

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de Master recherche

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

AÏGONAN Christian

Thème :

**Simulation numérique du comportement d'une poutre en
béton armé renforcée au cisaillement**

Devant le jury composé de :

DEHMOUS H.	MCA	UMMTO	Président
ALI Ahmed	MCB	UMMTO	Encadreur
BOUZEBOUDJA F.	MCB	UMMTO	Examinatrice

Soutenu le : 15/10/2019

REMERCIEMENTS

Je voudrais avant tout exprimer toutes mes profondes gratitude au Père Céleste pour m’ avoir donné la volonté, le courage et la patience nécessaires pour finir mes parcours de Licence et de Master.

Ce travail de recherches a bénéficié de multiples collaborations. En tout premier lieu, celle de Madame ALI Ahmed, qui a assuré la direction du projet et qui continue à s’ investir personnellement dans ce travail malgré ses engagements multiples. Je tiens également à la remercier pour m’ avoir proposé ce thème qui est d’ une grande pertinence. Sa disponibilité, son enthousiasme et ses conseils m’ ont été très utiles. Grâce à elle, j’ ai fait mes premiers pas dans le domaine de la recherche.

Je tiens ensuite à remercier un grand nombre de personnes, notamment Messieurs Abdelmadjid SI SALEM et Amine NEKMOUCHE. Ils ont accepté, malgré leurs préoccupations, de résoudre certains que j’ ai rencontrés lors de la simulation numérique. Leur gentillesse et leur sens de travail m’ ont été d’ une grande importance.

Je remercie Madame BOUZEBODJA F et Monsieur DEHMOUS H, de m’ avoir fait l’ honneur de faire partie du jury de ma soutenance, leurs remarques me seront sûrement d’ une grande utilité pour la suite de mon parcours.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j’ adresse toute mon affection à ma famille pour la confiance ainsi que le soutien inconditionnel qu’ elle a manifestée à mon égard. Aussi, voudrais-je adresser mes remerciements à tous les amis et connaissances qui, de près ou de loin, n’ ont cessé de m’ encourager tout au long de cette période.

RESUME

Le béton armé, matériau le plus utilisé dans le domaine du génie civil, fait souvent face à d'innombrables problèmes. En effet, les structures réalisées à base de celui-ci se retrouvent dégradées pour de multiples raisons. La réhabilitation des structures reste une solution largement applicable et permet de maintenir les ouvrages dans un bon état de service.

Le présent travail, à caractère purement numérique, vise la connaissance du comportement de poutres en béton armé renforcées au cisaillement par PRF. Le renforcement est fait à partir de bandes de PRF posées sous forme de cadres autour des armatures longitudinales. Plusieurs variantes de renforcement ont été testées. Bien que la résistance des poutres renforcées soit peu augmentée, la déformabilité de celles-ci est nettement améliorée.

Mots clés : poutre en béton, modélisation, cisaillement, renforcement, matériau, déformabilité.

ABSTRACT

Reinforced concrete, the most used material in the field of civil engineering, often faces innumerable problems. Indeed, the structures based on it are degraded for multiple reasons. Rehabilitation of structures remains a widely applicable solution and helps keep the structures in good working order.

The present work, which is purely numerical in nature, aims at understanding the behavior of reinforced concrete beams reinforced by shearing by FRP. The reinforcement is made from strips of FRP placed in the form of frames around the longitudinal reinforcement. Several variants of reinforcement have been tested. Although the strength of the reinforced beams is slightly increased, the deformability thereof is significantly improved.

Key words: concrete beam, modeling, shearing, reinforcement, material, deformability.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

i

RESUME

ii

ABSTRACT

ii

TABLE DES MATIERES

ii

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE RENFORCEMENT DES POUTRES EN BETON ARME

I.1 INTRODUCTION 5

I.2 MATERIAUX DE RENFORT 5

I.2.1 Textile 5

I.2.2 Fibres 6

I.2.2.1 Fibres de verre 6

I.2.2.2 Fibres de carbone 7

I.2.2.3 Fibres de basalte 7

I.2.2.4 Fibres d'aramide 8

I.2.2.5 Fibres d'acier inoxydable..... 9

I.2.3 Fibres naturelles : avantages et inconvénients 10

I.2.4 Fabrication de textile de renforcement 11

I.2.5 Durabilité du renfort : effet de l'environnement, de la fatigue et du fluage 15

I.2.6 Matrice cimentaire..... 16

I.3 DEFINITION ET PRESENTATION DU MATERIAU COMPOSITE PRF 17

1.3.1 Comportement d'une poutre en béton armé renforcée par composite FRP (Fibre Reinforced Polymer) 17

1.3.1.1 Comportement global 17

1.3.1.2 Configurations courantes du renforcement d'une poutre en béton armé	18
1.3.2 Mécanismes de rupture à l'effort tranchant	21
I.4 CONCLUSION	22
CHAPITRE II : PRESENTION DU LOGICIEL ET SIMULATION NUMERIQUE	
II.1 INTRODUCTION	24
II.2 METHODES DES ELEMENTS FINIS	25
II.3 PRESENTATION DU LOGICIEL ABAQUS	26
II.3.1 Abaqus/Standard	28
II.3.2 Abaqus/Explicit	28
II.3.3 Abaqus/cae	29
II.4 MODULES D'ABAQUS ET ETAPES DE MODELISATION	30
II.4.1 Module Part	30
II.4.2 Module Property	31
II.4.2.1 Modèle pour le matériau béton	31
II.4.2.2 Modèle pour le matériau acier	33
II.4.3 Module Assembly	33
II.4.4 Module Step	33
II.4.5 Module Interaction	34
II.4.6 Module Load	34
II.4.7 Module Mesh	34
II.4.8 Module Job	34
II.4.9 Module Visualization	34
II.5 PRESENTATION DES MODELES	35
II.5.1 Introduction	35
II.5.1.1 Présentation du modèle numérique de référence	35
II.5.1.2 Présentation des modèles renforcés	35

II.5.2 Matériaux	36
II.5.2.1 Béton	36
II.5.2.2 Aciers	37
II.5.2.3 Polymères renforcés de fibres PRF	38
II.5.3 Géométrie	38
II.5.4 Contact béton-composite	39
II.5.5 Étude de maillage par éléments finis	40
II.5.6 Conditions aux limites	41
II.6 CONCLUSION	42

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 INTRODUCTION	43
III.2 EFFET DU NOMBRE DE CADRES COMPOSITES	43
III.2.1 Modèle numérique de référence	43
III.2.2 Modèle renforcé avec 3 bandes	44
III.2.3 Modèle renforcé avec 5 bandes	46
III.2.4 Modèle renforcé avec 9 bandes	47
III.2.5 Modèle totalement renforcé	49
III.3 EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU PRF	50
III.4 EFFET DE LA LARGEUR DU PRF	53
III.5 ÉVOLUTION DES DOMMAGES	54
III.6 CONFRONTATION DES RESULTATS	56
III.6.1 Comparaison des courbes	57
III.6.2 Comparaison des modes de rupture	58
III.7 ÉVOLUTIONS DES DEPLACEMENTS GLOBAUX	61
III.7.1 Poutre de référence	62
III.7.2 Poutre renforcée avec trois bandes composites	62

III.8 CONCLUSION	63
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	64
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Introduction générale

Problématique

Plusieurs matériaux sont de nos jours utilisés pour la réalisation des projets en génie civil, notamment le béton. En effet, grâce à ses très bonnes performances et principalement sa grande résistance à la compression et sa souplesse d'emploi, le béton est omniprésent dans les bâtiments, les ponts, les chaussées, les barrages, etc. Pour pallier à sa faible résistance à la traction, le béton est associé à l'acier pour former le béton armé afin de mieux travailler ensemble. Cette association entre le béton et l'acier date d'une époque très lointaine car déjà en 1870 les entrepreneurs anglais Alexander Payne et Thaddeus Hyatt ont tenté de disposer des armatures dans les bétons mais furent désavoués par des contradictions et quelques infortunes. Les américains quant à eux, ont attendu 10 ans plus tard pour connaître son existence, grâce aux travaux de recherches de William E. Ward et Ernest Leslie Ransome qui ont mis la lumière sur les armatures métalliques du béton. Dès lors, le béton armé s'est petit à petit répandu à travers le monde et est devenu incontournable de nos jours dans la construction.

Tous les essais de substitution du béton par un autre matériau se sont soldés par des échecs en raison de leur coût : le béton, dont les constituants sont banals, défie toute concurrence. Le constructeur doit donc s'accommoder de ses imperfections et chercher à les atténuer par des additions qui modifient ses caractéristiques. Le béton armé répond à ce souci, les armatures conférant au matériau béton la résistance à la traction qui lui fait défaut.

