pour les procédés de fabrication, comme l'enroulement filamentaire et la centrifugation. Ces procédés permettent de réaliser des corps creux de révolution de grandes dimensions, telles les cuves destinées à l'industrie chimique ou les tuyauteries de centrales électriques. Les produits de grande longueur (poutres, profilés et plaques) sont fabriqués par des procédés d'imprégnation en continu.

### *1.8. Avantages et inconvénients :*

#### *1.8.1. Avantage :*

- Gain de masse;
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage, soudure sur structures métalliques) ;
- Grande résistance à la fatigue;

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone) ;
- Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

### *1.8. 2. Inconvénients:*

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température ;
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes ;
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques ;
- Meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices ;
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

### *1.9. Applications des matériaux composites :*

Parmi les multiples applications des matériaux composites dans l'ingénierie civile, nous pouvons citer :

- Construction d'édifices et d'ouvrage d'art léger avec réalisation de formes complexes de grande portée ;
- Renforcement structurel d'édifices existants, afin de respecter de nouvelle norme ou en prévision d'utilisation nouvelle d'un bâtiment (ajout d'étage, changement du type d'exploitation). Utilisation principalement dans ce cas de la fibre de carbone pour le renforcement de poutres, poteaux et dalles sous flexion et cisaillement ;
- Utilisation de produits dérivés du béton avec ajouts de fibre, béton armé avec renfort en fibre de verre ou de carbone ;
- Transmission et distribution d'électricité temporaire et durable, pylônes électriques modulables et déplaçables ;
- Structures destinées aux réservations d'eau; Panneaux pour murs et planchers.

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite: le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué. Dans le cas du système avec une cure in-situ, on procède de deux manières différentes. Soit le tissu sec est appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture. Soit le tissu est pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé

avant polymérisation sur la surface de béton à renforcer. Dans le cas du système préfabriqué, le processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif. [13]

### *1.9. Conclusion*

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction aux matériaux composites, donnant une description de leurs constitutions, leurs propriétés ainsi que leurs structures, détaillant le mode de fabrication ou d'extraction des fibres.

L'introduction dans le domaine de génie civil de ces matériaux composites, présente de nombreux avantages fonctionnels tel que :

- Une légèreté du tissu.
- Une mise en œuvre aisée.
- Une liberté de formes.

Le choix des constituants de base ainsi que les techniques et le procédé de mise en œuvre ont une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau composite.



---

# Chapitre II

*Renforcement des éléments de structures  
dans le génie civil*

---



### *II.1 Introduction :*

Le renforcement et la réhabilitation des structures dans le génie civil est un défi de plus en plus important à relever. C'est un moyen très prisé par les chercheurs permettant d'assurer une longue durée de vie des ouvrages de toute nature.

La durabilité d'un ouvrage dépend en général de nombreux paramètres tels que: la qualité de conception, l'environnement d'implantation, les matériaux utilisés ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Généralement les ouvrages résistent au temps mais pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités, ils peuvent nécessiter des opérations de renforcement ou de réparation.

### *II.2 Définitions:*

#### *II.2.1 Réhabilitation:*

Elle concerne l'amélioration de l'habitat existant. Elle peut être légère (installation de l'équipement sanitaire, électricité, chauffage), moyenne, ou lourde. C'est la mise en conformité d'un patrimoine architectural et urbain déconsidéré (habitations et immeubles vétustes, îlots, quartiers...) aux normes de confort de tout type, d'hygiène et de sécurité en vue de leur réutilisation. La réadaptation à de nouveaux usages doit se faire en conservant les principales caractéristiques patrimoniales des édifices. Bien qu'elle présente certaines difficultés, elle est jugée plus économique que la restauration ou la rénovation. Les changements d'aspect extérieur et les changements de destination (d'usage) nécessitent des autorisations d'urbanisme [18]

#### *II.2.2 Réparation:*

La réparation des structures en béton concerne principalement le traitement de pathologies affectant le béton armé telles que la carbonatation, la corrosion et la fissuration. Elle se caractérise par la mise en œuvre de mortiers spécialement formulés pour ce type de travaux mais également par l'injection de résine présentant des caractéristiques techniques spécifiques.

#### *II.2.3 Renforcement:*

Le renforcement des structures en béton correspond à une modification d'ordre structurel qui peut être soit un changement de destination de l'ouvrage (augmentation des charges d'exploitation) soit un affaiblissement de la structure (création de trémie ou incendie).

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations. Un renforcement peut être associé à une réparation. [19]

L'introduction des matériaux composites s'inscrit fortement dans cette démarche. En effet, les techniques de renforcement et le choix des matériaux sont des atouts très importants pour une bonne conception. La motivation majeure de l'utilisation des matériaux composites dans la construction est la légèreté, la rapidité de mise en œuvre, leur résistance et surtout leur longue durée de vie. La nécessité de cette nouvelle technologie très efficace se fait de plus en plus ressentir.

### *Avantages du renforcement:*

Le renforcement présente des avantages très intéressants tels que [20]:

- une résistance, une ductilité très élevées ;
- une flexibilité permettant de confiner des éléments de formes géométries complexes ;
- un poids de l'élément renforcé peu modifié (composites légers) ;
- une bonne résistance aux variations de température, aux cycles de gel- dégel.

### *II.3.Causes de la réhabilitation d'une structure:*

Les principales causes qui nécessitent la réhabilitation d'une structure sont diverses.

On citera:

- *Accroissement des charges qui sollicitent la structure* : Le changement d'usage de la structure (bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial), augmentation du niveau d'activité dans la structure (anciens ponts soumis au trafic actuel) et installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels ;
- *Défauts dans le projet ou dans l'exécution* : Armature insuffisante ou mal placée, mauvais matériaux ou dimensions insuffisantes des éléments structuraux ;
- *Rénovation des structures anciennes* : La prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment de la construction (vibration, actions sismiques et autres), des limitations par des structures calculées durant une époque et vieillissement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales ;

- *Changement de la forme de la structure:* Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul, ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs ;
- *Dégâts dans la structure:* Corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impact contre la structure et incendies ;
- *Nécessité d'améliorer les conditions en service:* Le renforcement permet de diminuer les déformations, l'intensité des contraintes sur les armatures ainsi que les ouvertures des fissures [21]. Par ailleurs, un renforcement sismique est nécessaire, lorsque des désordres survenus suite à un séisme sont observés (ponts par l'échappement du tablier de ses appuis, la rupture fragile des piles et l'endommagement des culées, des murs de soutènement ou encore des fondations, ...). Dans le cas des bâtiments par la désolidarisation des façades, la fissuration des poutres, poteaux et dalles ainsi que la rupture des têtes de poteaux pouvant entraîner la ruine totale. [22]

### *II.4. Techniques de renforcement et de réparation des structures :*

Aujourd'hui nombreuses techniques sont préconisées et bien maîtrisées. Elles ont fait preuve de par leur efficacité d'une bonne réponse à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés le comportement des structures.

Après un diagnostic des désordres, il est indiqué de bien choisir la technique adaptée à la situation et donc à la pathologie à traiter. L'apparition de désordres sur une structure en béton armé ou l'augmentation des contraintes d'exploitation justifie un renforcement.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

#### *II.4.1 Réparation des fissures:*

Les fissures fonctionnelles ne nécessitent aucun traitement dans la mesure où les sollicitations restent dans les limites prise en compte dans les calculs et que le fonctionnement des ouvrages est cohérent [31], [32]. Dans le cas contraire, il faut d'abord consolider ou modifier les éléments concernés de façon à obtenir un fonctionnement correct. Les fissures accidentelles doivent en général être traitées, surtout si leur ouverture dépasse les limites. Les

## Chapitre II : Renforcement des éléments de structures dans le génie civil

choix du procédé de traitement dépend principalement de l'objectif visé (éviter la corrosion des armatures, empêcher l'eau de traverser une paroi, corriger un défaut d'aspect extérieur,...).

Les principales solutions envisageables sont: [23]

- *Pontage ou revêtement protecteur en surface* : Il s'agit de supprimer le défaut de protection des armatures par un revêtement, partiel ou global, imperméable ou étanche. Ces types de revêtement sont principalement des produits à base de résines plastiques appliquées en couches minces ;
- *Rebouchage des fissures* : Cette solution est retenue pour des fissures très ouvertes. Pour assurer la pénétration des produits de calfeutrement, il est nécessaire de les élargir, les dépoussiérer. Une pâte de ciment additionnée de résines ou avec des mastics adéquats est ensuite appliquée ;
- *Injection des fissures* : Le nettoyage préalable des fissures au moyen d'un jet d'eau sous pression éventuellement additionné d'un détergent est conseillé. Un coulis de ciment ou résines synthétiques est ensuite appliqué.

### II.4.2 Adjonction d'armatures complémentaires :

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par recouvrement ou par soudure. Enfin l'enrobage des nouvelles armatures doit être assuré par un mortier assurant une adhérence suffisante avec les armatures et avec le béton existant.

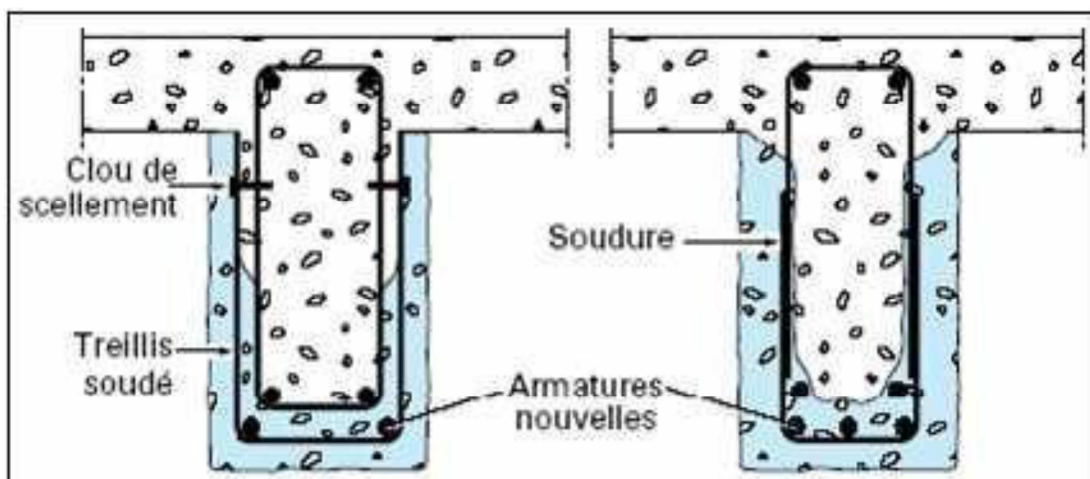


Figure II.1 : Adjonction d'armatures supplémentaires [24]

### II.4.3. Chemisage en béton armé:

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage.

### II.4.4. Chemises en acier:

Le renforcement des poteaux avec des chemises en acier permet d'améliorer la résistance sismique. Toutefois, cette technique est coûteuse et exigeante en main d'œuvre. Compte tenu de la grande efficacité de cette technique et de son coût, les chemises en acier pourraient être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux. Cependant, dans le cas des bâtiments où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse. [21]

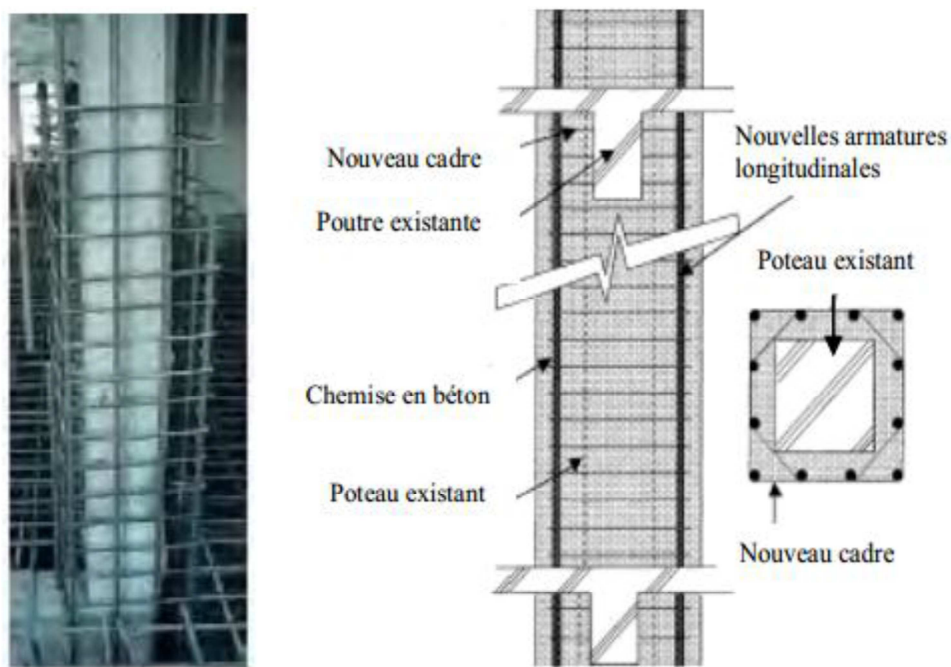


Figure II.2 : Chemisage en béton armé.

### II.4.5. Tôles d'acier collées:

L'utilisation de plaques d'acier collées afin de renforcer des insuffisances locales ou globales s'est développée ces dernières années. Cette technique économique modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer. Ces plaques sont généralement facilement contrôlables pour faire le suivi des dégradations. Le collage de la plaque à la surface du béton

assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de la structure renforcée.

Ces méthodes présentent beaucoup d'inconvénients tels que: la difficulté de mise en œuvre, la durée, la corrosion des aciers, etc. Diverses conditions doivent être réunies pour obtenir les meilleurs résultats en effectuant un renforcement par plaques d'acier. Cette technique efficace a montré ses limites :

- L'acier est l'objet de la corrosion, sa maintenance et protection devient coûteuse ;
- Le collage demande un traitement de surface spéciale et une pression constante jusqu'à la fin du collage de l'acier ;
- Les plaques d'acier sont lourdes et trop raides ;
- Non approprié sur des surfaces concaves.

### *II.4.6. Précontrainte additionnelle:*

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation. Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression aux zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint.



**Figure II.3 :** Précontrainte additionnelle.

### II.4.7. Béton projeté:

Cette technique est utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés. Elle consiste à projeter du béton contre la face à bétonner à l'aide d'un jet d'air sous pression. La difficulté de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes de sécurité). Il existe deux techniques principales de projection: par voie sèche et par voie humide.

Dans le procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en central.



**Figure II.4 :** Technique de béton projeté.

- *Projection par voie sèche:*

Ce procédé est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance.

L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la lance. Le malaxage de l'eau et des matériaux secs se produit dans la lance et au contact de la surface. Le procédé par voie sèche a l'avantage de pouvoir être arrêté et reparti à tout moment durant les travaux.

- *Projection par voie humide:*

Le procédé par voie humide implique qu'un béton soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air

comprimé ajouté à la lance. La figure ci-dessous présente l'appareillage nécessaire à l'application de béton projeté par voie humide.

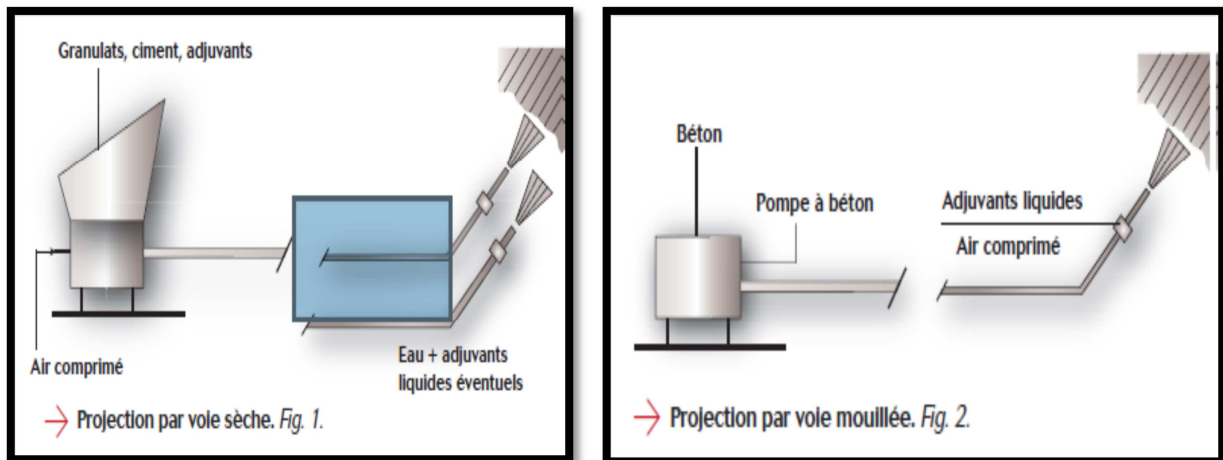


Figure II.5 : Procédé de béton projeté.

### II.5. Renforcement des structures à l'aide des matériaux composites :

Les matériaux composites disposent de grandes importances par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, libertés de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Il offre une meilleur isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. [24]

Parmi les multiples applications des matériaux composites dans l'ingénierie civile, nous pouvons citer :

- Construction d'édifices et d'ouvrage d'art léger avec réalisation de formes complexes de grande portée ;
- Renforcement structurel d'édifices existants, afin de respecter de nouvelle norme ou en prévision d'utilisation nouvelle d'un bâtiment (ajout d'étage, changement du type d'exploitation). Utilisation principalement dans ce cas de la fibre de carbone pour le renforcement de poutres, poteaux et dalles sous flexion et cisaillement ;
- Utilisation de produits dérivés du béton avec ajouts de fibre, béton armé avec renfort en fibre de verre ou de carbone ;

- Transmission et distribution d'électricité temporaire et durable, pylônes électriques modulables et déplaçables ;
- Structures destinées aux réservations d'eau; Panneaux pour murs et planchers.