Mais, même armé, le béton reste très fragile car les armatures ne peuvent pas s'opposer à la fissuration ; tout au plus, moyennant des dispositions constructives convenables, peuvent-elles répartir les fissures afin d'éviter de trop larges fractures du béton tendu.

À partir du 19^{ème} siècle et jusqu'à il y'a quelques dizaines d'années, de nombreux problèmes sont survenus dans de structures réalisées en béton armé. On peut citer à titre d'exemples le trafic routier important, les pathologies dues au chargement excessif, aux erreurs de conception, à la fatigue sous chargement cyclique. Face à cette situation, des techniques de réparation et de renforcement par collage des tôles en acier et de plaques en matériaux composites se sont développés. De nos jours, le collage de matériaux composites est l'une des méthodes de réhabilitation les plus utilisées dans ce marché en pleine expansion.

Le renforcement externe, bien que présentant des avantages considérables (augmentation de la résistance de l'élément renforcé par exemple), a tout de même ses limites. Des inconvénients

majeurs liés au décollement du composite et à la rupture de l'enrobage en béton lors du renforcement à l'effort tranchant d'une poutre en béton armé par collage externe de composite limitent cette méthode et poussent les utilisateurs à œuvrer pour une nouvelle technique : le renforcement interne. Ce type de renforcement, en plus de présenter quasiment les mêmes avantages que ceux liés au renforcement par collage externe, permet également de se passer des problèmes sus-cités. Même si cette technique est nouvelle et moins répandue que la première, elle augure pour une bonne suite et offre une alternative préférable.

Renforcement externe de structure en béton armé

L'utilisation des plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés.

Le renforcement externe d'une structure en béton armé est une technique couramment utilisée pour réhabiliter ou augmenter la résistance des structures en béton armé. Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier. Les plus fréquentes sont : accroissement des charges qui sollicitent la structure, défauts dans le projet ou dans l'exécution, rénovation des structures anciennes, changement de la forme de structures, dégâts dans la structure, nécessité d'améliorer les conditions en service

Il existe divers procédés de remplacement tels que : le remplacement des matériaux dégradés, l'ajout de nouveaux matériaux, l'utilisation de matériaux beaucoup plus performants, l'augmentation de la section de structure par ajout de matériaux, amélioration des structures par précontrainte extérieure, amélioration de la structure des bâtiments à l'aide des dispositifs amortisseurs, collage d'éléments préfabriqués.

L'utilisation de l'acier comme renfort actif ou passif a certes ses avantages, mais présente aussi des inconvénients tels que la corrosion et le poids élevé, ce qui a poussé les ingénieurs à aller encore plus loin dans leurs recherches aboutissant à une solution qui privilégie l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des structures en béton armé au détriment de l'acier. Comparativement aux autres techniques de renforcement, les PRF présentent de nombreux avantages : légèreté, haute résistance, possibilité et facilité d'élaboration de formes complexes avec un minimum d'opération, facilité d'adaptation avec n'importe quelle section de structure donc une mise en œuvre très aisée grâce à leur faible poids, une haute performance à la traction et une faible corrodabilité. Le renforcement interne, qui peut se faire aussi bien avec des aciers qu'avec des composites, est une technique

nouvelle. Ce type de renforcement n'est pas tout à fait répandu dans les chantiers en raison de leur maniabilité assez délicate. Pour cela, il se fait en amont de la construction.

Objectif et grandes lignes du projet de recherche

L'objectif de ce travail de recherches est d'étudier à l'aide d'un code de calcul à base d'éléments finis, le comportement d'une poutre en béton armé, renforcée à l'effort tranchant par des matériaux composites de type PRF (Polymère Renforcé de Fibres). L'interrogation concernant la fiabilité d'un renforcement interne des poutres avec des cadres en PRF s'avère être d'actualité puisque la plupart des travaux réalisés sur les poutres concernent le collage externe de PRF. Afin de tenter de répondre à cette interrogation, un travail scindé en trois grandes parties a été élaboré.

Présentation du mémoire

Tout d'abord, une revue bibliographique a été réalisée pour évaluer les procédures expérimentales et analytiques antérieures relatives aux composants en béton armé.

Ensuite, un modèle d'étalonnage utilisant un logiciel de modélisation et d'analyse par éléments finis a été mis en place et évalué. En effet, une poutre en béton armé avec un renforcement en cisaillement a été analysée jusqu'à la rupture et comparée aux résultats de la poutre numérique de référence pour calibrer les paramètres dans ABAQUS pour des analyses ultérieures.

Le mémoire est divisé en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre consiste en une recherche bibliographique sur les modèles existants pour prévoir les lois de comportement et les charges de ruine des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites.
- Le chapitre 2 présente le programme de modélisation numérique par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel ABAQUS.

Ce chapitre comporte dans sa première partie la modélisation d'une poutre de référence en béton armé non renforcée. Elle ne comporte que des aciers et sera soumise à un chargement de type flexion quatre points. Plusieurs modes de rupture peuvent ainsi être décrits. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons procéder à une prospection numérique portant sur des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites PRF.

- Le chapitre 3 de nature académique résume l'ensemble de notre travail. Nous y présenterons dans un premier temps les résultats du modèle numérique de référence.

Ensuite nous essayerons de faire une étude comparative entre ces résultats et les différents modèles renforcés. Nous terminerons cette partie par une discussion.

Le choix des différentes caractéristiques mécaniques et géométriques est fait de façon académique dans le but de produire les mécanismes de ruine appropriés.

Enfin, une conclusion de la présente étude et des recommandations pour des travaux futurs sont présentés à la fin du mémoire.

Chapitre I

Synthèse bibliographique (état
de l'art) sur le
renforcement des poutres en
béton armé

I.1 Introduction

Notre travail consiste à présenter une revue bibliographique sur le renforcement des poutres en béton armé. Fournir une revue détaillée de l'ensemble de la littérature relative au béton armé et au béton précontraint serait trop vaste pour être traité dans ce projet de fin d'étude.

Le renforcement et la réparation des ouvrages d'art et des bâtiments est une pratique qui est actuellement en plein développement et pourrait représenter un marché potentiellement important dans le futur. Même si le dimensionnement des structures est établi pour une durée de vie de 100 ans, certains aléas naturels ou accidents réduisent cette période. Par ailleurs, l'évolution des règlements de dimensionnement ainsi que la modification de l'utilisation ou des charges à considérer, entraînent également un besoin de renforcement.

Différentes techniques de réhabilitation (réparation ou renforcement) ont déjà été mise au point. Nous pouvons, à cet effet, citer la reprise du béton dégradé, le béton projeté, la précontrainte additionnelle, ou encore le collage d'un matériau résistant (plat métallique ou composite) à la surface de la structure. L'une des premières méthodes utilisées pour la réparation des ponts est le collage des tôles en acier, cette méthode est connue sous le nom de procédé Hermite.

Il est possible de classer les éléments constitutifs d'une structure en béton armé pouvant être renforcés par collage de membrane en matériaux composites en deux catégories : les éléments verticaux (poteaux, voiles) et les éléments horizontaux (poutres, dalles). Dans une poutre en béton armé, les aciers longitudinaux inférieurs reprennent les efforts de traction. Le béton et les aciers longitudinaux supérieurs reprennent les efforts de compression. Les armatures transversales reprennent l'effort tranchant et empêchent les ruptures dans le béton sous un cisaillement excessif. Le renfort de la poutre se fait de deux façons : soit par collage de plaque en matériaux composites sur la fibre tendue engendrant ainsi une augmentation du moment maximal supporté, soit par renfort avec des bandes collées sur les faces latérales de la poutre, ce qui a pour effet d'augmenter l'effort tranchant maximal supporté.

Les types de renforcement des structures en béton armé sont classés en trois catégories :

- Renforcement en flexion
- Renforcement en cisaillement
- Renforcement en compression (par confinement).

I.2 Matériaux de renfort

I.2.1 Textile

Les renforts textiles doivent présenter de propriétés mécaniques, géométriques et physicochimiques compatibles avec le type de matrice utilisé dans le but de permettre leur

mise en œuvre et leur imprégnation de sorte à optimiser l'interaction textile-mortier. Grâce aux nombreux procédés et technologies de production, les textiles offrent la possibilité de création de motifs adaptés aux performances visées.

À l'échelle microscopique, la fibre ou le filament constitue la plus petite unité, contenue par le renfort textile (de 5 à 30 μm de diamètre). Ces filaments sont joints les uns aux autres par une opération d'ensimage et parfois de retordage pour former des fils. Le poids linéaire d'un fil, exprimé en Tex (gramme par mètre), dépend de la nature et du diamètre moyen de filaments, du nombre de filaments par fil ainsi que de la nature et du volume de l'ensimage. Par le biais de différentes technologies telles que le tricotage, le tissage, le tressage ou le collage, ces fils servent à la confection d'armatures textiles, à l'échelle macroscopique suffisamment résistantes pour les considérer dans le cadre d'applications structurelles.

I.2.2 Fibres

De façon générale, les fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. Afin d'assurer un effet de renforcement durable, le matériau de fibre doit résister au milieu alcalin sans toutefois perdre ses propriétés, avoir une relaxation sous charges permanentes, avoir une bonne et constante adhésion entre le renfort et le mortier ainsi qu'une facilité de mise en œuvre. L'utilisation des fibres de verres, ou quelques fois de carbone, d'aramide, de basalte et d'acier inoxydable pour la fabrication des renforcements textiles satisfait ces exigences.

I.2.2.1 Fibres de verre

Les fibres de verre sont des fibres chimiques, inorganiques, obtenues par le mélange de la silice, de l'argile et du calcaire mené à une température entre 1250°C et 1350°C. Elles sont fabriquées spécifiquement pour le renforcement du béton en ciment standard. Pour résister à la corrosion du milieu alcalin dans le béton, le verre contient plus de 15% (en poids) de zircon. La ténacité du verre peut atteindre 1400 N/mm², l'allongement élastique linéaire est de 2% avec un module d'élasticité compris entre 70 et 80 kN/mm². La masse volumique qui est de 2.8 kg/dm³ est relativement plus grande que celle du carbone ou de l'aramide. Le verre présente une bonne adhésion au béton et un bon ratio coût-performance.

[Pernell, 1998] a montré une perte de résistance des fibres de verre dans une matrice cimentaire en fonction du temps. Cette perte de résistance d'environ 30% est constatée pendant une durée de vie de conception de 50 ans. En effet, dans le milieu alcalin, le procédé d'hydratation de la matrice provoque la corrosion des fibres qui produit des petits défauts ou des zones de faibles sections causant ainsi la sensibilité des fibres à la concentration de contrainte : c'est la raison principale de la perte de résistance des fibres.

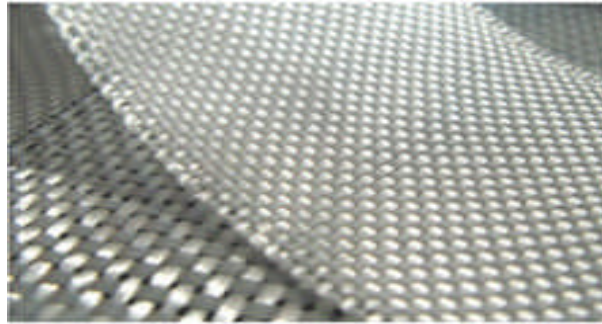


Figure I.1 Tissu à base de fibre de verre

I.2.2.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont des fibres chimiques qui peuvent être fabriquées par deux méthodes : la première est basée sur la pyrolyse de polyacrylonitrile (PAN) alors que la seconde est basée sur le produit de pétrole. La teneur en eau doit être supérieure à 90% dans les deux cas. C'est la première méthode qui est couramment utilisée dans le renforcement. Une résine de polymère organique est alors formée par le procédé de polymérisation. Les molécules de ces polymères sont de longues chaînes qui sont assemblées afin de produire une fibre.

Comparativement aux fibres de verre, les fibres de carbone présentent une bonne résistance à la fatigue, une capacité significative à amortir les vibrations, une faible dilation et conductivité thermiques, une bonne conductivité électrique et une faible absorption de rayon X. Elles présentent aussi une haute résistance aux solvants d'acides.

En dépit de toutes ces qualités, il convient de souligner que leur adhésion au béton n'est pas aussi bonne que celle des fibres de verre. Leur prix est également élevé du fait de leur excellente conductivité électrique obligeant l'utilisateur à prendre des précautions coûteuses en termes d'isolation électrique mises en œuvre sur les machines de fabrication.

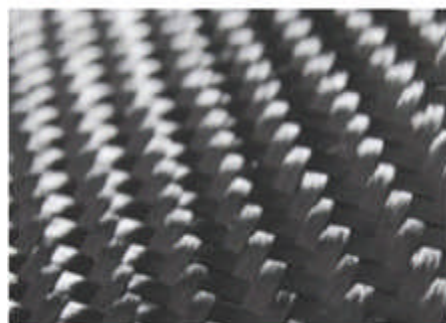


Figure I.2 : Tissu à base de fibres de carbone

I.2.2.3 Fibres de basalte

Les fibres de basalte sont d'origine minérale et sont extraites de la roche volcanique issue d'un magma refroidi rapidement au contact de l'eau ou de l'air. Leur fabrication est assez

similaire à celle des fibres de verre. La roche, fondue à 1400°C est extrudée pour produire les filaments de fibre de basalte. Même si elles sont dépourvues d'additifs, les fibres de basalte présentent de meilleures propriétés mécaniques que les fibres de verre et résistent au feu à une température importante (820°C). La durabilité des fibres de basalte est comparée à celle des fibres de verre parce qu'elles possèdent une composition chimique presque similaire. Les études de [Van de Velde, 2003] ont montré que les fibres de basalte, dans une matrice saturée d'hydroxyde de calcium, présentent une résistance aux alcalins qui est supérieure à celles des fibres de verre dans la même condition.

Elles possèdent une bonne mouillabilité et n'absorbent pas d'humidité. Cette caractéristique est très importante car elle facilite la mise en œuvre du textile au sein du mortier limitant ainsi l'absorption d'eau du mortier. Ces fibres présentent aussi une bonne résistance aux produits chimiques (acides forts, acides basiques, solvants) même s'il faut reconnaître que le basalte est instable en milieu alcalin. Pour cela, il est nécessaire d'envisager un traitement spécifique afin de pouvoir les utiliser au sein d'un renfort textile dans les composites TRC ou les utiliser avec une matrice au PH neutre.

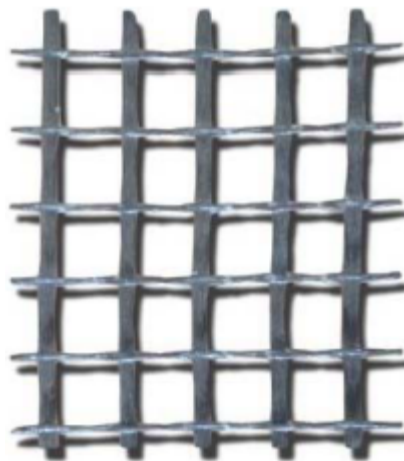


Figure I.3 : Tissu à base de fibres de basalte

I.2.2.4 Fibres d'aramide

L'aramide est produite par la réaction entre le paraphénylènediamine et le chlorure de téréphtaloyle dans un solvant organique. Ce polymère est extrudé dans une filière et filé. Les filaments sont refroidis à l'air puis séchés et embobinés.

Les fibres d'aramide présentent une densité plus faible et une résistance au cisaillement et aux impacts plus élevée par rapport aux fibres de carbone et de verre. Cependant elles ont une dilatation thermique longitudinale négative. Si la dilatation thermique entre le matériau de renforcement et le béton est différente, les tractions augmentent dans la zone d'adhésion de tous les composants. À cela s'ajoute le fait qu'elles présentent une faible résistance en milieu

alcalin. C'est pour ces différentes raisons que leur utilisation est très rare dans le renforcement des structures en béton armé.



Figure I.4 : Tissu à base de fibres d'aramide

I.2.2.5 Fibres d'acier inoxydable

Les fibres d'acier inoxydable sont les aciers, les alliages de fer et de carbone auxquels lorsqu'on ajoute essentiellement du chrome au-delà de 10.5% en solution dans la matrice on obtient la résistance souhaitée à l'oxydation. D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et en particulier la ductilité qui est leur caractéristique principale. Elles présentent une bonne durabilité dans le mortier et offrent une excellente mouillabilité et pourraient s'associer avantageusement à une matrice cimentaire.

Tableau I.1 : Récapitulatif des résistances mécaniques des composites classiques [22].

Caractéristiques Matériau	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation à la rupture (%)
Verre PRF	480-1600	35-51	1.2-3.1
Basalte PRF	1035-1650	45-49	1.3-3.0
Aramide PRF	1720-2540	41-125	1.9-4.4
Carbone PRF	1720-3690	120-580	0.5-1.9

Comme nous pouvons le constater dans le tableau I.1 ci-dessus, ces fibres ont de très bonnes propriétés mécaniques et sont développées et commercialisées dans plusieurs domaines dont le génie civil. Lorsqu'elles sont employées dans la construction, elles assurent très bien la fonction de l'acier et permettent ainsi de renforcer les structures qui nécessitent l'entretien. Ce renforcement apporte à ces dernières de fortes performances et un pouvoir anti corrosion sans influencer sur leur dimensionnement. Leur efficacité n'est plus à remettre en cause de nos jours car elle a été étudiée et approuvée par de nombreuses recherches scientifiques.