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite: le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué. Dans le cas du système avec une cure in-situ, on procède de deux manières différentes. Soit le tissu sec est appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture. Soit le tissu est pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton à renforcer. Dans le cas du système préfabriqué, le processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif. [18]

Les techniques de renforcement des éléments structuraux par les matériaux composites sont très nombreuses. A titre indicatif, nous citerons les techniques utilisées pour les poutres, les poteaux et les dalles.

### *II.5.1. Renforcement des poteaux :*

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite.



**Figure II.6:** Poteau en BA confiné par des matériaux composites.

### II.5.2. Renforcement des poutres :

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres [26], [27].



Figure II.7 : Poutres renforcés par des matériaux composites [27].

### II.5.3. Renforcement des dalles :

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé.

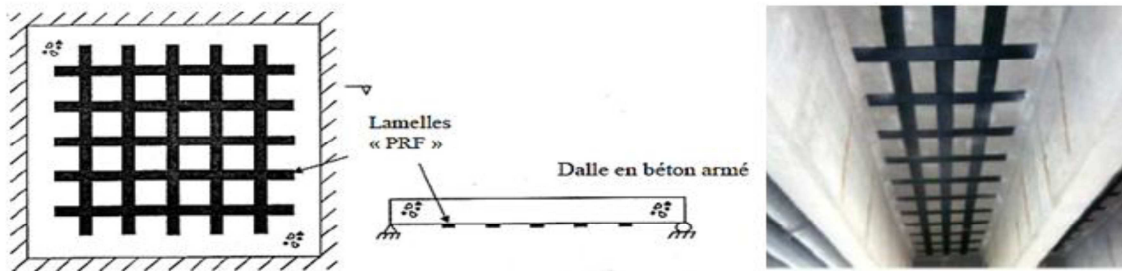


Figure II.8 : Renforcement des dalles.

### II.5.4. Renforcement des murs :

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse (Steiner, 1996). Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcée conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient prendre une charge beaucoup plus grande. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. Des plaques de fibres de carbone en forme de X ont été collées. Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.

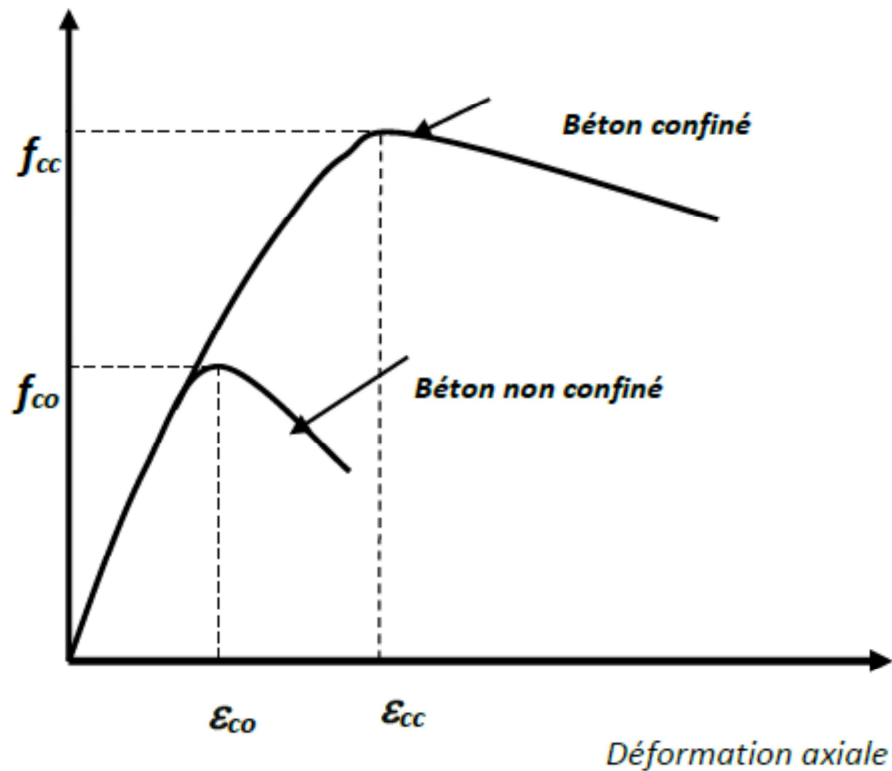


Figure II.9 : Renforcement des dalles

### II.6. Comportement du béton renforcé :

Le renforcement ou le confinement du béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide et autres. Les composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Sous l'action d'une charge de compression axiale, le béton présente une déformation latérale, cette déformation engendre une fissuration qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement (par collage de composites) de façon à réduire, voire empêcher cette déformation, sa résistance à la compression ainsi que sa ductilité

augmentent. La Figure ci-dessous présente les courbes contraintes déformations pour des bétons renforcés et non renforcés. Le renforcement augmente en général deux caractéristiques du béton : la résistance en compression et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression. [28]



**Figure II.10 :** Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné. [28]

La Figure (II.13) montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton. Richart, Brantzaeg et Brown [12], ont signalé que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.

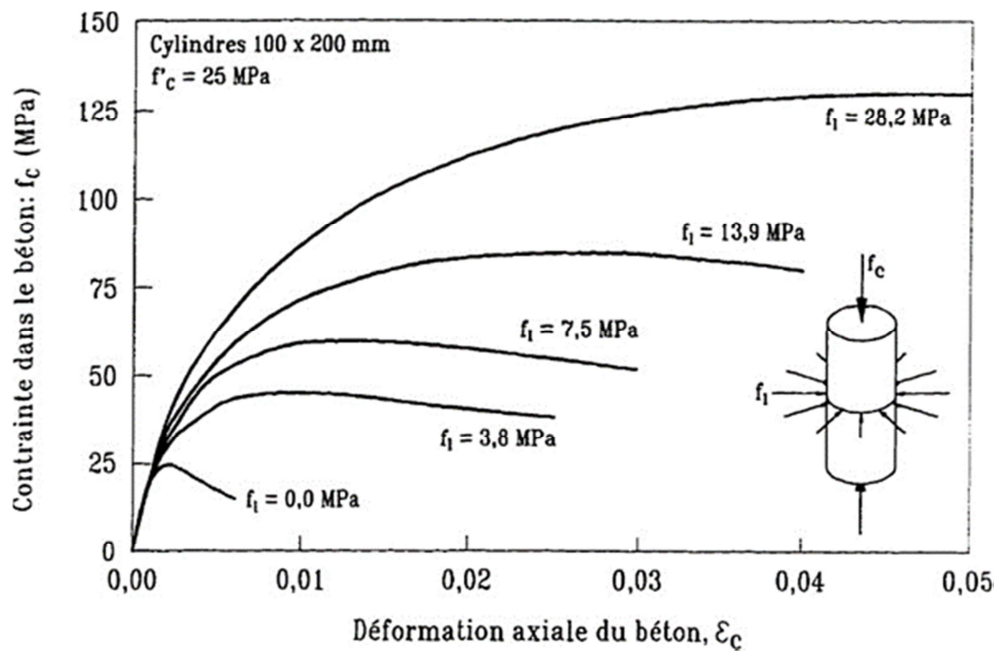


Figure II.11 : Effet de la pression de confinement sur le comportement du béton [30]

### II.7. Revue des travaux sur le renforcement externe des poutres:

Cette partie présente une revue de littérature des résultats de quelques travaux expérimentaux antérieurs reliés à la réhabilitation et au renforcement des poutres en béton ou en béton armé, à l'aide d'enveloppes en composite «PRF» et autres collées en surface.

#### ➤ Berset (1992)

C'est l'une des premières études sur le renforcement en cisaillement à l'aide de PRF sur des poutres. Le but des essais de Berset et al était d'analyser le comportement de poutres renforcées en cisaillement à l'aide de composite en PRF. Les tests ont été réalisés sur des poutres de dimensions de 102 mm × 114 mm × 600 mm. Deux paramètres ont été considérés : l'épaisseur du renfort de PRF et la participation des étriers. Le renfort de PRF a été collé en surface sur les côtés des spécimens à un angle de 45°. Les gains en résistance en cisaillement obtenus se sont établis entre 33% et 66% en fonction de l'épaisseur du renfort [33].

#### ➤ Chajes et al. (1995)

Chajes et al. (1995) [17] ont testé plusieurs séries de poutres ayant un rapport  $a/d$  de 2.7, de dimensions 63 mm x 190 mm avec une portée de 1220 mm. Les spécimens ne comportaient aucune armature transversale. Trois types de renforts ont été analysés (fibre de verre, d'aramide et de carbone) enveloppés en forme de U sur toute la longueur des éprouvettes. Les gains de résistance en cisaillement obtenus ont atteint 60% à 150%.

### ➤ **Kamiharako et al. (1997)**

Kamiharako et al. (1997) ont testé deux séries poutres rectangulaires. La série 1 comportait des spécimens de dimensions 250 mm × 400 mm × 3000 mm et la série 2 comportait des spécimens de dimensions 400 mm × 600 mm × 3000 mm. L'objectif visé était d'évaluer l'influence de la rigidité du PRF des spécimens entièrement enveloppés de fibre aramide ou de fibre de carbone, d'évaluer l'influence de la résine en comparant des spécimens renforcés avec ou sans résine et d'évaluer l'influence de la taille du spécimen. Suite aux essais, les gains de résistance obtenus par le renfort de PRF variaient entre 31% et 93%, selon la rigidité du PRF et de la taille du spécimen [35]. Les auteurs ont montré que les paramètres étudiés influençaient considérablement le comportement en termes de résistance. La présence de la résine est essentielle au gain de résistance offert par le PRF.

### ➤ **Khalifa et Nanni (1999)**

Khalifa et Nanni (1999) [19] ont testé des poutres rectangulaires pré-fissurées ayant des dimensions de 150 mm x 305 mm x 3050 mm. Les paramètres d'études sont l'influence des barres transversales, le rapport de dimensions ainsi que le type du renfort (bandes de tissu de différentes largeurs collées en U, tissu muni de fibres unidirectionnelles collé en U sur toute la longueur, et tissu de fibres bidirectionnelles collé en continu sur le côté du spécimen).

Les résultats obtenus montrent que les fibres à 0 degré permettaient d'augmenter la résistance en cisaillement. Sur les spécimens munis d'étriers, l'utilisation de PRF soulageait les contraintes sur les barres transversales par interaction entre le renfort en PRF et les barres transversales. Une augmentation de la résistance est notée entre 40% et 138%.

### ➤ **Täljsten (2003)**

Täljsten (2003) a réalisé des essais aussi sur des poutres de dimensions 180 mm × 500 mm × 4500 mm. L'influence de l'orientation des fibres (45°, 0°, 90°) et l'épaisseur du renfort de PRFC sont étudiés. Le tissu collé est en forme de U. Les essais réalisés à l'aide d'un chargement en quatre points ont démontré un gain de résistance dû au PRFC variant entre 100% et 170%. La résistance du PRF l'orientation de la fibre [37].

### ➤ **Bousselham (2005)**

Bousselham (2005) a réalisé deux séries de poutres, la première constituée de 22 poutres en T de 152 mm × 406 mm × 4520 mm et une deuxième série de 12 poutres en T de

95 mm × 220 mm × 3000 mm. Toutes les poutres ont été renforcées à l'aide de tissu de fibres de carbone bidirectionnelles collé en U sur toute la longueur de l'âme des poutres. L'objectif visé était d'évaluer leur comportement au cisaillement en tenant compte des paramètres tels que : le taux de PRFC, le taux d'acier transversal, le type de poutre (élancée ou profonde) et la taille des spécimens. Ces essais ont montré que l'augmentation du taux de PRF n'était pas proportionnelle à sa contribution en termes de gain en résistance et que cette contribution était influencée par le taux d'acier transversal. Il a été observé que plus le taux d'acier augmente, moins la contribution du PRF est importante. De plus, les poutres de type élancé offraient de meilleurs résultats [38]. .



Figure II.12 : Essai sur des poutres renforcées. [38].

### ➤ Ben chabane et al. (2013)

Ben chabane et al. (2013) ont réalisé des prismes renforcés sur la partie inférieure d'un composite à base de poudre de liège, de fonte et de plomb. Ces charges de renforcement ont été introduites avec plusieurs pourcentages. Les résultats d'écrasement en flexion trois points, ont montré que la présence du composite, sur la face tendue procurait au matériau, une amélioration de la résistance et de la déformabilité [39].



**Figure II.13 :** Écrasement d'un prisme en béton renforcé par des matériaux composites [39].

### ➤ **El-Saikaly et al (2014)**

El-Saikaly et *al.* (2014) ont réalisé 12 essais sur des spécimens ayant des dimensions de 152 mm x 406 mm x 4520 mm. Le programme expérimental comportait des séries avec: des poutres sans étrier, des poutres avec étriers espacés de 260 mm et des poutres avec étriers espacés de 175 mm. Chaque série comportait un spécimen témoin, un renforcé à l'aide de tissu en U collé sur toute la longueur, un renforcé de bande en L et un dernier renforcé de bande en L avec ancrages par cordage introduit à travers la semelle de la poutre en T. Le but de ces essais était d'évaluer l'efficacité d'un nouveau système d'ancrages composé de cordes de CFRP introduites à travers la semelle, visant à reproduire les effets du tissu collé enveloppant entièrement le spécimen. Les résultats ont montré un gain de résistance de l'ordre de 96% pour le spécimen sans armature transversale. La contribution du PRF doublait en présence d'ancrages [40].



**Figure II.13 :** Poutres renforcées selon El-Saikaly et *al.* (2014) [40].

### ***II.8. Conclusion :***

Dans ce chapitre on a présenté les différentes techniques utilisées pour le renforcement ou la réparation des structures en béton armé. La technique la plus répandue est l'utilisation des matériaux composites car elles présentent d'excellentes performances et se sont révélés être nettement plus efficaces, fiables et compétitives. Jusqu'à ce jour, les expériences conduites par des chercheurs ont démontré l'intérêt de ces matériaux (Augmentation de la ductilité et de la résistance, application aux colonnes de différentes géométries, légèreté, durabilité, etc...).



---

# Chapitre III

*Simulation et paramètres d'étude*

---



### *III.1. Introduction :*

La simulation numérique est devenue quasi nécessaire dans le domaine de la recherche, elle couvre des places importantes dans les différents secteurs publics (constructeur automobile, aéronautique, spatial, génie civil ...). Elle a un impact direct sur la qualité et le temps, elle est apparue dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés.

La difficulté de la simulation numérique c'est de créer un modèle se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, condition aux limites), l'étude ne sera validée qu'à partir d'essais mécaniques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation. On dispose actuellement d'une large gamme de logiciels qui constituent des alliés précieux pour le calcul et la conception optimale des structures dans le respect des réglementations techniques et normes de la construction, parmi ces logiciels basés sur la méthode des éléments finis le code de calcul ABAQUS [41].

Dans ce chapitre on présentera les différentes étapes menées pour la modélisation de la structure composite chargée en flexion jusqu'à la rupture. Le modèle géométrique et le choix des modèles éléments finis pour le maillage sont générés dans un espace tridimensionnel (3D) à l'aide du code de calcul Abaqus [42]. Les différents matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques après identification de leurs paramètres mécaniques à partir des essais au laboratoire. A cet effet, un modèle élastique est adopté pour les matériaux renforcés, le matériau béton est modélisé suivant un modèle élasto-plastique. L'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes de construction sont également présentées.

### *III.2. Présentation du logiciel :*

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Il a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS). Depuis 30 ans, ABAQUS a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer les nouveautés et répondre ainsi aux besoins en octobre 2005, l'entreprise a été rachetée par Dassault industries pour critiquer le package « SIMULIA ».

Le module ABAQUS/CAE est une interface dans laquelle l'utilisateur peut définir toutes les propriétés de son analyse (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution). Pour la résolution des analyses, il existe deux modules à savoir : ABAQUS/Standard et ABAQUS/

## Chapitre III : Simulation et paramètres d'étude

Explicit. Le premier est un module utilisant des schémas de résolution implicite dits classiques pour des analyses statiques comme la méthode Newton-Raphson ou la méthode de Risks. Le second utilise une méthode de résolution explicite pour l'intégration temporelle des problèmes dynamiques. Elle permet notamment une meilleure prise en compte des problèmes à force de non linéarité matérielle est donc particulièrement adaptée pour les matériaux à comportement adoucissants, comme le béton.

1. Fenêtre d'affichage graphique.

2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.

3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, etc.).

4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve

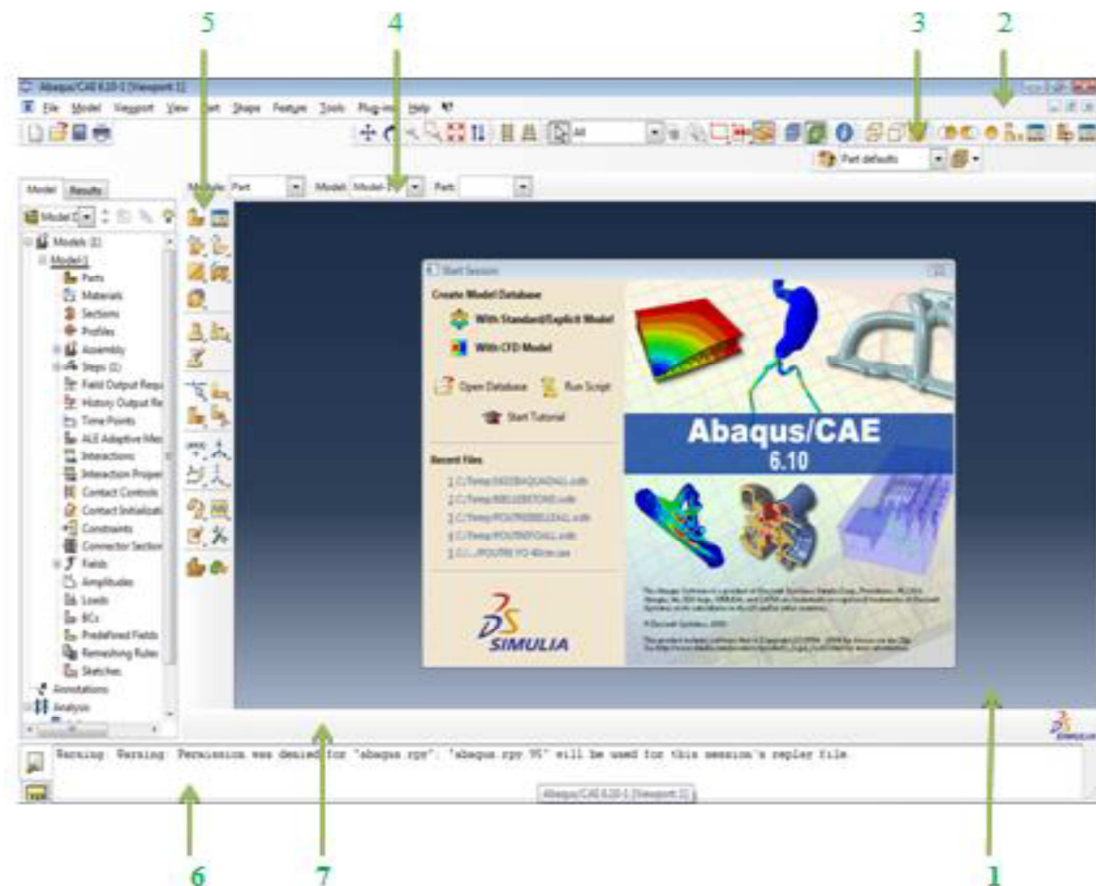


Figure III.1 : Présentation de l'interface ABAQUS.

## Chapitre III : Simulation et paramètres d'étude

6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation; ils permettent d'être mieux guidés dans les actions entreprises.

7. Enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

### III.3. Démarches et étapes de simulation :

La modélisation complète d'une structure ou d'un élément de structure s'effectue après un passage successif sur les neuf modules d'ABAQUS à savoir: **part, sketch, property, assembly, step, interaction, load, mesh, job et visualisation**). ABAQUS ne gère pas les unités c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent.

#### III.3.1. Dimension et géométrie :

Une poutre rectangulaire et une plaque ont été créées conformément aux dimensions des poutres utilisées pour les essais expérimentaux. La poutre a une section carrée de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  sur une longueur de 40 cm [43]. La plaque de composite a une épaisseur de 2mm. L'ensemble est partitionné pour repérer la position des appuis et de la concentration des charges.

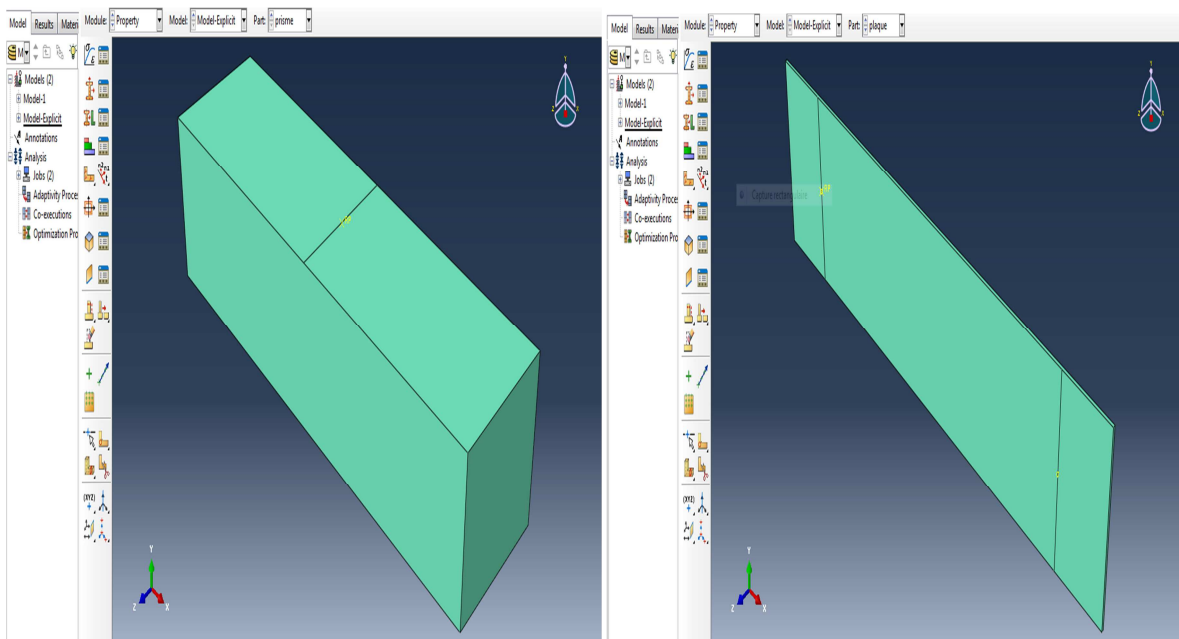


Figure III.2: Modélisation des géométries des éléments.


### III.3.2. Sections et assemblage :

Les caractéristiques géométriques de prisme sont modélisées. Toutes les dimensions ainsi que toutes les propriétés mécaniques, des différents matériaux constitutifs, sont soigneusement et séparément introduites pour chaque élément (béton, composite). Ceci afin de prendre en compte tous les paramètres d'étude et de valider le modèle élément finis proposé.

La géométrie des différents éléments que l'on souhaite simuler se définit toujours selon la démarche suivante:

- Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulue.
- Le développer en 3D.

Rajouter les détails manquants (chanfreins...).

-  Création des plaques du composites en liège 15%, en fonte 5% et en plomb 10% avec des épaisseurs respectives de 2 mm.

**Affecter les propriétés matériau à l'objet:** le module **PROPERTY** permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

- Créer le matériau
- Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux
- Affecter les matériaux aux sections correspondantes

**Assembler le modèle:** le module **ASSEMBLY** permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.

- créer les instances
- les positionner dans le repère général

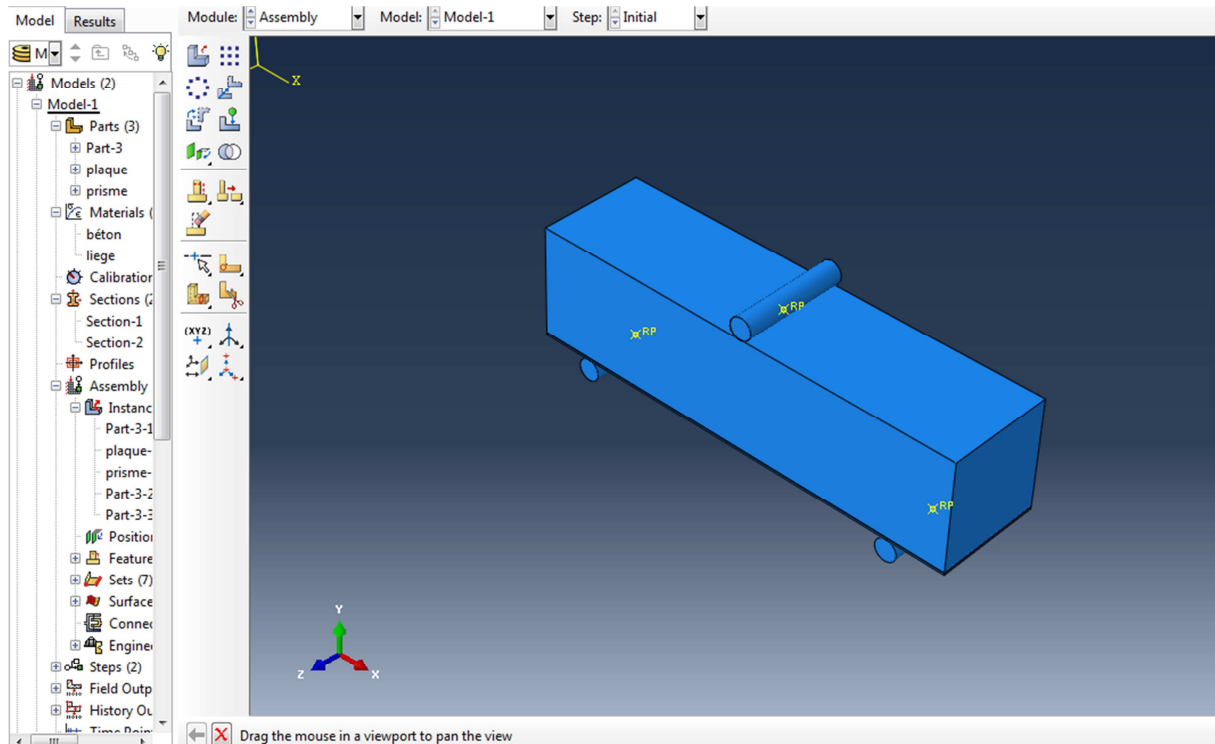


Figure III.3 : L'assemblage des éléments

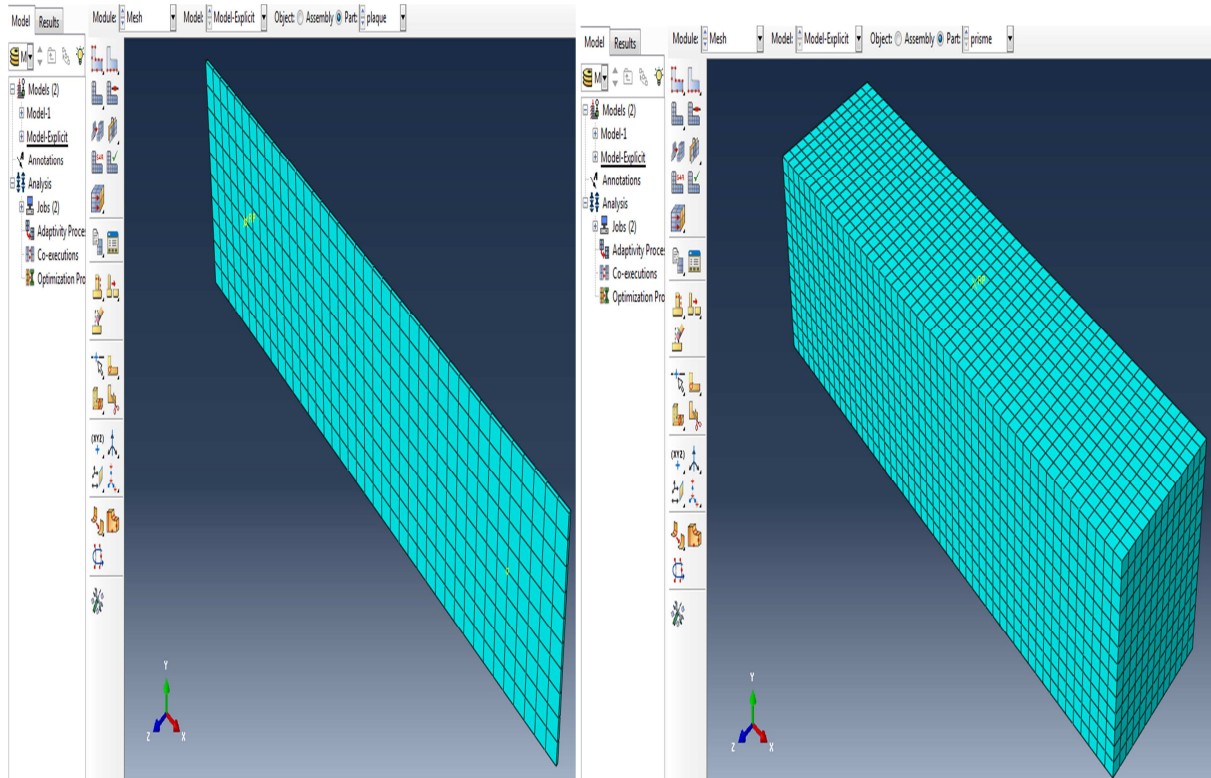
**Définir les étapes d'analyse:** Le module **STEP** permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement. On peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées.

**Appliquer les conditions aux limites et les chargements:** le module **LOAD** permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut que les chargements et les conditions aux limites soient dépendants des Steps, par exemple une force est appliquée au Step 1 mais inactive au Step 2.

- Définir les étapes d'application
- Définir les types de CL et/ou chargement

### III.3.3. Maillage et MEF :

L'étape principale, pour aboutir à des résultats numériques cohérents, consiste à adopter un maillage raffiné seulement dans les zones susceptibles de développer des phénomènes significatifs, le reste de la structure est alors maillée plus grossièrement. Les résultats numériques sont influencés par l'utilisation d'éléments de même taille. De plus, la densité de notre maillage doit être optimale, afin de réduire autant que possible, la taille du problème et le temps d'exécution.



**Figure III.4 :** Maillages adoptés lors des simulations numériques des éléments.

### III.3.4. Conditions aux limites :

Dans ce modèle, l'axe z du système des coordonnées coïncide avec l'axe longitudinal de la poutre. Les conditions sont:

- Au niveau des cylindres d'appui : les déplacements verticaux sont bloqués et le déplacement horizontal a aussi été bloqué pour l'un des appuis.
- Des charges linéaires ont été appliquées au niveau des cylindres de chargement pour avoir une flexion trois points.

Ce type de chargement et de conditions aux appuis est semblable à celui utilisé pour les essais expérimentaux.

## Chapitre III : Simulation et paramètres d'étude

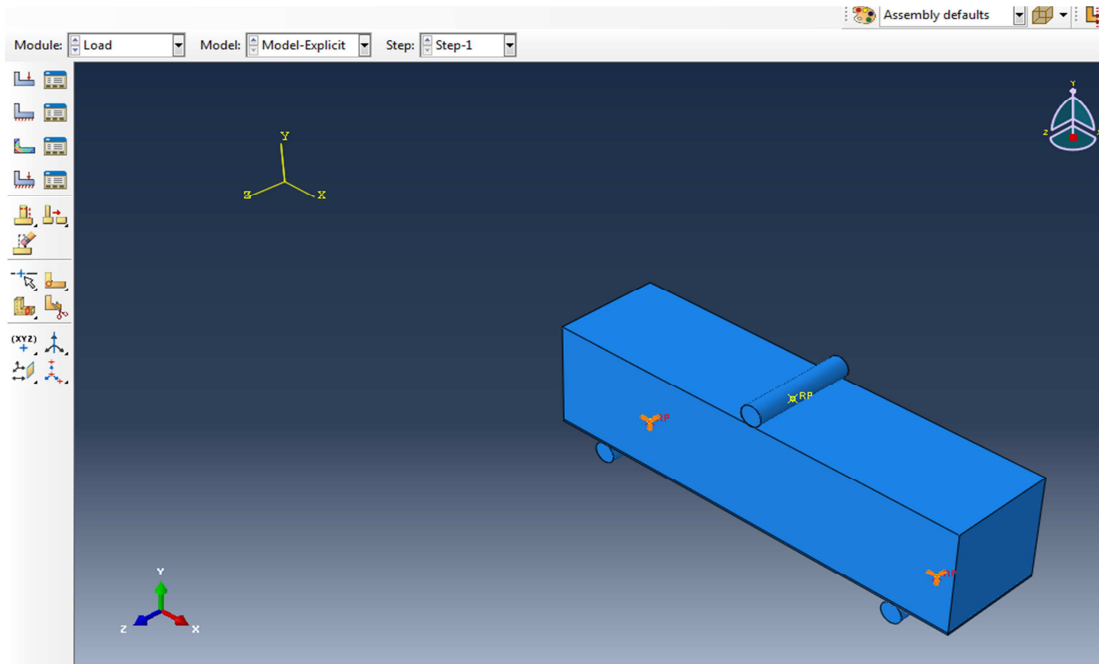


Figure III.5 : Assemblage et conditions aux limites.

### III.3.5. Gestion du contact Béton- composite :

L'objectif du choix du contact est d'identifier les situations et les types de contact pour que les lois physiques correctes puissent être appliquées afin de mieux se rapprocher de la réponse exacte des éléments étudiés. Un contact se fait généralement entre un corps rigide et la pièce déformable et s'effectue entre deux surfaces qui appartiennent en général à deux corps différents. La procédure de spécification des interactions est la suivante : Créer les surfaces, définir les types de contacts et finalement associer des surfaces avec des types de contact tout en considérant un contact parfait entre tous les éléments.