I.2.3 Les fibres naturelles : avantages et inconvénients

Les fibres naturelles sont très nombreuses, mais n'ont malheureusement pas toutes les caractéristiques mécaniques pouvant leur permettre de jouer le rôle de renfort des matériaux composites. En dehors du bois et de ses dérivés, elles sont des coproduits et proviennent d'un processus de transformation. Plusieurs facteurs sont pris en considération si l'on veut obtenir des fibres naturelles avec de très bonnes propriétés mécaniques : l'âge de la plante, la saison, la quantité d'eau, la zone de plantation. Le tableau I.2 ci-après résume les fibres naturelles susceptibles d'être utilisées dans le renforcement des structures.

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles [22].

Caractéristiques Types de fibre	Densité (g/cm ³)	Module de Young (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module spécifique (E/1000ρ)	Allongemen t à la rupture (%)
Lin	1.53	58 ± 15	1339 ± 486	38	3.27 ± 0.4
Chanvre	1.52	70	920	46	1.7
Jute	1.52	60	860	39	2
KénaF	1.93	14-38	240-600	12-32	-
Ortie	-	87 ± 28	1594-640	-	2.11 ± 0.81

Avantages des fibres naturelles:

- Elles sont biodégradables du fait que ses constituants proviennent de l'environnement naturel (consommant six fois moins d'énergie que les fibres de verre et douze fois moins que les fibres de carbone);
- Elles sont moins chères sur le marché (neuf fois moins chères que les fibres de verre et cinq fois de moins que les fibres de carbone) ;
- Elles assurent une bonne isolation thermique ;
- Leurs masses volumiques peuvent être divisées par deux.

Les désavantages des fibres naturelles sont moins notables. Les fibres issues de ces matériaux composites sont tout à fait naturelles, cela peut avoir des conséquences sur la durabilité et aussi sur la constance des caractéristiques mécaniques.

I.2.4 Fabrication de textile de renforcement

Les technologies de textile peuvent être divisées en deux familles : bidimensionnelle et tridimensionnelle. Les renforts textiles bidimensionnels permettent uniquement de reprendre les efforts dans les deux directions du plan. Les préformes bidirectionnelles incluent les tridimensionnelles qui sont, en fait, des préformes bidirectionnelles dans lesquelles l'ensemble des fils, à l'exception des fils nécessaires au maintien du textile, sont orientés dans la même direction. Les composites constitués de renforts bidirectionnels se composent d'un empilement de textiles bidirectionnels (de plis) indépendants les uns des autres. Les efforts hors plan sont ainsi exclusivement repris par la matrice limitant la résistance du composite perpendiculairement à son plan, et le rend dès lors très sensible au délaminage. C'est dans le désir d'éviter ce mode de rupture que les textiles tridimensionnels ont été mis au point. En effet, les préformes tridimensionnelles permettent d'assurer un transfert de charge selon les trois directions de l'espace. La mise en œuvre se fait en positionnant juste un pli unique de textile et permet un gain de temps conséquent. Enfin, les textiles tridimensionnels permettent d'assurer un positionnement plus précis des fils dans l'épaisseur du composite.

Les principales technologies de textiles utilisées comme armatures dans les composites textile-mortier sont le tricotage à maille jetée, le canevas, le tricotage à maille jetée en 3 dimensions, le tissage, le tressage et le collage.

- Tricotage à maille jetée

Le tricot est constitué de boucles, appelées mailles, passées les unes dans les autres, figure I.5. Il existe deux procédés de tricotage : le tricotage trame et le tricotage chaîne (aussi appelé tricotage à maille jetée). Les tricotages trames résultent d'un travail d'entrelacement à partir d'un seul fil et sont donc totalement détricotables. Les textiles ainsi générés ne semblent donc pas destinés à reprendre les efforts importants. Pour constituer des renforts tricotés performants, l'astuce consiste à superposer des nappes de fils (présentant une bonne résistance mécanique) et de les assembler par un tricotage à maille jetée. Le tricotage est alors réalisé par des fils de très faible diamètre, appelés chaînettes, n'ayant aucun rôle dans la résistance du textile en tant que renfort. Par contre ils assurent la stabilité géométrique des fils de gros diamètre. Ces derniers vont à leur tour assurer la reprise des efforts.

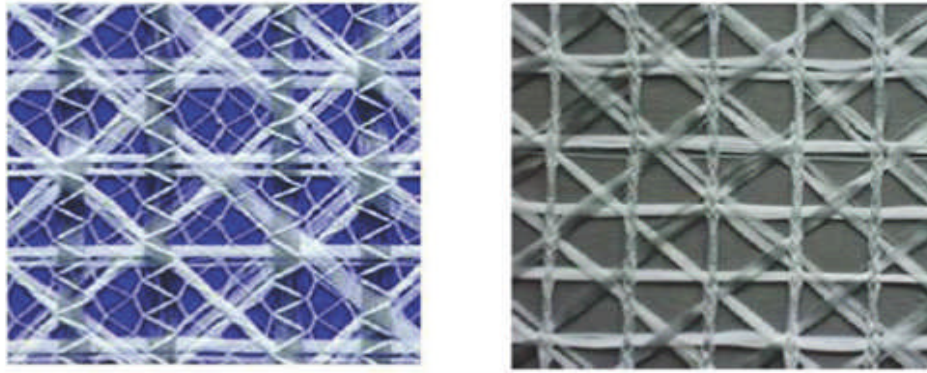


Figure I.5 : Exemples de tricotage à maille jetée multiaxial

- **Canevas**

Ce sont des textiles qui sont obtenus, en maintenant par l'intermédiaire d'un tricotage (fil de chaînette), une superposition de nappes de fils de section importante, parallèles les unes aux autres (fils de reprise d'effort) comme indiqué sur la figure I.6, selon un, deux ou plusieurs directions (respectivement nommées canevas unidirectionnel, bidirectionnel et multidirectionnel) assurant la reprise des efforts. Les différentes couches de fils de reprise d'efforts sont maintenues par un tricot en maille jetée dont les mailles sont indépendantes de celles des fils de reprise d'efforts.

Les canevas multiaxiaux offrent un vaste champ d'application. En effet, le fait que les mailles de fils de chaînette et de reprise d'efforts ne soient pas liées, offre la liberté sur le choix de l'angle entre les différentes couches de fils parallèles et l'espacement entre les fils de chaque couche. En revanche cette indépendance est susceptible d'endommager significativement les fils de reprise d'effort. C'est probablement la raison qui explique le faible emploi de ce type de textile dans le renforcement avec PRF.



Figure I.6 : Exemple d'un canevas

- Grille à maille jetée à trois dimensions

Des grilles à maille jetée sont liées parallèlement l'une sur l'autre selon un espacement prédéfini par des fils de faible section mais possédant tout de même une rigidité importante à la flexion ; ce qui permet d'assurer l'espace souhaité entre les grilles. Les textiles destinés au renforcement TRC sont généralement espacés de 15 à 100 mm. Le principal inconvénient des textiles tricotés à maille jetée à trois dimensions est qu'ils sont spécifiques : ils sont en effet adaptés uniquement à la production de composites TRC mis en œuvre par injection.

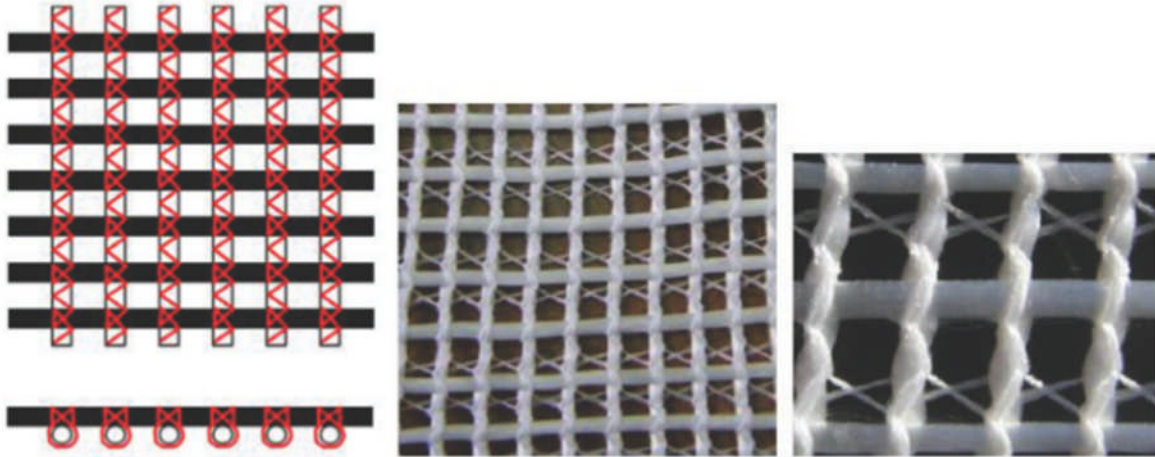


Figure I.7 : Grille à maille jetée à trois dimensions

- Tissage

Un tissu est un textile fabriqué par entremêlements bidirectionnels (généralement de manière orthogonale) des rangées de fils : une direction de chaîne et une direction de trame. Les fils de trame passent tantôt au dessus, tantôt en dessous des fils de chaîne de façon à créer des entremêlements périodiques. Il existe trois schémas (figure I.8) caractéristiques du maillage du tissu : taffetas, serge et satin. Le taffetas est le tissu qui présente la meilleure stabilité géométrique.