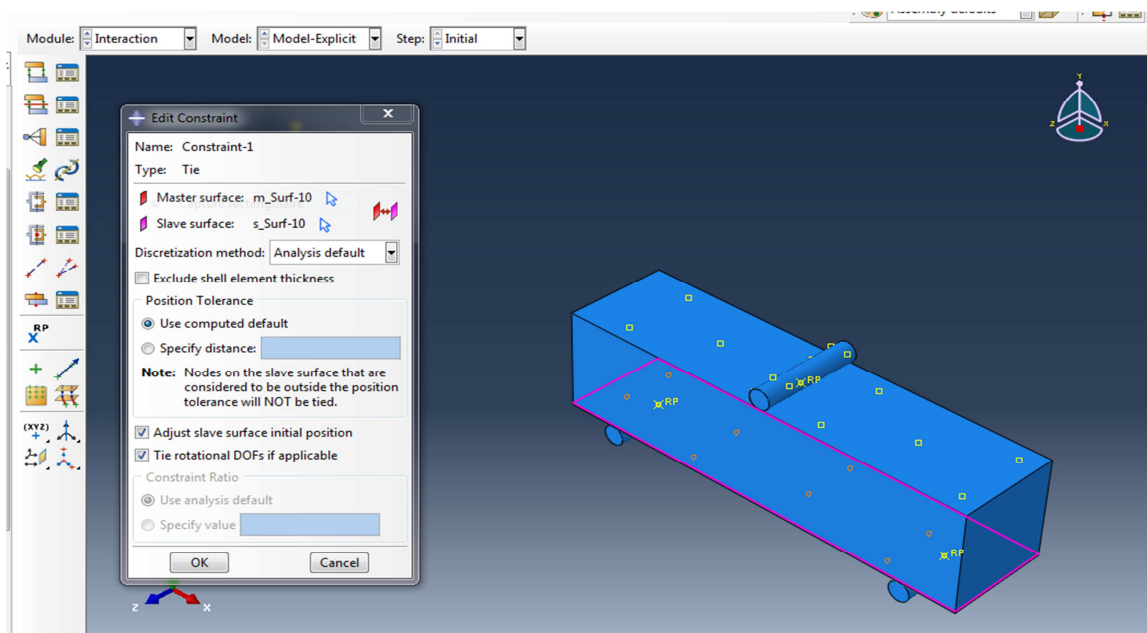


Figure III.6 : Modélisation du contact : Béton-Composite

### III.3.6. Gestion des résultats : STEP et JOB :

Le module **STEP** permet de définir toutes les requêtes pour le post traitement. On peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées. À cette étape, on définit tous les critères de calcul utilisés par ABAQUS dans le module Job. Il détermine ainsi l'incrémentement (valeur du pas de temps) et la valeur du temps final qui représente un temps « virtuel », temps sans unité.

Le temps réel ou physique est défini en fonction des unités. C'est également dans le module **STEP** qu'on précise les sorties désirées. Il y a deux types de sorties: des sorties de type *champ* (Field output requests) qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type historique (history output requests) qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

Le lancement du calcul est classique. Après avoir créé toutes les tâches de définition du modèle, on utilise le module **JOB** pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traiter les résultats demandés.

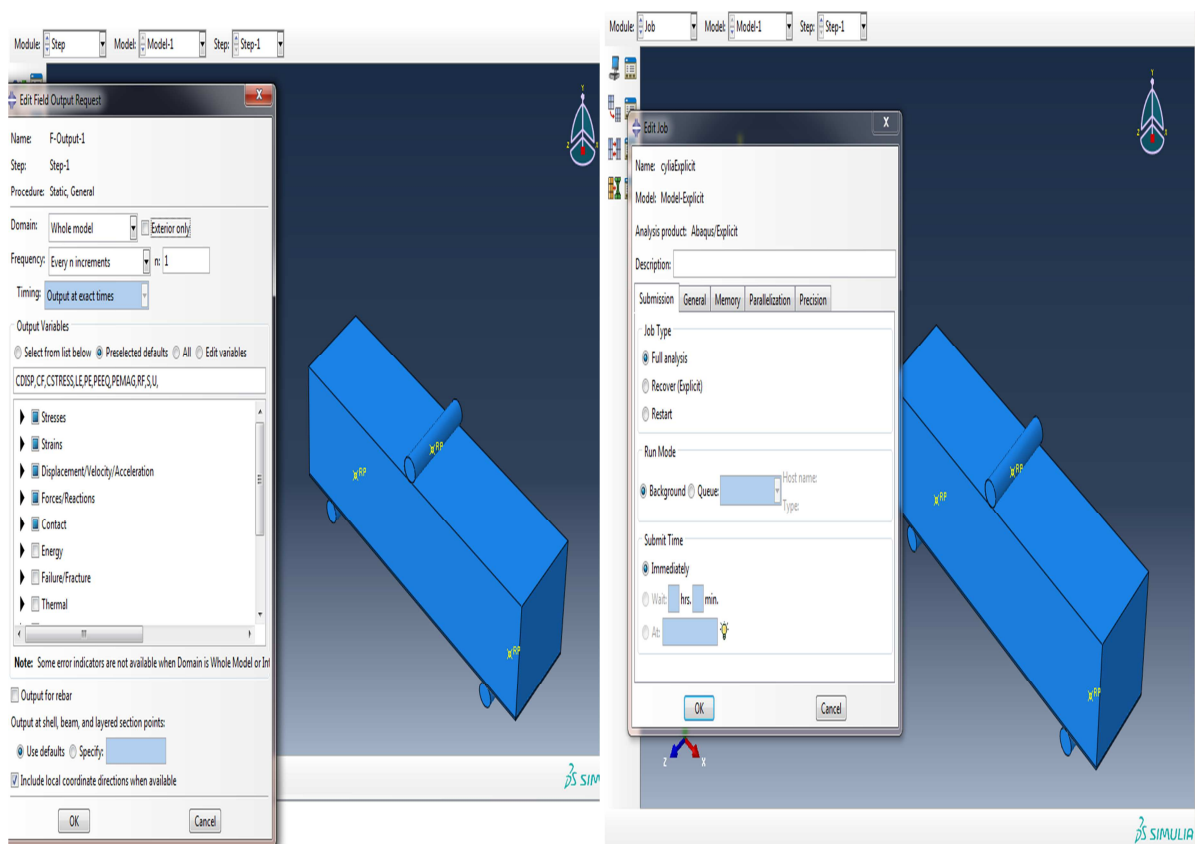


Figure III.7 : Le module STEP et JOB.

### *III.4. Conclusion :*

Dans ce chapitre nous avons présenté le code de calcul ABAQUS, en résumant les actions principales à effectuer pour créer nos modèles. Il nous a permis de simuler le comportement non linéaire de prisme en béton renforcé à la face inférieure avec une plaque composite sous chargement de flexion trois points. Trois variantes ont été utilisées pour la plaque composite (plaque en liège, plaque en fonte et une plaque en plomb). Les matériaux constitutifs sont modélisés à travers des modèles numériques intégrés dans le code ABAQUS à savoir :

- ✓ Les différentes configurations de renforcement permettant l'optimisation des paramètres géométriques et mécaniques des plaques en liège et en fonte et en plomb sont présentées.
- ✓ Un modèle élasto-plastique pour le béton permettant d'évaluer la réponse ultime et de représenter l'évolution des endommagements.



---

# Chapitre IV

*Présentation des résultats et discussion*

---



### IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre, une présentation et interprétation de tous les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques sont présentés sous forme de tableaux, histogrammes et figures. Nous rappelons que cette modélisation concerne l'évaluation du comportement mécanique d'un prisme en béton renforcé par des plaques en composites, constituées de différents types de matériaux. Ces spécimens sont sollicités en flexion 3-points suivant la norme NF T 54-606. A cet effet, tous les résultats obtenus, en termes d'évolution des contraintes, des déformations et de rigidité sont discutés et présentés sous forme de graphiques force déplacement et de cartographies, ceci nous a permis de mettre en valeur l'apport de la conception proposée.

### IV.2. Principe de l'essai de flexion 3 points :

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps comme le choc et la dureté [1]. Il consiste à placer une poutre sur deux appuis et appliquer un effort ponctuel au centre [2], comme illustré sur la figure ci-dessous :

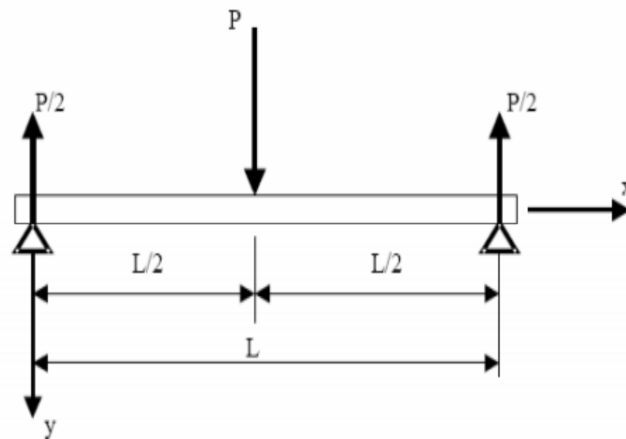


Figure IV.1 : Essai de flexion trois points

Le calcul des contraintes en flexion 3 points se fait par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

$\sigma$  : Contrainte (MPa)

F : Charge appliquée (N)

L : Longueur entre appui (mm)

b : Largeur de l'éprouvette (mm)

## Chapitre IV : Présentation des résultats et discussion

h : Épaisseur (mm)

### IV.3. Caractéristiques mécaniques et géométriques :

Dans le cadre de la présente étude numérique, le prisme en béton, de dimension 400 x 100 x 100 mm est renforcé par des plaques composites (Liège, Fonte et Plomb) pour être modélisé dans un espace tridimensionnel. L'essai de flexion trois points est réalisé en appliquant un chargement à mi-travée du prisme. Les résultats de la simulation de prisme chargés en flexion sont présentés dans les sections ci-dessous. Ces résultats nous permettront ainsi de déduire les paramètres influençant la résistance et la ductilité du système mécanique considéré.

Les dimensions des plaques de renfort considérées ainsi que les paramètres utilisés dans la simulation sont illustrés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau IV.1 :** Paramètre utilisées pour le comportement des plaques composites [1]

Béton + renfort	Module de Young E (MPa)	Limiteélastique Re (MPa)	Contrainte max (MPa)
Béton + Liège	2958.667	1.5	7.34
Béton + Fonte	3165.525	1.5	10.89
Béton + Plomb	1712.6	1.83	4.95

**Tableau IV.2 :** Dimension des plaques de renfort.

Épaisseur	Longueur	Largeur
2 mm	400 mm	100 mm

### IV.4. Comportement global de prisme renforcé par les plaques composites :

Pour mettre en évidence l'influence de la présence de la plaque composite, sur la face inférieure du prisme en béton, une confrontation des courbes forces-déplacements des différentes variantes sont considérées. L'évolution du chargement extérieur appliqué en fonction de la flèche maximale mesurée à mi-travée du prisme est illustrée sur les figures suivantes.

### IV.4.1. Confrontation des courbes forces-déplacements :

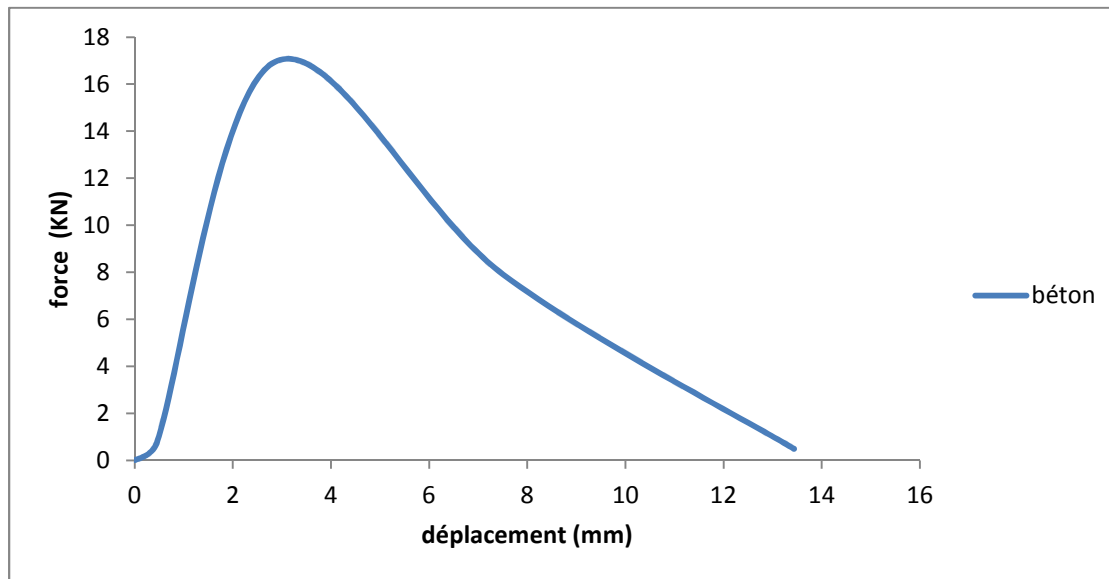


Figure IV.2: Courbe force-déplacement du béton témoin.

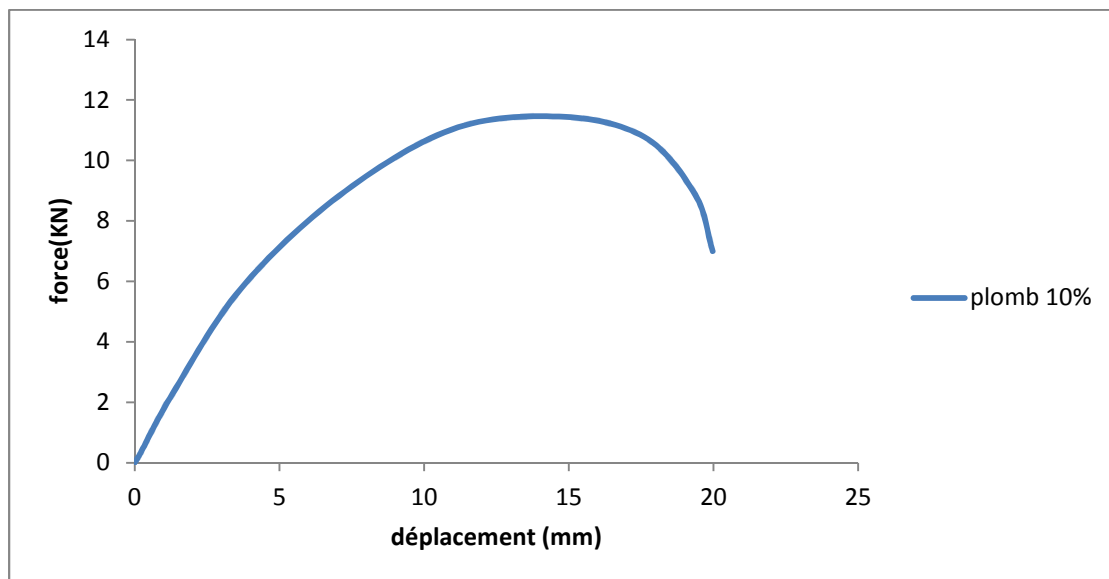
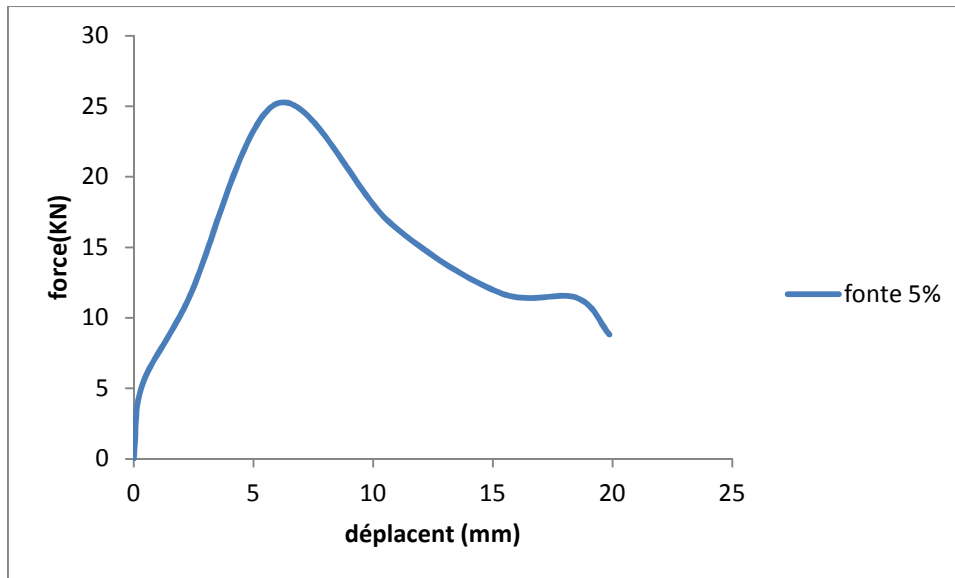
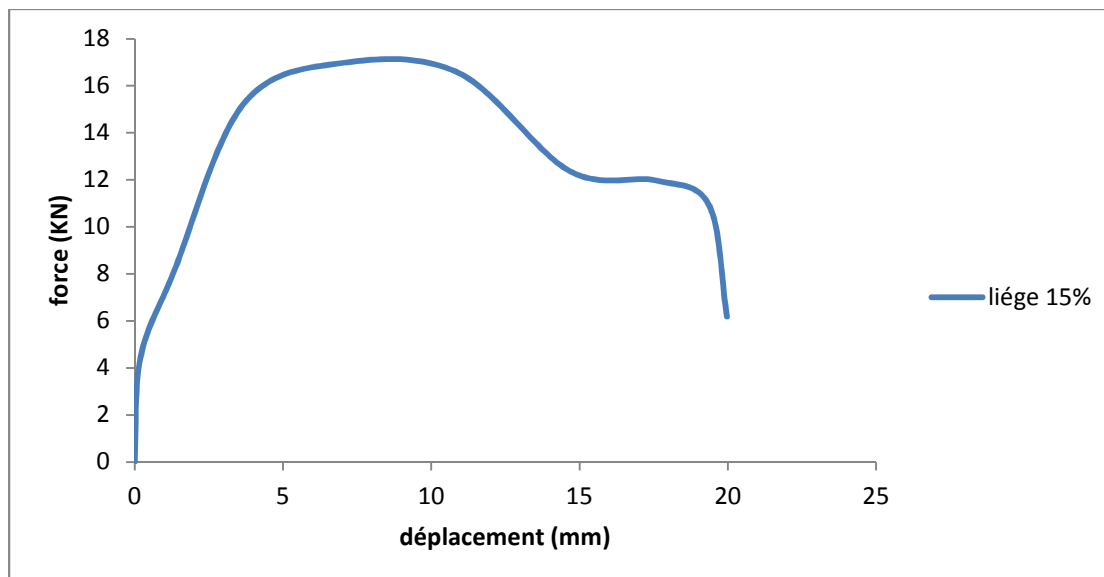


Figure IV.3 : Courbe force-déplacement du béton renforcé par plaque de renfort en Plomb 10%.

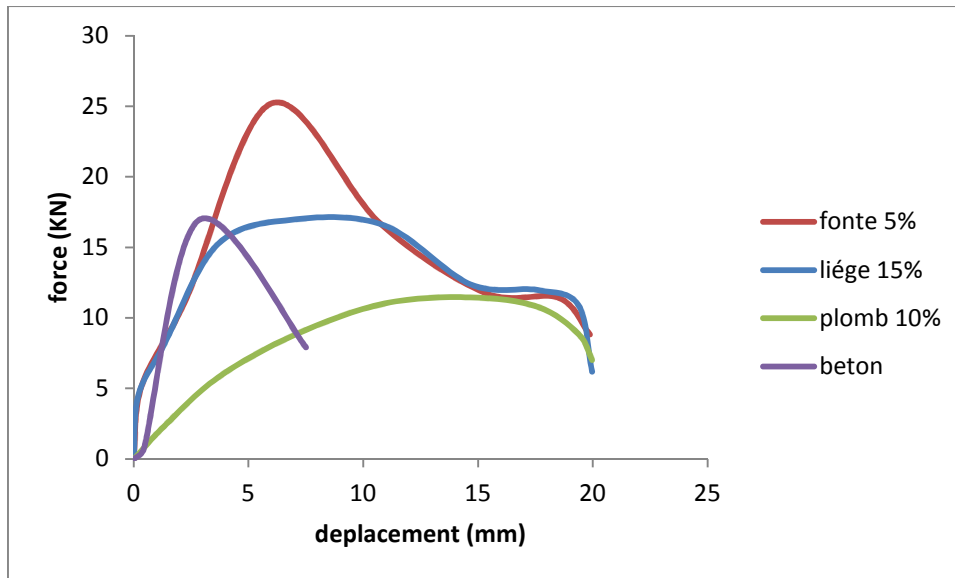


**Figure IV.4 :** Courbe force-déplacement du béton renforcé par plaque de renfort en Fonte 5%.



**Figure IV.5 :** Courbe force-déplacement du béton renforcé par plaque de renfort en Liège 15%.

Typiquement, toutes les courbes forces-déplacements présentent une pente initiale qui évolue jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une zone de déformation plastique plus importante selon l'efficacité et la nature de la charge. La force au pic est différente pour les différentes configurations car elle est influencée par le type de charge et son dosage.



**Figure IV.6 :** Superposition des courbes forces-déplacements.

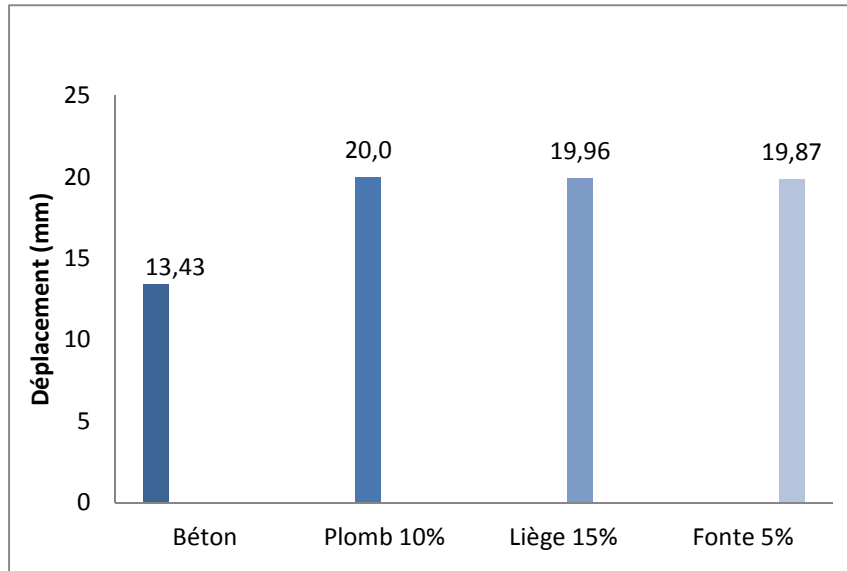
Dans la figure ci-dessus, nous avons représenté une superposition de toutes les courbes (forces-déplacements), pour pouvoir bien quantifier les valeurs des forces et déplacements et en déduire par la suite l'apport positif de ce type de renforcement (plaque chargée par des poudres récupérées de l'industrie de récupération:Fonte, Plomb).

Toutes les courbes montrent l'évolution du chargement extérieur appliqué en fonction du déplacement vertical à mi-travée jusqu'à la rupture. D'après les courbes, nous pouvons noter que le comportement global des prismes renforcés est composé de trois phases :

- La première partie est linéaire, le déplacement vertical augmente linéairement et proportionnellement au chargement appliquée.
- Dans la deuxième partie, le déplacement augmente très rapidement avec l'augmentation de la charge, les courbes s'incurvent et le comportement devient non linéaire. Ceci correspond à l'apparition puis le développement des fissures verticales dans les spécimens. L'atteinte du pic définit la force maximale qui caractérise la résistance ultime des prismes à la flexion.
- Dans la troisième phase du comportement, le déplacement augmente avec une vitesse élevée et au-delà du pic, les fissurations se propagent très rapidement et la résistance chute considérablement jusqu'à s'annuler pour un déplacement supérieur à celui correspondant à la résistance maximale.

### IV.4.2 Confrontation des histogrammes des déplacements :

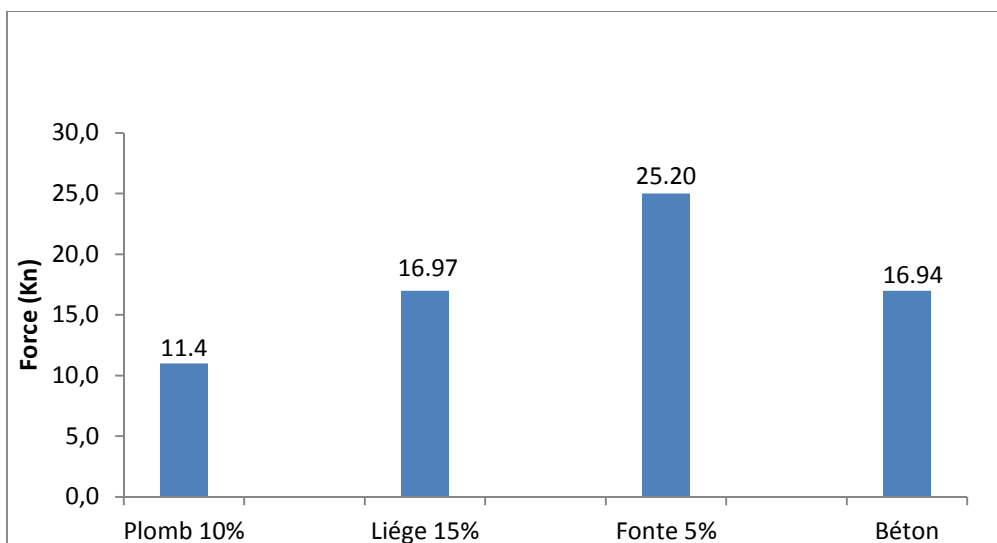
En ce qui concerne l'aspect quantitatif de la confrontation nous avons choisi de comparer l'évolution de la distribution des forces maximales, des déplacements et des dommages lors du chargement des prismes renforcés et non renforcé.



**Figure IV.7 :** Histogramme des déplacements des prismes renforcés et non renforcé.

Tous les prismes renforcés présentent des déplacements plus importants que le béton témoin. La présence de la plaque de renforcement induit un déplacement d'ensemble plus apprécié dans le cas du prisme renforcée avec les différentes variantes. On notera un déplacement de l'ordre de 32% plus important pour le béton renforcé.

### IV.4.3. Confrontation des histogrammes des forces :

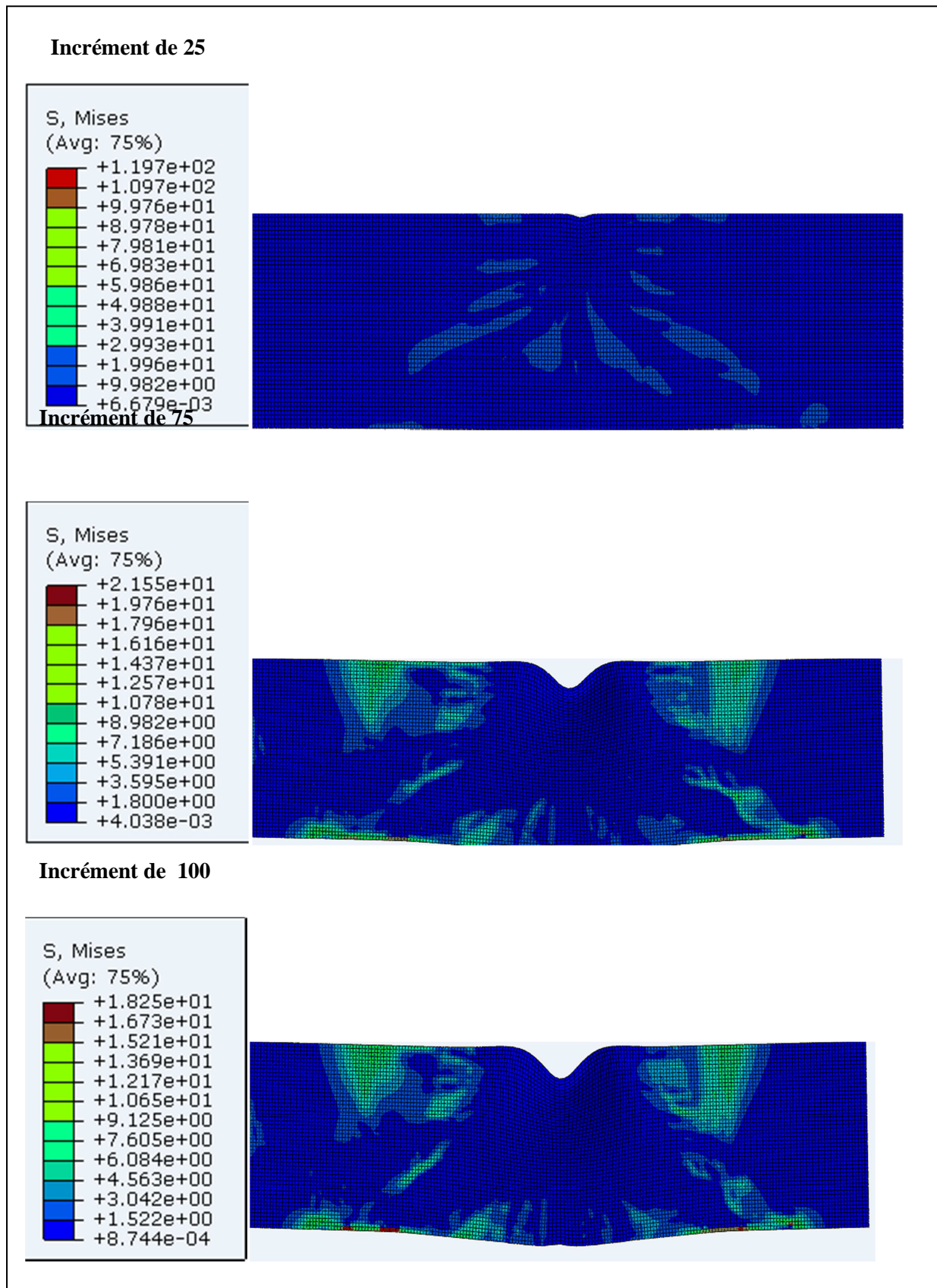


**Figure IV.8 :** Histogramme des forces des prismes renforcés et non renforcé.

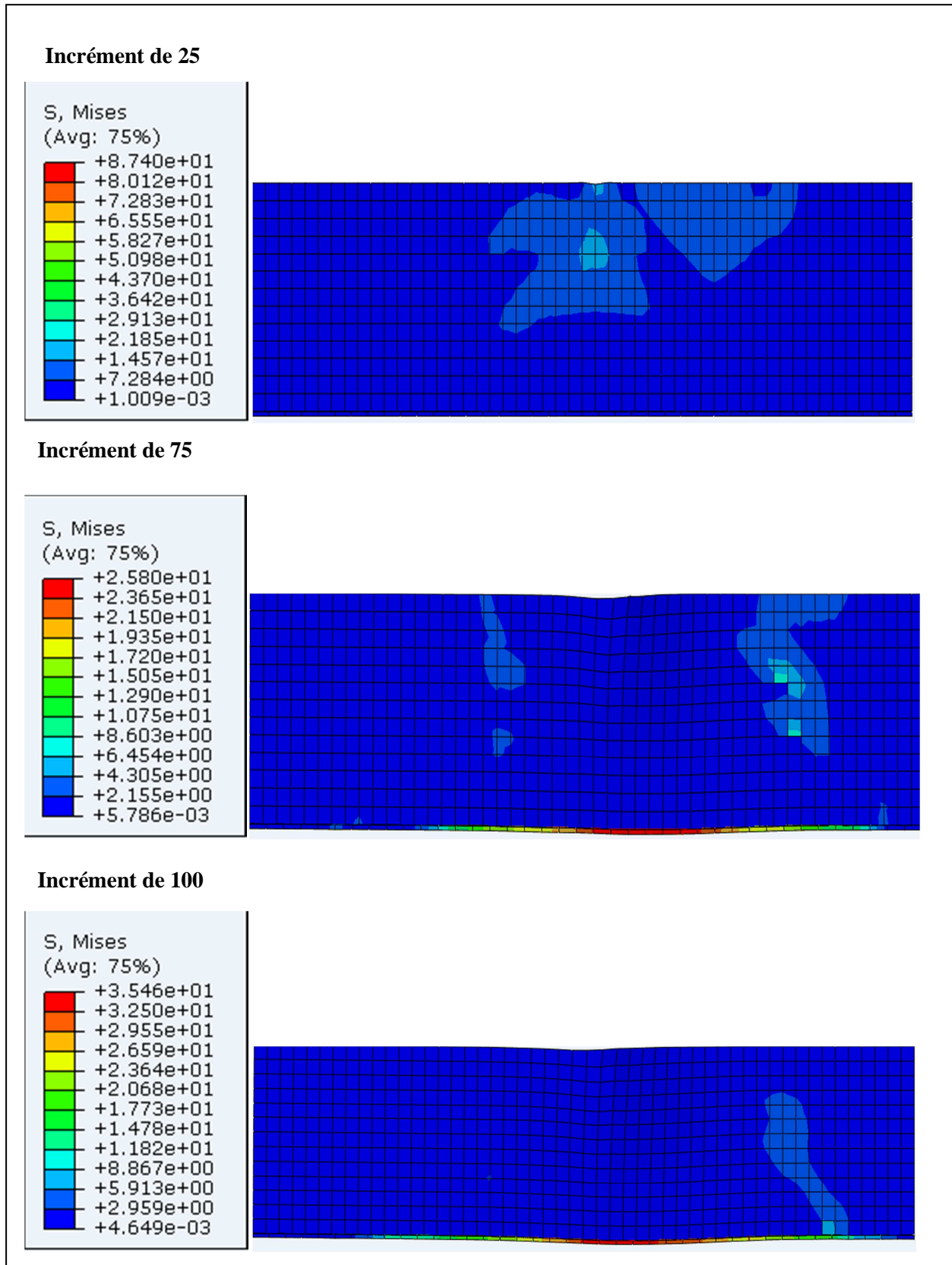
La confrontation des résultats montre que l'apport positif en termes de résistance est distingué pour la variante plaque en fonte 5% avec une force de l'ordre de 25.2kN contre des forces de l'ordre de 16.97 kN et 11.4 kN pour le liège et le plomb respectivement. À noter que le béton témoin présente une résistance qui avoisine celle du béton renforcé par la plaque en poudre de liège. Dans tous les cas de figures le gain au niveau de la charge ultime est accompagné par un accroissement en ductilité qui se traduit par une augmentation de la rigidité de l'énergie de rupture comparativement aux prismes témoins en béton.

### *IV.4.4. Cartographie des contraintes et des déformations :*

Les différentes cartographies des figures ci-dessous montrent l'évolution des déplacements respectivement dans un prisme en béton renforcé par des plaques composites (Fonte, Liège et Plomb) sous chargement en flexion 3 points, pour divers valeurs de l'incrément de charge. Nous reproduisons ainsi dans ce qui suit l'évolution de la distribution des déformations et de la dégradation de la rigidité, lors des simulations des prismes en fonction du chargement de flexion appliqué.



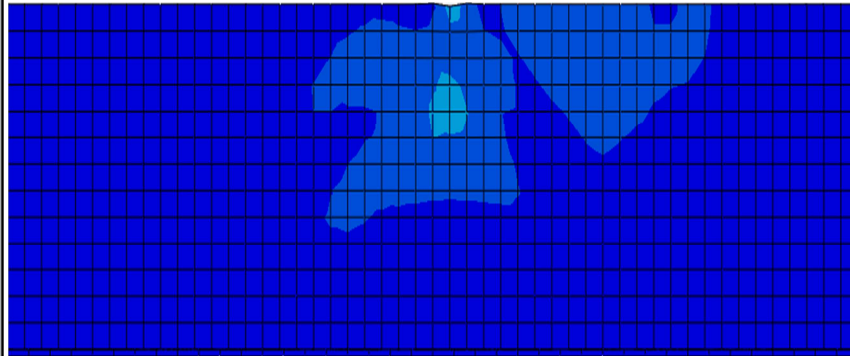
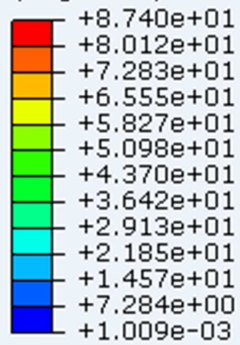
**Figure IV.9:**Évolution des contraintes du prisme renforcé par la plaque en Fonte.