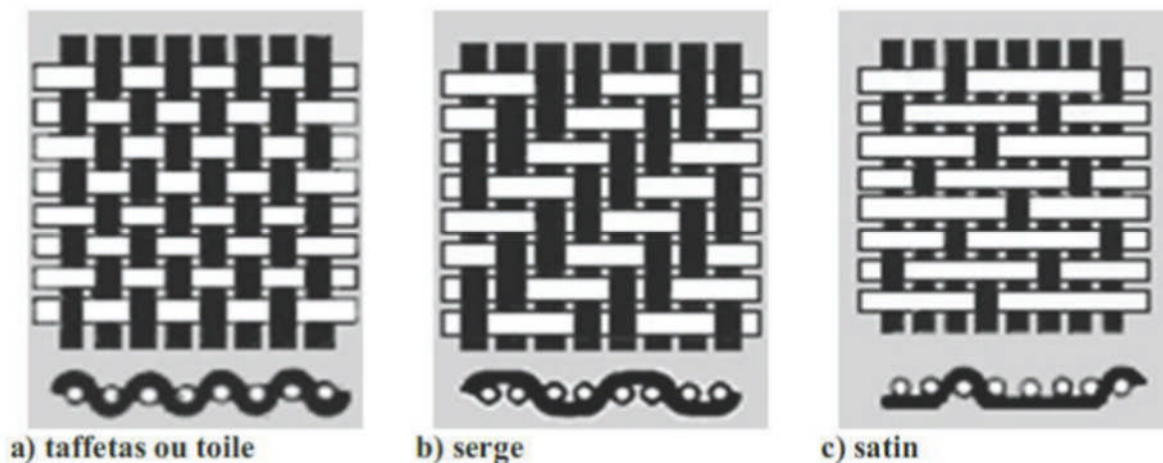


Figure I.8: Différentes caractéristiques de maillage du tissu

Pour mieux perfectionner l'imprégnation des fils et diminuer le risque de rupture par délaminage, les textiles de renforcement des TRC doivent être aérés. Hors l'espace qui se trouve entre ces tissus compromet considérablement leur stabilité géométrique allant jusqu'à provoquer une faible stabilité géométrique.

- Tressage

Les textiles tressés sont fabriqués par un entrelacement mutuel des fils sous une forme tubulaire. Ils sont fabriqués à partir d'au moins deux types de mèches qui parcourent chacune une trajectoire qui n'est pas forcément droite tout en créant une trajectoire privilégiée en renfort. Le tressage est réalisé par entrelacement de plusieurs mèches entre elles. Il s'effectue par un simple moyen technique de changement de position des porteurs de bobines de chaque type de mèche. Le processus de fabrication est moins rapide. Les textiles tressés triaxiaux sont plus rapides que les bi-axiaux et sont constitués de trois directions de mèche dont une unidirectionnelle dirigée en sens chaîne ou en sens trame. Les deux autres s'entrelacent sur les unidirectionnels selon deux directions principalement symétriques, inclinées par rapport aux directions principales du plan. Les trois mèches forment une architecture hexagonale.

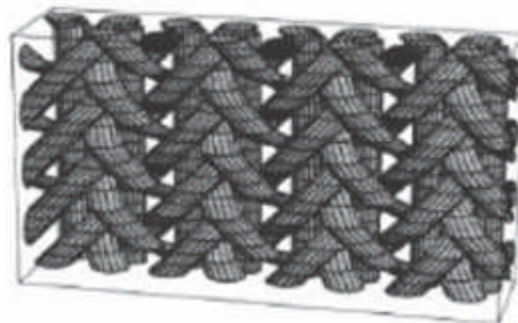


Figure I.9 : Exemple de tressage 2D, tressé circulaire

- Collage

Cette technique consiste à coller les fils entre eux à l'aide d'un liant polymère ou par un procédé thermique pour finalement trouver un textile géométriquement stable. En superposant puis en collant deux séries de fils parallèles, il est ainsi possible d'obtenir un textile sans passer par le tricotage, le tissage ou le tressage (figure I.10 ci-après). Le procédé de collage le plus utilisé consiste à pré imprégner le textile par une solution polymère afin de lier les filaments et les fils entre eux (en augmentant considérablement l'adhérence due au polymère entre les filaments).

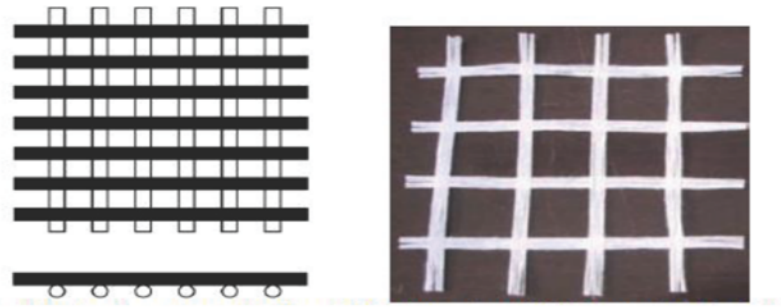


Figure I.10: Illustration d'un textile collé sans passer par le tricotage, le tissage ou le tressage

I.2.5 Durabilité du renfort : effet de l'environnement, de la fatigue et du fluage

Les études des effets de l'environnement sur les renforts composites utilisés en génie civil sont nombreuses et variées. Les Polymères Renforcés de Fibres (PRF) ont notamment été au centre de plusieurs recherches.

L'utilisation des PRF pour le renforcement des structures se trouvant dans les régions présentant des basses températures hivernales pose de sérieux problèmes en raison du cycle gel-dégel. Une campagne d'essai réalisée à l'Université de Sherbrooke par [M. Green en 1998] sur des poutres renforcées à l'aide de matériaux composites a permis de constater que les poutres sont soumises à 300 cycles de gel-dégel (-18°C à 15°C). L'ensemble des résultats montre que l'interface béton-composite n'est pas affectée par les cycles de gel-dégel. D'autre part, des essais réalisés sur des cylindres renforcés par un composite carbone époxy montrent qu'une chute de 18% des caractéristiques mécaniques est observée. Le gel semble peu affecter les structures renforcées.

Il convient également de mettre en lumière les essais réalisés par [Karbahari, 1997]. Cette expérience a permis de comprendre que l'action physico-chimique a une influence non négligeable sur une poutre renforcée. Pour étudier le comportement à long terme du carbone époxy, [Beaudoin et al] ont réalisé des cycles d'exposition de séchage-mouillage de poutres en béton armée renforcées. Cette étude met en évidence le fait que la chute de propriétés mécaniques du joint de colle peut avoir pour conséquence une perte d'effort non négligeable dans le composite.

D'autres auteurs ont mis l'accent sur le phénomène de fatigue dans le cas des poutres renforcées ou réparées. C'est notamment l'exemple de [Clément, 2000] qui a conduit une expérimentation sur quelques centaines de cycles sur des poutres renforcées à l'aide de matériaux composites. Il est arrivé à la conclusion selon laquelle la poutre varie entre 60% et 90% de la charge de ruine. Il est constaté que la flèche augmente au cours du chargement

cyclique. [Emmanuel Ferrier, 1999], quant à lui, a mis l'accent sur le fait que les lois de comportement en fatigue sont directement dépendantes de la nature des propriétés des durcisseurs, de la température et des conditions de transformations des polymères.

Enfin, en ce qui concerne le fluage, les essais de fluage thermo-stimulé de Ferrier en 1999 qui s'est appuyé sur le principe de superposition temps-température et les essais de fluage longue durée ont permis de conclure que pour garantir une durabilité de la réparation, la température de transition vitreuse minimale du polymère qui permet de limiter ce phénomène dans l'interface est de l'ordre de 50°C.

I.2.6 Matrice cimentaire

La matrice est la phase continue qui assure la cohésion, le transfert et la répartition des contraintes. Elle assure la protection des ouvrages renforcés face aux agressions extérieures et commande leur mise en place. Les matrices utilisées dans la fabrication des composites peuvent être minérales ou organiques. À titre de précision, 99% des matrices utilisées de nos jours sont organiques. La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxy, etc.) et de charges dont leur but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production. L'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène du point de vue mécanique.