**Figure IV.10:**Évolution des contraintes du prisme renforcé par la plaque en Plomb.

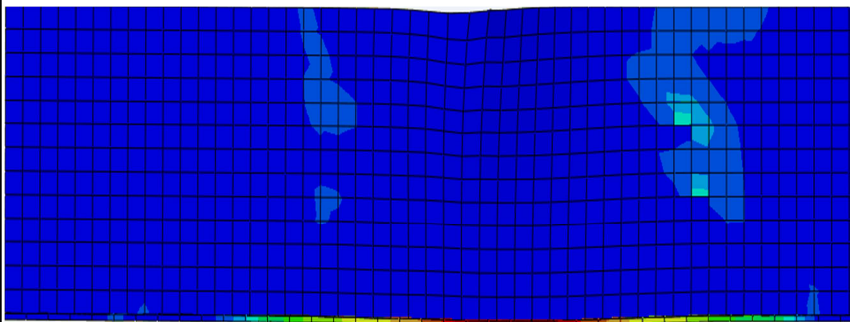
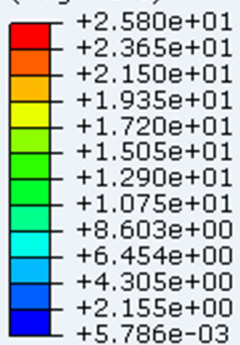
## Incrément de 25

S, Mises  
(Avg: 75%)



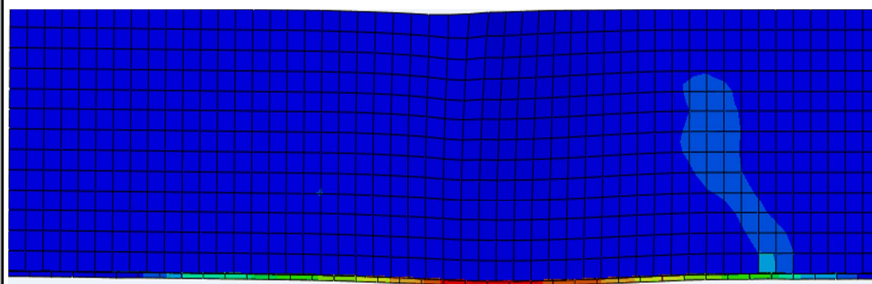
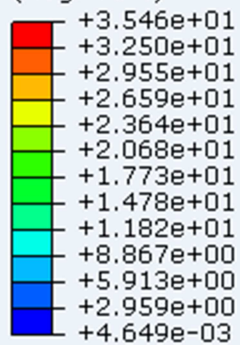
## Incrément de 75

S, Mises  
(Avg: 75%)



## Incrément de 100

S, Mises  
(Avg: 75%)

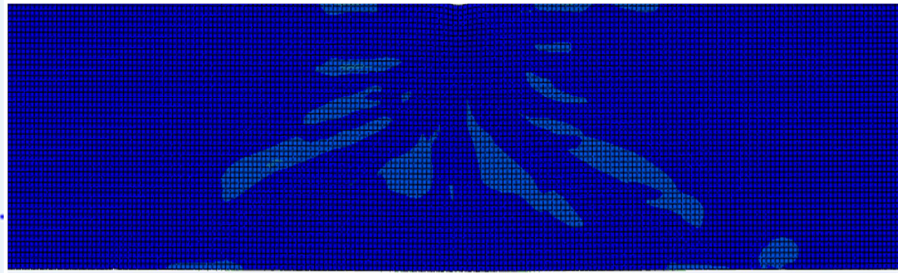
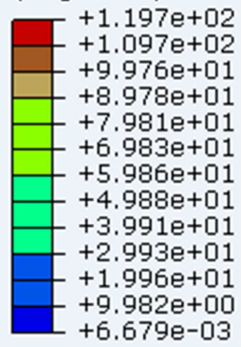


**Figure IV.11** :Évolution des déformations du prisme renforcé par la plaque en Liège.

## Incrément de 25

S, Mises

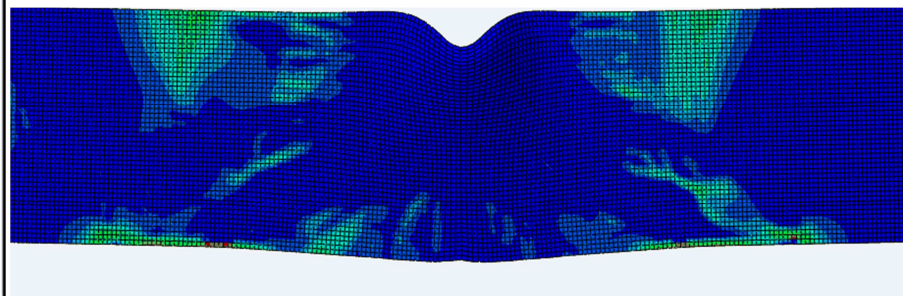
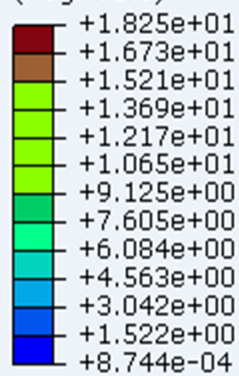
(Avg: 75%)



## Incrément de 75

S, Mises

(Avg: 75%)



## Incrément de 100

S, Mises

(Avg: 75%)

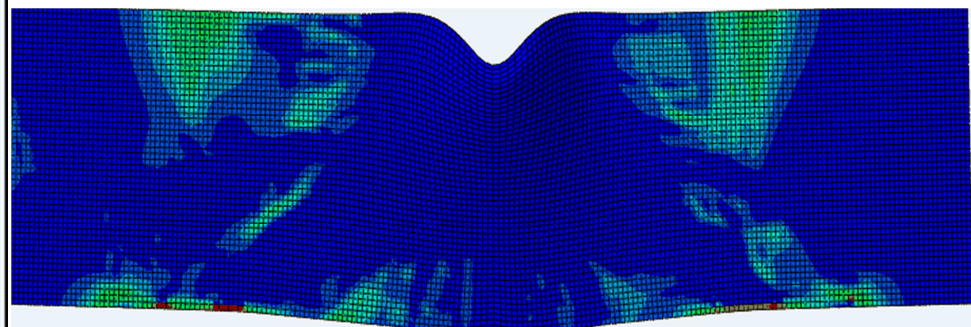
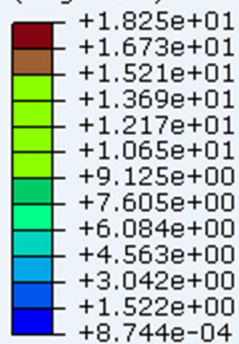
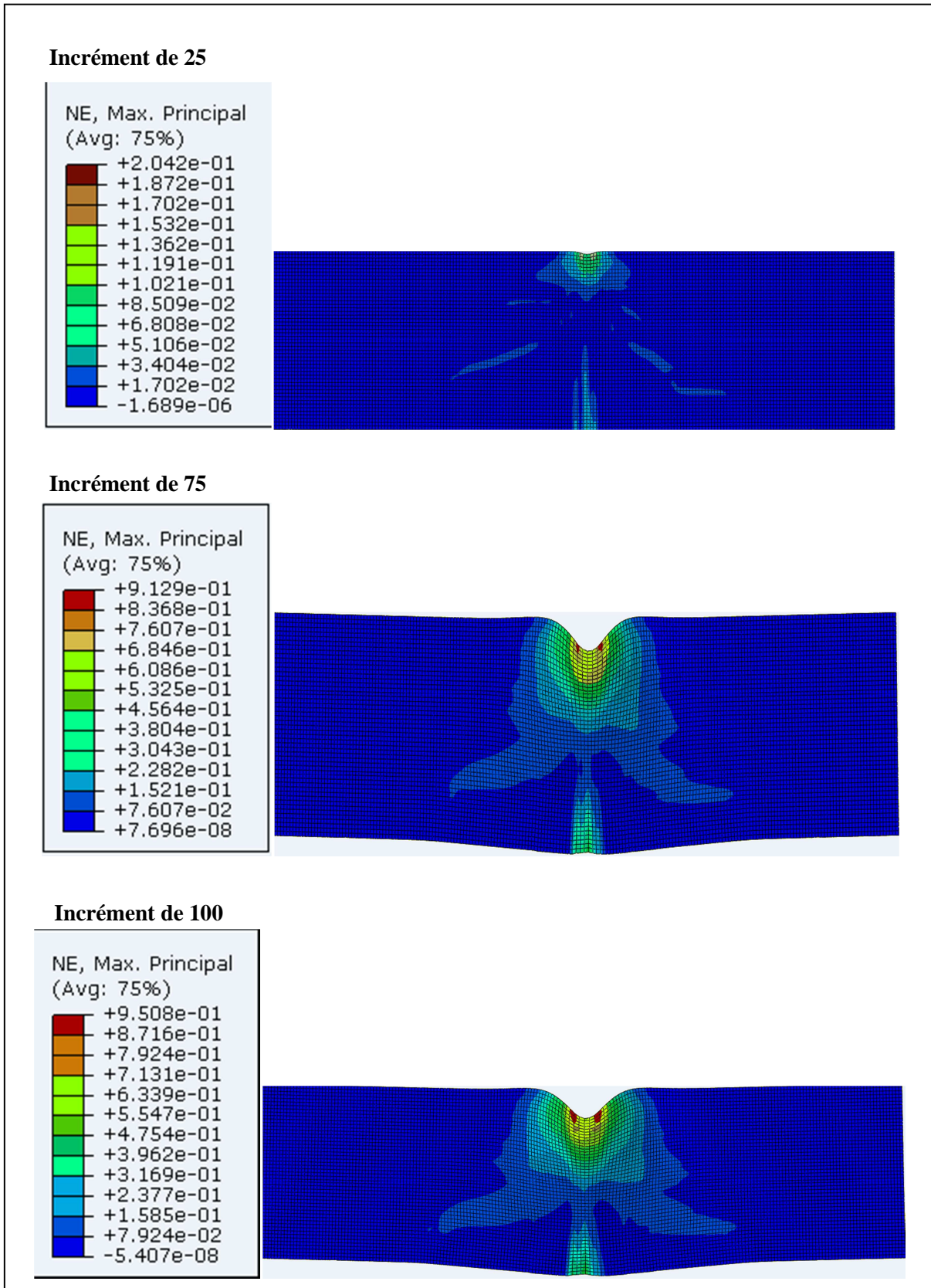


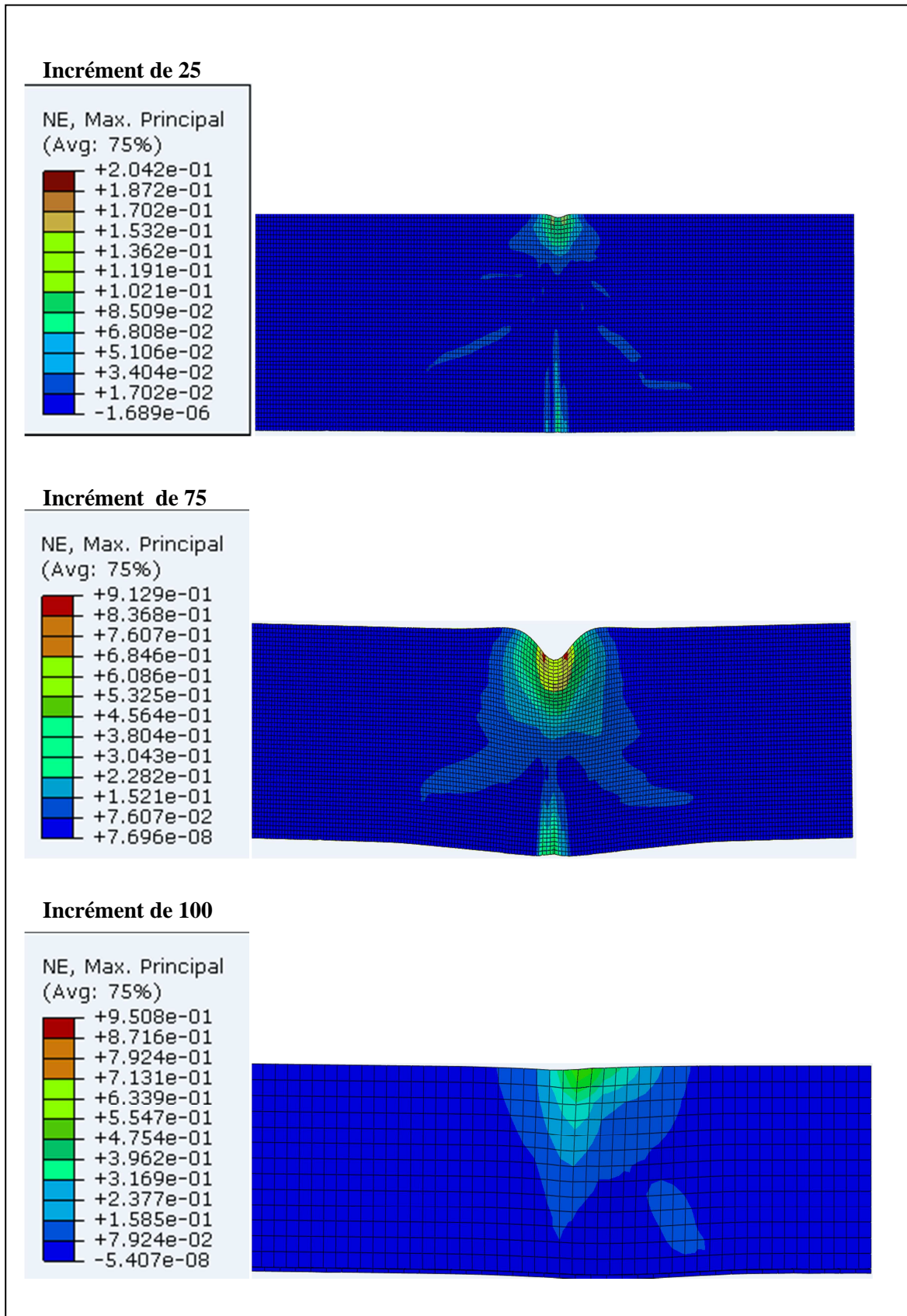
Figure IV.12 : Évolution des contraintes du prisme non renforcé.

## Chapitre IV : Présentation des résultats et discussion

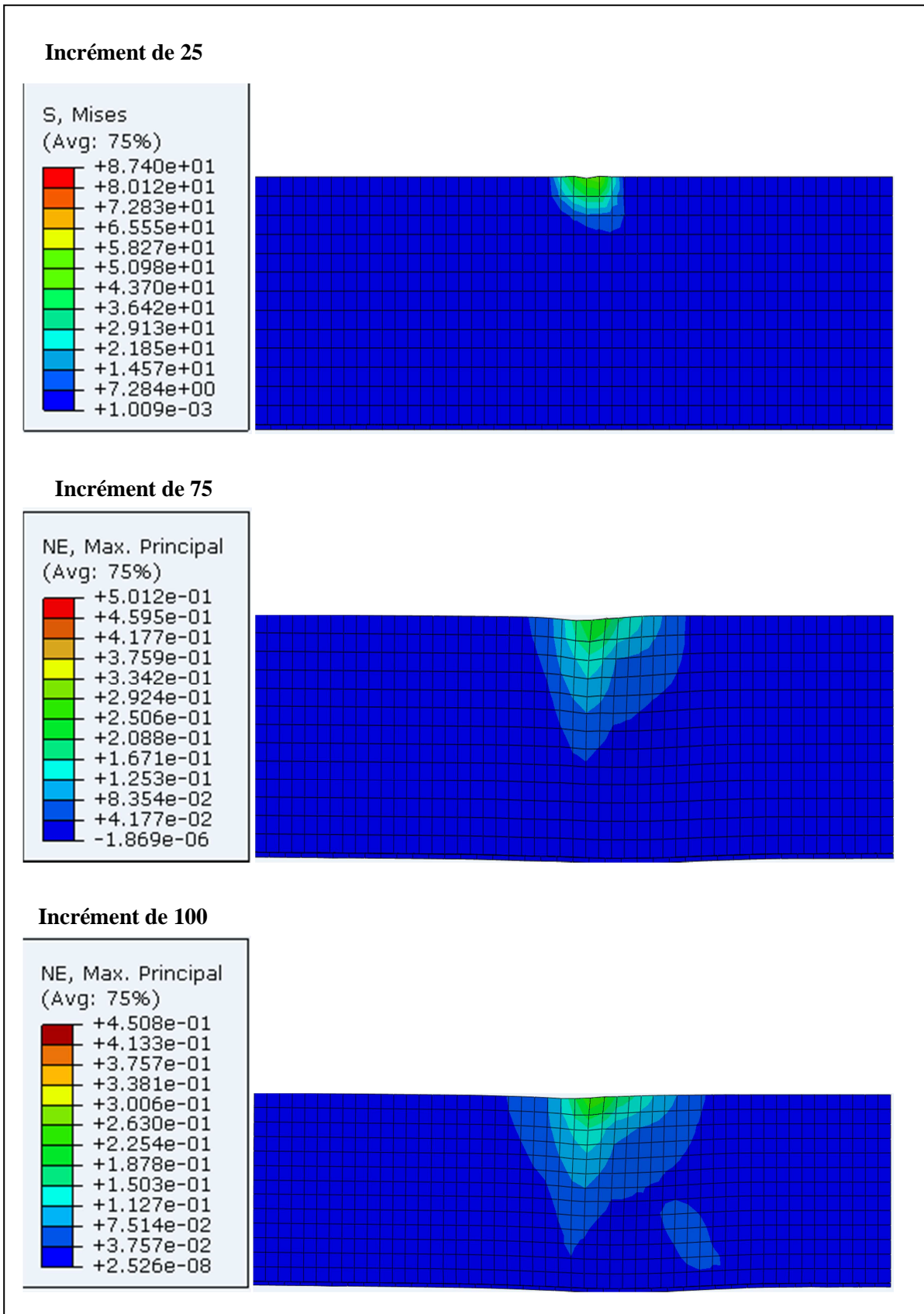
D'après les différentes cartographies, on note une augmentation significative du champ des contraintes dans les différents spécimens considérés. Ces champs de contraintes sont provoqués par l'évolution du chargement extérieur appliqué. Le champ de contrainte apparaît en premier lieu dans les faces inférieures (zones tendues en flexion), puis il se propage avec une vitesse importante vers les faces supérieures selon des bielles inclinées jusqu'à la rupture. Les prismes en béton avec renforcement présentent un certain seuil de résistance. Vers la fin du chargement, le champ de contrainte se concentre au niveau de la partie centrale de l'éprouvette (zone comprimée), avec une vitesse de propagation du champ des contraintes réduite.



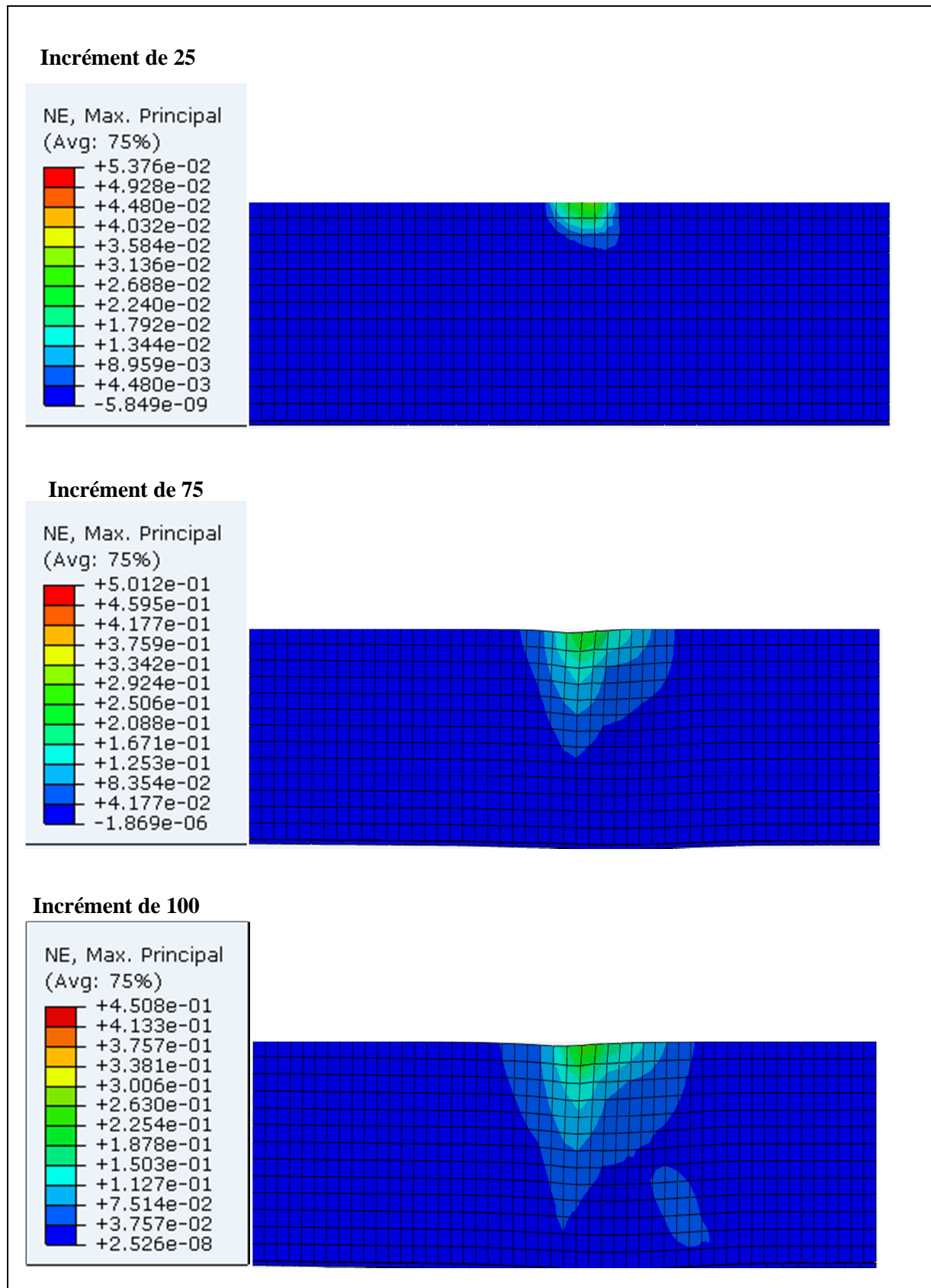
**Figure IV.13:**Évolution des contraintes du prisme non renforcé.



**Figure IV.14:**Évolution des déformations du prisme renforcé par la plaque enFonte



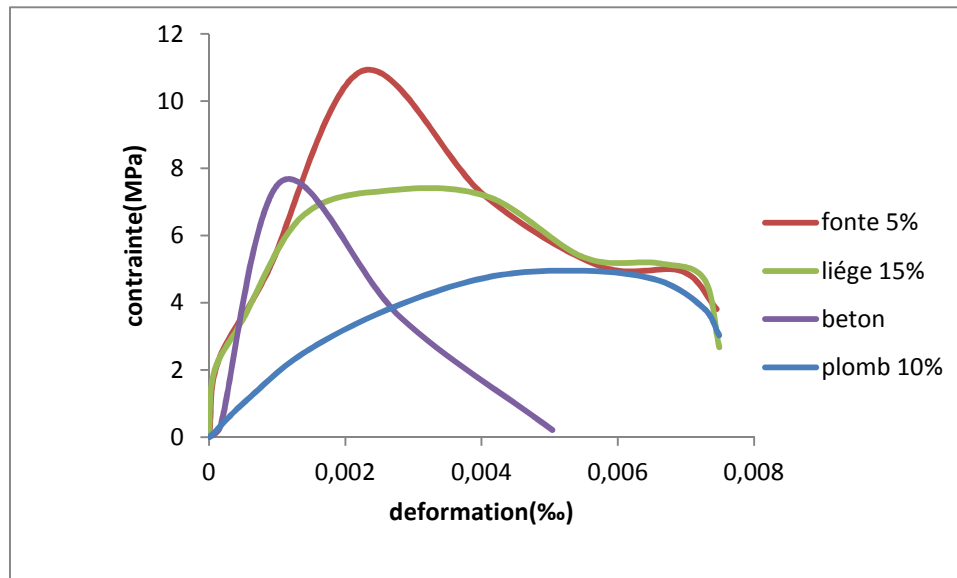
**Figure IV.15:**Évolution des déformations du prisme renforcé avec la plaque en Plomb.



**Figure IV.16:**Évolution des déformations prisme renforcé avec plaque en Liège.

## Chapitre IV : Présentation des résultats et discussion

Tous les prismes présentent des déformabilités très importantes excepté pour le cas du béton témoin et le prisme renforcé de Fonte. Les déplacements maximums qui correspondent à la rupture des spécimens sont plus grands pour les variantes liège et plomb. Ce constat est bien représenté sur la figure ci-dessous où on constate une bonne étendue de la figure.



**Figure IV.17:** Courbe contraintes-déformations des différents prismes.

Grâce à la présence de la plaque Fonte la contrainte de rupture est de l'ordre de 10.89 MPa contre une contrainte de rupture du béton témoin de 7.33 MPa, on note ainsi un gain en résistance de 33%. Contrairement dans le cas du prisme renforcé par la plaque en liège, on dénote une contrainte au pic presque du même ordre de grandeur que le béton témoin 7.34 MPa. Cette déformation est de l'ordre de 0.07 contre une déformation du béton témoin de 0.03 ceci peut s'expliquer par le fait que le liège est connu pour ses propriétés de déformabilité. Dans le cas de prisme en plomb, on enregistre la plus faible des contraintes d'une valeur de 4.95 MPa, moins importante que celle du béton témoin de 32%. Par contre la déformation vaut au pic de résistance pour le plomb 0.14. La conjugaison des performances mécaniques de la plaque en Fonte améliore la résistance par contre celle en liège présente des performances meilleures en termes de déformations, et par conséquent une augmentation de l'énergie de dissipation à la rupture des éléments considérés.

### *IV.5. Conclusion :*

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats prédits par la simulation numérique permettant de déduire les paramètres influençant la capacité portante, ainsi que le passage d'un mode de rupture fragile à un mode ductile.



---

# Conclusion générale

---



## Conclusion générale

Le renforcement des structures en génie civil a pour but de réparer et de mettre en conformité des structures existantes. L'utilisation de plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés. L'étude de la contribution pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques avec ce type de renforcement est plus que intéressant.

L'objectif principal de ce travail consiste à mettre en évidence, à travers une simulation numérique en utilisant le code de calcul Abaqus, le comportement mécanique des prismes en béton renforcés par des plaques en poudre de Liège, de Plomb et de Fonte. Le contact entre les différentes plaques et le prisme béton est assuré par une résine de nature époxyde. Ces charges sont issues de l'industrie de récupération des déchets.

L'étude numérique est réalisée en utilisant le code Abaqus. Elle est basée sur la méthode des éléments finis. Le matériau béton est modélisé suivant un modèle élasto-plastique permettant ainsi de tenir compte de la dissymétrie de son comportement en compression et en traction, et un modèle élastique fragile isotrope pour les matériaux composite. Par la suite tous les résultats obtenus sont représentés sous forme de courbes et d'histogrammes. Les états de contraintes et de déformations sont discutés et présentés sous forme de cartographies d'évolution de contraintes, des déformations en traction pour l'essai de flexion, pour mettre en valeur les performances mécaniques des structures composites proposées.

Les résultats obtenus dans ce travail de recherche, en termes de variation de contrainte en fonction de la déformation selon les différentes configurations et la visualisation des cartographies d'évolution des contraintes, des déformations nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Une amélioration en termes de résistances et ductilité est constatée en renforçant le prisme en béton selon le type de renfort.
- ❖ Le renforcement avec une plaque en Fonte permet d'améliorer la résistance du béton renforcé et présente une certaine la ductilité assez satisfaisante. La contribution de la plaque en Fonte sur la rigidité et sur les comportements mécaniques est considérable.
- ❖ L'intégration d'une plaque en poudre de Liège permet le passage d'un comportement (fragile) vers comportement ductile du béton renforcé, avec une contrainte de rupture bien appréciée.
- ❖ Le renforcement à l'aide d'une plaque en poudre de Plomb prédit certes une résistance légèrement plus petite que celle du béton témoin mais avec une ductilité plus prononcée.
- ❖ L'utilisation de ces types de renfort est étroitement lié à la destination des éléments de structures c'est-à-dire le rôle et la fonction attendue par ces derniers.

## Conclusion générale

- ❖ La conjugaison des performances mécaniques des plaques composites permet de réduire la propagation des fissures, donc un comportement relativement ductile. Ceci laisse entrevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux composites pour améliorer les performances mécaniques, notamment les capacités portantes et les déformabilités sous chargement de flexion.

Les résultats de cette simulation numérique sont très encourageants et soulignent l'intérêt de la conception proposée. Dotés de propriétés mécaniques acceptables pour leur utilisation, de coûts de fabrication et de main d'œuvre peu qualifiée, et surtout d'un impact positif sur l'environnement vu que les déchets en question vont être destinés pour une autre utilisation qui est à long terme.



---

# Annexes

---



# ANNEXE I

## Procédure expérimentale (Réalisée par: **Ben chabane.Tarik**)

Cette annexe concerne la présentation d'un résumé du protocole expérimental réalisé au laboratoire de Génie-Civil par Ben chabane. T sous la direction du Pr Ait tahar. K avec la collaboration de Mme Kheloui. F.

On présentera l'essentiel des étapes de confection des spécimens (prismes renforcés avec des matériaux composites) dans le but de les soumettre aux essais de flexion trois points.

Les prismes sont de dimension (10x10x40) cm<sup>3</sup> pour les essais de traction par flexion.

### A. Matériaux utilisés

- **Ciment** : le ciment utilisé est un ciment portland importé de marque CIMPOR de classe CEM II/A-L 42.5R.
- **Granulats**: le sable et le gravier utilisés proviennent d'une sablière, stocké à l'université.
- **L'eau**: l'eau de gâchage utilisé est l'eau du robinet, potable.
- **Plastifiant**: plastifiant MEDAFLOW-30 fabriqué par Granitex.

### B. La composition du béton

Une seule composition du béton est utilisée. Elle a été formulée selon la méthode de DREUX GORISSE.

Composant	masse pour 1m <sup>3</sup> de béton
Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	350+75
Sable (Kg/m <sup>3</sup> )	750
Eau (Litres)	192
Gravier 8/15 (Kg/m <sup>3</sup> )	572
Gravier 3/8 (Kg/m <sup>3</sup> )	253
Superplastifiant	5.1 litre
Rapport E/C	0.54

**Tableau 1** : Composition du béton.

### C. Matériaux Composites

La réalisation des différentes plaques, en composites à matrice chargée, pour le renforcement des prismes en béton est organisée comme suit :

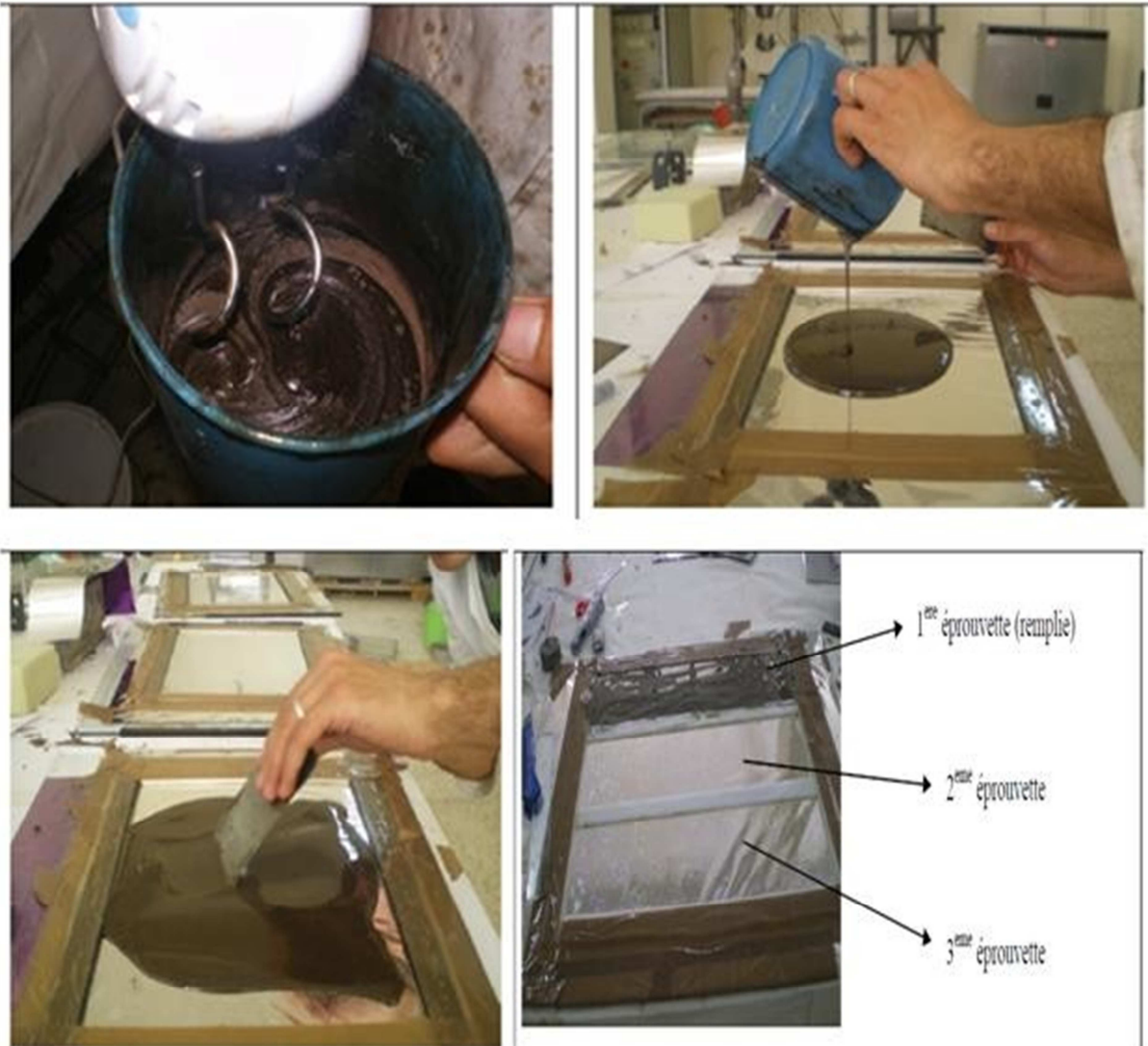


*Figure 4.28* : granulométrie du liège

**Figure 1** : charges en Liège



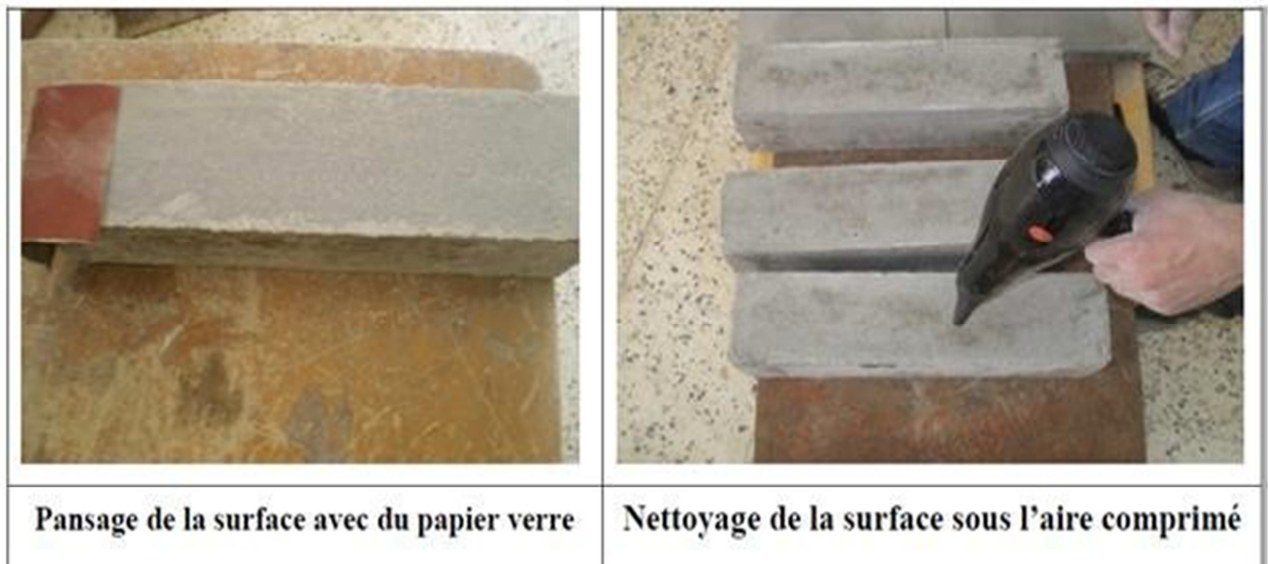
**Figure 2 :** charge en Fonte et plomb.