- **Les résines**

On distingue deux grandes familles des résines :

- Les résines thermodurcissables : le durcissement est définitif lors du cycle de polymérisation, le processus de transformation est irréversible. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la composition des matériaux composites sont : les résines polyesters non saturées (les plus utilisées dans les composites de grande application) et les époxydes.
- Les résines thermoplastiques : le polymère est mis en forme par chauffage et le processus de transformation est réversible. Elles sont donc récupérables par recyclage. Les plus utilisées sont : polyamide, poly téréphtalate éthylénique et butylique, polycarbonate, polypropylène, etc.

- **Les charges et additifs**

Ce sont des substances organiques, minérales ou végétales qu'on ajoute à la résine pour améliorer certaines propriétés et réduire le coût du matériau.

- Les charges : On distingue des charges organiques, des charges minérales et les charges oxydes hydrates et métalliques.
- Les additifs : lubrifiants, pigments et colorants, anti retrait et fluage, anti ultraviolet.

I.3 Définition et présentation du matériau composite PRF

Un polymère renforcé de fibre est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continues ou discontinues. Les matrices utilisées pour le renforcement sont d'origine pétrolière : résines polyester thermodurcissables, résines époxydes, résines vinylester, résines thermoplastiques, etc.

I.3.1 Comportement d'une poutre en béton armé renforcée par composite FRP (Fibre Reinforced Polymer)

En règle générale, le renforcement se fait par des bandes de tissus unidirectionnelles pour les poutres, bidirectionnelles pour les dalles. Dans le cas de sollicitations complexes, les bandes bidirectionnelles sont aussi utilisées au niveau des voiles et des poteaux.

Peu d'études traitent du renforcement de poutre en béton armé par le matériau composite TRC. Pour autant, il semble utile de s'appuyer sur la littérature relative au renforcement par le composite FRP pour dresser un panorama, même s'il ne peut être transporté à l'identique aux TRC.

I.3.1.1 Comportement global

Le comportement global d'une poutre en béton armé renforcée par collage de matériau composite FRP est représenté schématiquement sur la figure I.11 ci-dessous et comporte trois phases principales :

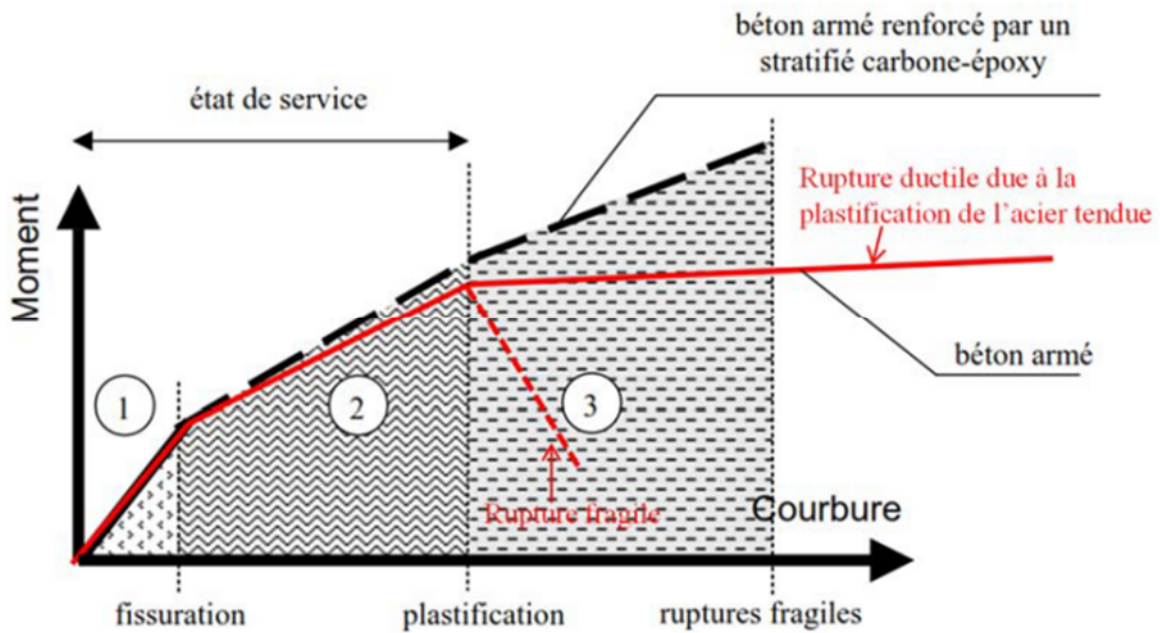


Figure I.11: Phases du comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par composite

- La première phase linéaire élastique correspond au comportement des poutres non fissurées ;
- La deuxième phase linéaire correspond au comportement de service des poutres fissurées. L'effet du renfort composite amène une légère rigidification. Le composite permet de retarder de façon conséquente l'apparition de la première fissure et limite la propagation verticale des fissures ;
- La troisième phase correspond au comportement après plastification des aciers tendus. À l'inverse de la poutre en béton armé non renforcée qui a une rigidité dans cette phase presque nulle, la poutre renforcée par composite continue à reprendre des efforts supplémentaires avec une rigidité proportionnelle au nombre de couches de renfort utilisé. Le composite permet d'augmenter la résistance ultime des poutres, de diminuer la flèche des structures et de réduire l'ouverture des fissures. On remarque également la modification du mode de rupture de la poutre par le composite.

1.3.1.2 Configurations courantes du renforcement d'une poutre en béton armé

Le renforcement d'une poutre en béton armé par collage extérieur de matériaux composites se fait sur la face tendue pour des poutres nécessitant un renforcement vis-à-vis du moment fléchissant ou sur la face latérale pour les poutres à renforcer vis-à-vis de l'effort tranchant. La

configuration du renforcement au moment fléchissant qui n'entre pas dans le cadre de ce travail ne sera pas détaillée. Seule la configuration du renforcement à l'effort tranchant sera étudiée.

- **Configuration du renforcement à l'effort tranchant**

Le composite de renforcement est disposé sur les flancs de la poutre (surfaces latérales) ou incliné de 45° à l'axe longitudinal de la poutre par bandes continues ou par plusieurs bandes. Le renfort, pour des bandes continues, est constitué par de tissus multidirectionnels contrairement aux bandes discontinues qui sont renforcées par de tissus unidirectionnels.

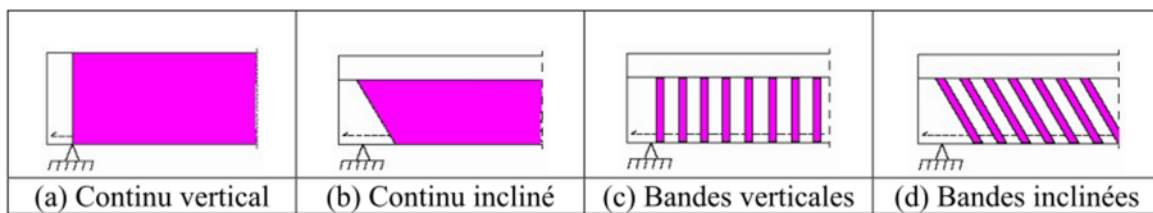


Figure I.12 : Configuration latérale du renforcement à l'effort tranchant

Cette configuration latérale du composite précédemment décrite peut être appliquée selon les quatre configurations transversales décrites sur la figure I.13. Le renforcement des faces latérales est plus économique en matériau, cependant il arrive d'avoir une rupture par décollement du composite : sa contribution à l'effort tranchant est réduite. Le renforcement en « U » constitue une solution pour palier ce point faible en augmentant la résistance ultime de la poutre. En fonction de la section de la poutre, deux solutions différentes peuvent être envisagées afin de permettre d'améliorer le scellement du composite en partie supérieure de la poutre : le renforcement confiné ou l'utilisation d'ancrage mécanique.

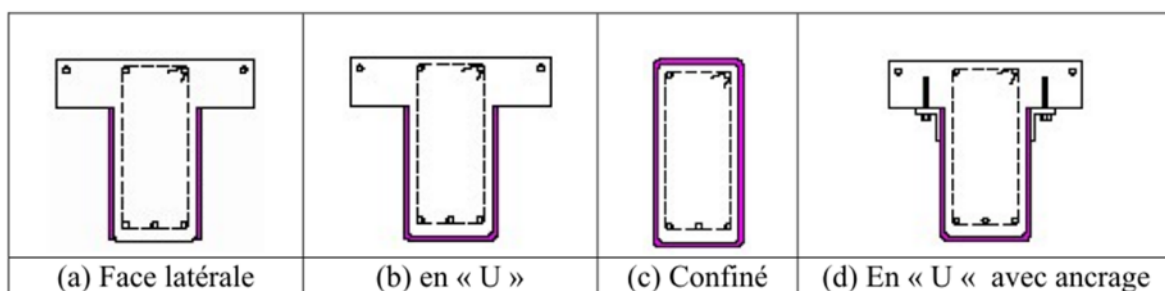


Figure I.13 : Configuration transversale du renforcement à l'effort tranchant

- **Renforcement en cisaillement**

Les ruptures dues au cisaillement sont fréquentes dans les structures en béton armé lorsque l'effort tranchant est très important. Sur le schéma ci-dessous (figure I.14), on remarque que

les parties vulnérables sont la zone de la poutre à côté de l'appui et la zone de la dalle à côté du poteau.