**Figure 3 :** Confection des plaques composites chargées.

Préparation du support selon la norme (NF P 74-203/DTU 59-3)

- Les éprouvettes doivent avoir au moins 28 jours d'âge.
- Les supports doivent être secs et propres.

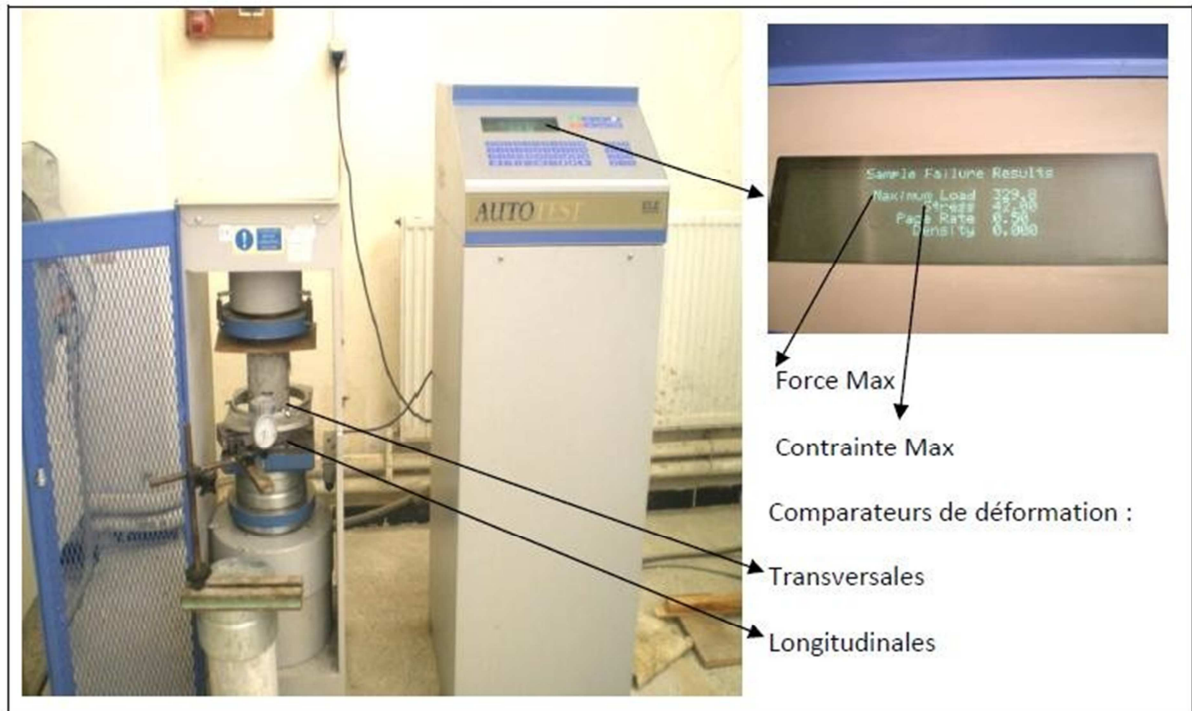


**Figure 4 :** Préparation de surfaces.

#### **D. Instrumentation des essais**

##### **➤ Détermination de la résistance mécanique en compression du béton**

Les spécimens utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression du béton sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm et de hauteur 20 cm.

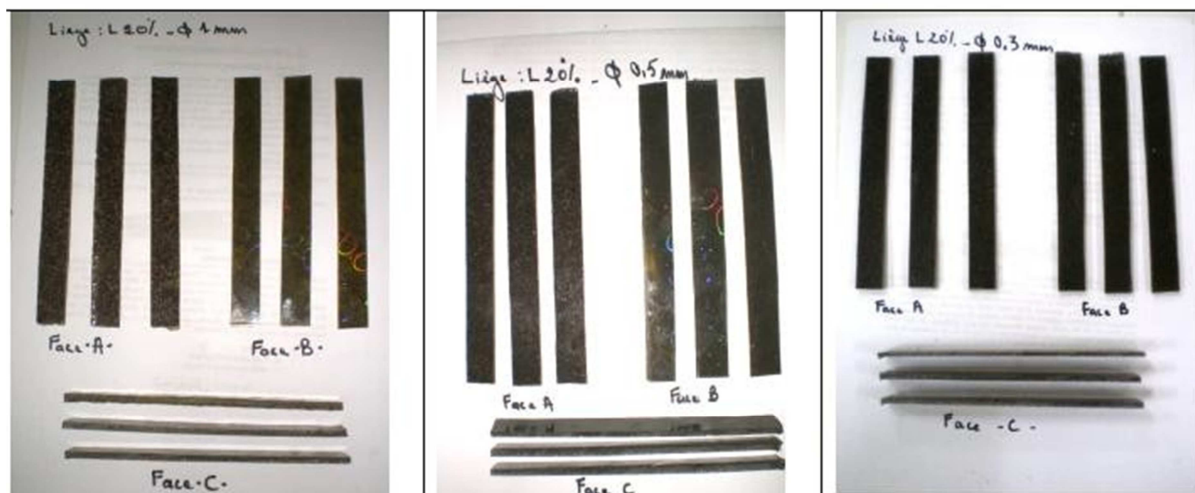


**Figure 5 :** Essai de compression.

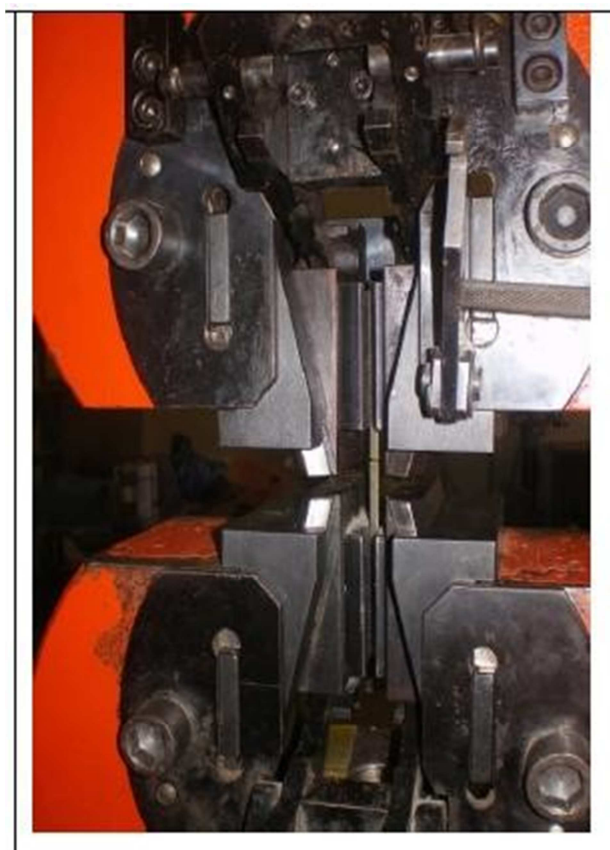
### ➤ Essai de traction sur éprouvettes en matériaux composites

La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite permettent de comprendre le comportement en service (module de Young, le coefficient de poisson, contraintes maximale, charge de rupture).

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de traction ont été choisies selon la norme NF EN ISO 178, ASTM D790 c'est-à-dire  $l = 20h + 20$  mm ;  $b$  en fonction de  $h$  comme indiqué ci-après :  $10 < b \leq 15$  mm  $h \leq 5$  mm



**Figure 7 :** Exemple de plaque Liège testée.



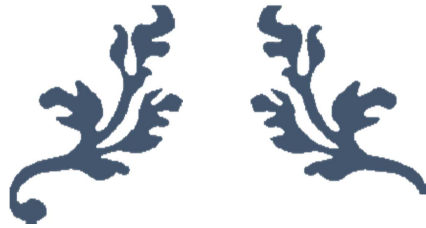
**Figure 8 :** Dispositif d'essai de caractérisation des plaques composites.

## ➤ Essais de flexion

Cette partie a pour but d'étudier le comportement en flexion du béton. Le test de flexion 3 points est effectué sur la même machine IBERTEST utilisée dans l'essai de traction, doté d'une cellule de 200 KN, la machine est réglée à une vitesse de chargement de 0.1kN/s. Le prisme 10x10x40cm est posé sur un dispositif de flexion avec deux appuis. Notons que la distance entre le point de chargement et les appuis est de 15cm. Les plaques composites sont collées sur les faces inférieures des spécimens.



**Figure 9** : Essai d'écrasement en flexion trois points.



---

# Références bibliographiques

---



## Références bibliographiques

### *Références bibliographiques :*

[01] **BERREUR.L, MAILLARD.B.d, et NÖSPERGER.S**, « *L'industrie française des matériaux composites* », Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, p1-47,2002.

[02] **BOUDENNE.A**, « *Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-physiques de matériaux composite à matrice polymère* », Thèse de DOCTORAT, Université PARISXII, 2003.

[03] **GORNET. L**, « Généralités sur les matériaux composites », HAL Id: cel-00470296 <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v2>, 2010.

[04] **JULES.E.J**, « *Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique* », École nationale supérieure d'arts et métiers, 2001.

[05] **KAUSCH.H.-H, HEYMANS.N, PLUMER.C.J, and DECROLY.P**, « *Matériaux Polymères : propriétés mécaniques et physique* », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Volume 14, 2001.

[06] **BEWA.H**, « *Matériaux polymères biodégradables et applications Note de Synthèse II* », Direction des Énergies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Énergétiques, p1-16,2006

[07] **BARDONNET.P**, « *Résines époxydes (EP)* », Techniques de l'Ingénieur, vol. A3465, 1992.

[08] **CHEVALIER.M**, « *Phénoplastes ou phénols-formols PF* », Techniques de l'Ingénieur, vol. A3435, 1991.

[09] **BERTHELOT.J.-M**, « *Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures* », Edition TEC & DOC, 1999.

[10] **Glossaire des Matériaux Composites**, « centre d'animation régional en matériaux avancés », 2006.

## Références bibliographiques

- [11] **D.GUILLON**, « Fibre de verre de renforcement », Technique de l'ingénieur, vol.A2110, 1995.
- [12] **Nadia BEHLOULI**, « Les matériaux composites », cours des matériaux composites, Université de Strasbourg, 1994.
- [13] **HANTZ Mathieu** « Étude de l'optimisation du renforcement par des fibres de carbone des dalles en béton armé munies de trémies, en utilisant l'optimisation Topologique » Projet de fin d'étude université fédérale d'Uberlândia, Brésil.
- [14] **MADOUNI Lyliya** ; « simulation numérique des éléments en bétons confinés par des grilles métalliques » Mémoire de Master; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [15] **BERTHELOT, J.M.**, « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures ». Livre, Edition : Lavoisier, 2005.
- [16] **Jean Marie. BERTHELOT**, Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures », Edition TEC et DOC, 1999.
- [17] **BOUKHEZAR Mohcene**, « Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites ». Thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, 2009.
- [18] **MAIZI, Ibtissam, BENJOUDI, Mouslam**, « Réhabilitation de structures en béton armé », Mémoire de master, Université 08 Mai 1945 Guelma, Année 2013.
- [19] **OUZAA, Kheira** «réhabilitation des structures », Université MOHAMED BOUDIAF Oran, Année 2014/2015.
- [20] **MERDAS Abdel-Elghani** « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA », Université de Constantine, Thèse de Magister 2005 – 135p.
- [21] **BENZAID Riad**, « Contribution à l'Étude des Matériaux Composite dans le Renforcement et la Réparation des Éléments Structuraux Linéaires en Béton ». Thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, 2010.

## Références bibliographiques

- [22] **ALI AHMED Chafika**, « Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées: Techniques –expérimentation et modélisation », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016
- [24] **BOUKHEZAR Mohcene**, « Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites ». Thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, 2009.
- [25] **SOROKA I., SEREDA P.**, « Interrelation of hardness, modulus of elasticity and porosity in various gypsum systems ». Journal of the American Ceramic Society, 1968, vol 51, n°6, p.337-340.
- [26] **HOUHOU Noureddine**, « Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites : développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique ». Thèse de Doctorat, Structures et Matériaux, Université Paris-Est, 2012.
- [27] **BEDDIAR Abdelhakim**, « Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de matériaux composites étude théorique et numérique », Mémoire magister, Université Mohamed Khider de Biskra. 2004.
- [28] **SHEIKH, S.A. et UZUMERI, S.M.** «Strength and ductility of tied concrete columns», Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. 5, pp. 1079-1102, 1980.
- [29] **Richart, F.E., BRANDTZAEG, A. Et BROWN, R.L.** «A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses», University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Bulletin no 185, 104 p.1928.
- [30] **YOUNG Q., QIN Q, ZHENG D.** « Analytical and numerical investigation of interfacial stress of FRP-concrete hybrid structure». Composite structure, 57221-226, 2002.
- [32] **MAZZUCCO G., SALOMONI V.A , MAJORANA C.E, PELLEGRINO C, CECCATO C.** «Numerical investigation of concrete columns with external FRP jackets subjected to axial loads».
- [33] **BERSET, J.-D.** 1992. Strengthening of Reinforced Concrete Beam for Shear Using FRP Composites. MSc Thesis, Departement of Civil and Environnemental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Boston MA.USA : 105 p.

## Références bibliographiques

- [34] **CHAJES, M.J., JANUSZKA, T.F., MERTZ, D.R., THOMSON, T.A. Jr. and FINCH W.W. Jr.** 1995. “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite Fabrics*”. ACI Struct. J. 92(3), p. 295-303.
- [35] **KAMIHARAKO, A., MARUYAMA, K., TAKADA, K. and SHIOMURA, T.** 1997. “Evaluation of Shear Contribution of FRP Sheets attached to concrete beams”. *Proceeding of the third international Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for concrete Structures*, October, 1997, 1, p.467-474.
- [36] **KHALIFA, A. and NANNI, A.** 1999. “*Rehabilitation of rectangular Simplysupported RC Beams with Shear Deficiencies Using CFRP Composites*”. Construction and Building Materials, 16(3), p. 135-146.
- [37] **TÄLJSTEN, B.** 2003. “*Strengthening of concrete beam for shear with bonded CFRP sheets*”. Construction and Building Materials, Elsevier, 17, p. 15-26.
- [38] **BOUSSELHAM, A.** 2005. « Comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés ». Thèse Ph.D. École de technologie supérieure, Montréal, Canada. 404 p.
- [39] **BEN CHABANE, T et AIT TAHAR, K,** 2013. « Analyse expérimentale des éléments de structures renforcés par des composites ». Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou.
- [40] **EL-SAIKALY, G.** 2014. “*New Anchorage Technique for FRP Shear-Strengthened RC T-Beams Using CFRP Rope*”, DOI: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000530). © 2014 American Society of Civil Engineers.
- [41] **ALI AHMED C, AITTAHAR K.** “Behavior of concrete cylinder confined with helical composites strips”. Procedia Engineering, volume 144, 2015, pp 157-164.
- [42] **HIBBIT, Karlsson & Sorensen, INC.** ABAQUS documentation version 6.14 ; 2014
- [43] **BEN CHABANE Tarik** « Analyse expérimentale des éléments de structures renforcés par des composites ». Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [44] **BEN CHABANE Tarik** « Analyse expérimentale des éléments de structures renforcés par des composites ». Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.