Figure I.14 : Rupture en cisaillement d'une poutre



Figure I.15 : Rupture en cisaillement d'un mur (séisme de Turquie, mai 2003)

L'angle de renforcement est compris entre 23° et 45° selon la géométrie et la charge appliquée sur la structure. Les tissus unidirectionnels sont utilisés dans ce cas et sont disposés perpendiculairement à l'axe principal de la structure. Pour mieux augmenter l'efficacité du renforcement sur l'ouvrage, on les dispose également de façon perpendiculaire à l'angle des fissures.



Figure I.16 : Renforcement en cisaillement d'une poutre

Le renforcement en cisaillement d'une poutre est une technique fiable de nos jours car elle a été validée par plusieurs recherches. Selon la géométrie de la structure renforcée, la présence du renforcement interne et la technique de liaison entre le composite et le béton, l'augmentation de la charge, dans le cas des poutres, varie entre 10% et 200%.

1.3.2 Mécanisme de rupture à l'effort tranchant

La rupture due à l'effort tranchant devient visible lorsque la résistance en cisaillement des poutres renforcées est insuffisante. Les fissures inclinées apparaissent d'abord au niveau des extrémités du tissu longitudinal et se propagent vers le centre de la poutre (figure I.17). Ce phénomène est engendré par la concentration des contraintes provenant de la discontinuité du tissu. Ce mécanisme peut être approché par la rupture due à la contrainte principale oblique de la poutre en béton armé non renforcée.

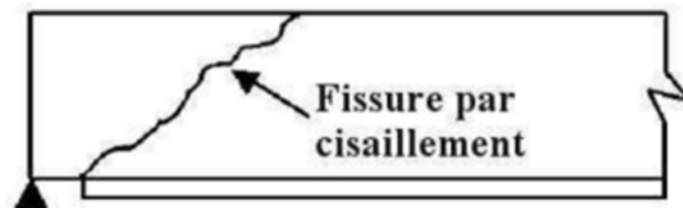


Figure I.17 : Poutre en béton armé réparée par collage de composite, endommagé par cisaillement (Croston [84]).

D'autres mécanismes de ruptures peuvent aussi être observés :

- La rupture par flexion (rupture du composite et écrasement du béton comprimé) ;

- La rupture due au décollement (rupture de l'enrobage en béton et décollement du composite).

I.4 Conclusion

La revue bibliographique a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation des composites pour le renforcement de structures en béton armé. Leurs performances en termes de résistance en traction et de déformation sont couplées à de faibles ouvertures de fissure. Les études recensées, bien que riches, restent insuffisantes dans la mesure où elles ne permettent pas de saisir finement l'ensemble des mécanismes. Elles ne clarifient pas non plus le mécanisme d'endommagement du composite de renforcement couplé ou découplé des autres mécanismes d'endommagement liés au béton armé.

Compte tenu du nombre de paramètres qui permettent de qualifier le comportement du composite, une étude paramétrique assez ambitieuse permettrait à la fois d'améliorer la compréhension du comportement des composites, et, d'autre part, d'optimiser ceux destinés à constituer un renfort extérieur « optimal » dans le cadre de renforcement de structures en béton armé.

À l'échelle de la structure, la littérature permet d'avoir une idée globale sur le comportement des poutres en béton armé renforcées par des composites. Elle permet également de mieux regrouper les différentes pathologies du béton et son processus de dégradation d'ordre mécanique et physique. En effet, dans le cas du renforcement par matériaux composites à base de polymère, les performances ultimes sont très significativement améliorées notamment la capacité portante. Dans le cas du renforcement par composite textile-mortier, la capacité portante est significativement accrue mais elle n'en demeure pas moins inférieure à celle obtenue via des composites à base polymère. Le faible corpus expérimental ne permet toutefois pas d'identifier clairement les mécanismes de rupture susceptibles d'éclairer les gains de déformation ultime généralement constatés comparativement aux composites à base de matrice polymère.

Les différentes études réalisées sur le renforcement, la réparation et le confinement des structures en béton armé sollicitées en cisaillement, par collage de matériau composite ont permis de comprendre que la capacité portante et la rigidité de la structure renforcée augmentent de manière significative. Ces mêmes études ont également révélé que ce type de renforcement présente quelques inconvénients notamment le décollement du composite et la rupture de l'enrobage en béton lors du renforcement à l'effort tranchant.

Cette analyse bibliographique va nous orienter vers la méthode de simulation et leurs applications dans le domaine du génie civil dans le but d'optimiser notre conception et d'évaluer les différents paramètres : c'est l'objet de notre deuxième chapitre.

Chapitre II

Présentation du logiciel
ABAQUS et simulation
numérique

II.1 Introduction

Dans cette étude, deux différents modèles ont été créés : une poutre en béton armé non renforcée considérée comme modèle numérique de référence et une poutre en béton armé renforcée, à l'effort tranchant, par des plaques composites. Les deux poutres seront soumises à la flexion quatre points.

La modélisation des éléments en béton renforcés par PRF est réalisée dans le code commercial d'analyse par éléments finis, Abaqus. Il a été conçu pour simuler des problèmes mécaniques. La conception de ces modèles permet de simuler correctement le comportement des matériaux tout en jouant sur certains paramètres tels que la géométrie et la rhéologie.

Le but de cette étude est de reproduire le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par matériaux composites PRF afin de connaître les différents paramètres influençant sur la capacité de résistance en cisaillement. Le ferrailage adopté (fig. II.1) concorde bien avec l'objectif du travail. En effet, cette configuration donne une rupture en cisaillement à l'expérimental, puisque nous cherchons à renforcer la poutre à l'effort tranchant.

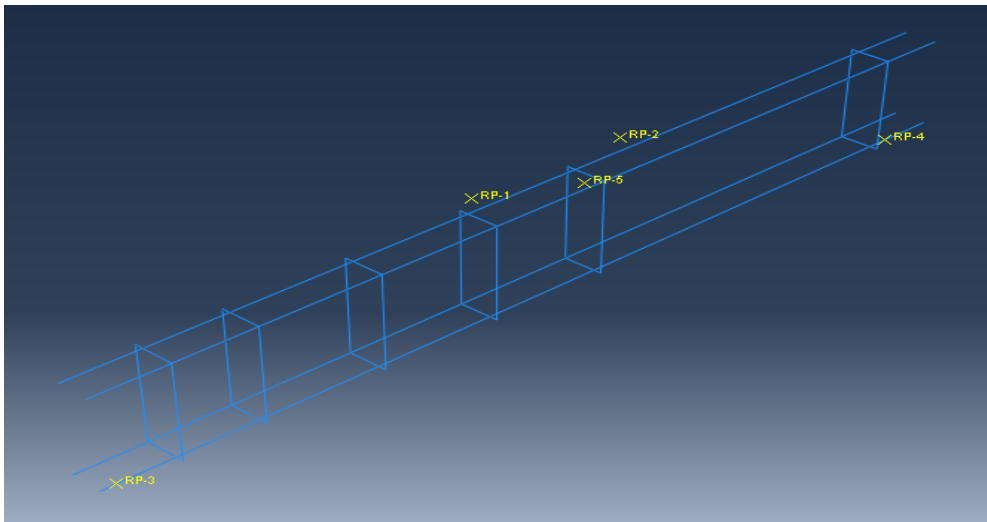


Figure II.1 : Ferrailage adopté pour la poutre

Quatre modèles de renforcement par composites PRF ont été adoptés pour cela. Le tableau II.1 ci-dessous présente les différentes variantes étudiées.

Tableaux II.1 : Récapitulatif des variantes testées

Modèle	Nombre de tours	Longueur de la bande (mm)	Largeur de la bande (mm)	Epaisseur de la bande (mm)
Modèle renforcé avec 3 bandes	1	150	20	3, 6 et 9
Modèle renforcé avec 5 bandes	1	150	20	3
Modèle renforcé avec 9 bandes	1	150	20 et 60	3
Modèle totalement renforcé	1	420	20	3

Tandis que les travaux expérimentaux sont dispendieux et nécessitent un temps de réalisation conséquent, la simulation numérique permet de se passer de ces problèmes tout en amenant un apport considérable en matière de productivité, de rendement et de performance. Le numérique est utilisé pour étudier et résoudre des problèmes structurels, thermiques et électroniques avec des aspects linéaires et non linéaires. La simulation virtuelle est basée sur la méthode des éléments finis et son grand handicap demeure la difficulté de reproduire et de créer un modèle qui s'apparente à ce qui existe sur le terrain.

La simulation numérique, doit prendre en compte le prétraitement, qui consiste à générer le fichier de données (contenant toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux et des chargements suivant une syntaxe particulière) et le post traitement qui, lui, permet d'exploiter les résultats dans un autre fichier. La simulation numérique est réalisée avec la version 6.14 du logiciel Abaqus.

II.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est appliquée dans le calcul des structures en génie civil avec des résultats fiables. Elle permet de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée suffisamment fiable. De manière générale, cette équation aux dérivées partielles porte sur une fonction d'approximation $u(x)$ définie sur un domaine $\Psi_n(x)$. Elle comporte des conditions aux limites permettant d'assurer l'existence et l'unicité d'une solution. Dans notre cas de figure, la poutre est encastree à ses deux extrémités.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie. On considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème. On définit ce domaine dans la MEF à

l'aide du maillage du domaine ; ce qui explique la nécessité d'approcher aussi la géométrie. Le maillage du domaine permet de définir un découpage dont les pavés sont les éléments finis (Fig. II.2). Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de la fonction de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, elle est définie de manière à être interpolatrice.

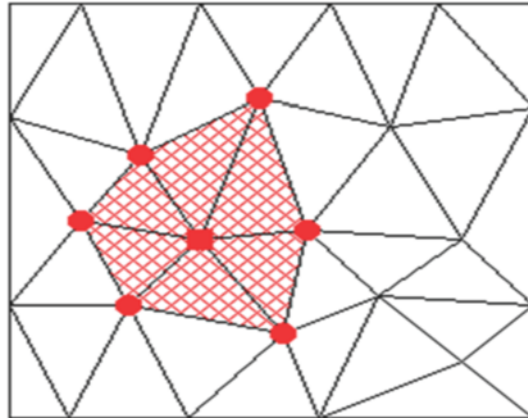


Figure II.2 : Discrétisation par éléments finis

II.3 Présentation du logiciel Abaqus

Pour réaliser la modélisation d'une structure par éléments finis, il existe plusieurs logiciels parmi lesquels on peut citer :

- ❖ ANSYS : Logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : traitement de géométrie, maillage, résolution, traitement de résultats et optimisation ;
- ❖ NASTRAN : Logiciel utilisant la méthode des éléments finis qui a été initialement développé par la NASA, à la fin des années 60 ;
- ❖ CATIA : Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée ;
- ❖ ABAQUS : Pour son historique, Abaqus a été développé en 1978 par Hibbit, Karlsson et Sorensen au début de la théorie des éléments finis. Il a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie. Il a été racheté par Dassault Systèmes en octobre 2005 et est devenu SIMULIA. Abaqus est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés. Il est connu et répandu pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

Un logiciel de modélisation idéal est celui qui permet de modéliser rapidement et facilement un problème, allant des éléments simples (poutres, poteaux, dalles en acier sur appuis

simples) aux plus complexes (structures ayant plusieurs matériaux avec un comportement du matériau linéaire et une interface complexe). Il est important pour l'utilisateur d'avoir une idée précise sur ce qu'il veut faire, surtout lorsqu'il s'agit de choisir le maillage et le type d'éléments devant être adaptés au problème posé : cette vigilance permettrait à l'utilisateur de mieux analyser les solutions approchées.

Le cœur du logiciel est appelé « moteur de calcul ». À partir d'un fichier de données (caractérisé par l'extension .inp) qui décrit l'ensemble du problème, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb. Il faut ensuite générer le fichier de données (prétraitement) et exploiter les résultats contenus dans un fichier .odb (post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques et les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc. Abaqus propose le module Abaqus/cae, interface graphique permettant de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation.

Ce logiciel travaille sans unités, il est donc recommandé de les prendre en compte tout au long du calcul.

Tableau II.2 : Tableau des unités

Quantity	SI
Length	<i>mm</i>
Force	<i>N</i>
Mass	<i>t (10³ Kg)</i>
Time	<i>s</i>
Stress	<i>MPa (N/mm²)</i>
Energy	<i>m.J (10⁻³J)</i>
Density	<i>t/mm³</i>

Le choix du logiciel Abaqus pour modéliser ce problème n'est pas fortuit car il répond parfaitement à l'attente et aux exigences : sa rapidité dans le prétraitement, la possibilité qu'il offre de diffuser des éléments surfaciques ou des barres d'armatures dans des éléments solides de béton ainsi que la disponibilité du sous-produit Abaqus/Explicit et le modèle d'endommagement plastique du béton, viennent fortifier ce choix. Il convient de noter qu'il est composé de trois sous-produits : Abaqus/standard, Abaqus/explicit et Abaqus/cae.

Le choix du sous-produit dépend du problème dynamique ou statique et de sa complexité. Abaqus/Explicit utilise la méthode explicite qui adapte le problème dynamique ou quasi

statique tandis que l'autre sous-produit, c'est-à-dire Abaqus/Standard utilise la méthode implicite qui adapte le problème statique.

II.3.1 Abaqus/Standard

Le principe consiste à résoudre l'équation d'équilibre à l'instant $t + \Delta t$ à partir de l'ensemble des données de l'état du système à l'instant t et de l'état du système à l'instant $t + \Delta t$ où $u_{t+\Delta t}$ est inconnue dans l'équation à résoudre :

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_{t+\Delta t} + \Delta t^2 \ddot{u}_{t+\Delta t} + \Delta t^3 \dddot{u}_{t+\Delta t} + \theta(\Delta t^4 \dots u_{t+\Delta t}) \quad (\text{II.1})$$

La valeur nodale $u_{t+\Delta t}$ est calculée à partir de la valeur u_t et de ses dérivées en $t + \Delta t$. Cette représentation est inconditionnellement stable : la convergence n'est pas soumise à des restrictions numériques mais peut être longue pour la résolution des problèmes compliqués. Ce code utilise la méthode de Newton pour la résolution des problèmes linéaires.

II.3.2 Abaqus/Explicit

Le principe consiste à résoudre l'équation d'équilibre pour un instant $t+\Delta t$ à partir des données à l'instant t . Cette démarche permet de déterminer les variables nodales $u_{t+\Delta t}$ en fonction de leurs valeurs en début d'incrément de temps u_t .

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \Delta t^2 \ddot{u}_t + \Delta t^3 \dddot{u}_t + \theta(\Delta t^4 \dots u_t) \quad (\text{II.2})$$

La solution à l'instant $t+\Delta t$ n'est fonction que des valeurs nodales et de ses dérivées à l'instant t comme l'indique le schéma suivant :

$$\begin{aligned} u_{t+\Delta t} &= u_t + \Delta t \dot{u}_t + \Delta t^2 \ddot{u}_t + \dots \\ \dot{u}_t &= f^1(u_t) \\ \ddot{u}_t &= f^2(u_t) \\ &\dots \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

Cette méthode de résolution ne peut pas avoir des incréments de temps trop importants sous peine de divergence des calculs. La convergence n'est assurée que si l'incrément de temps Δt est inférieur à un incrément critique Δt_c , c'est pourquoi on doit considérer la taille des incréments relativement petite.

En effet, la version explicite du logiciel Abaqus est entièrement vectorisée afin d'utiliser les supercalculateurs multiprocesseurs. Bien que l'analyse soit dynamique, elle peut être utilisée moyennant quelques précautions afin d'accomplir les analyses quasi statiques. Le schéma explicite implanté dans Abaqus conduit à des temps de calcul plus faibles comparativement au schéma implicite Abaqus/Standard. L'algorithme explicite assure une certaine robustesse ; il est plus efficace pour aboutir à un calcul complet. Ce code présente une bonne résolution des

contacts, ce qui constitue un intérêt supplémentaire pour le privilégier dans la simulation du procédé.

La procédure de calcul dans Abaqus/Explicit se fait en avançant explicitement dans le temps et en considérant le système comme dynamique. Le temps est considéré comme virtuel dans le cas d'un problème quasi statique ou réel dans le cas d'un problème dynamique. L'équation de Newton est réglée dans toutes les procédures de calcul :

$$M\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{F} - \mathbf{I} \quad (\text{II.4})$$

$\ddot{\mathbf{u}}$: Vecteur des accélérations nodales

M : matrice de masse nodale

F : vecteur des charges appliquées

I : vecteur des efforts internes

Ainsi, la procédure explicite ne requiert ni itération ni matrice tangente de rigidité. Elle intègre le temps en utilisant beaucoup de petits incréments de temps.

Le paramètre Θ a une influence sur les deux méthodes (explicite et implicite). Lorsqu'il est nul la méthode est explicite, par contre lorsqu'il vaut 1 elle devient implicite.

II.3.3 Abaqus/cae

Ce sous-produit constitue un environnement complet pour créer des modèles. Il permet ensuite de lancer les analyses et de traiter les résultats. La figure II.3 ci-dessous permet de voir clairement son contenu.

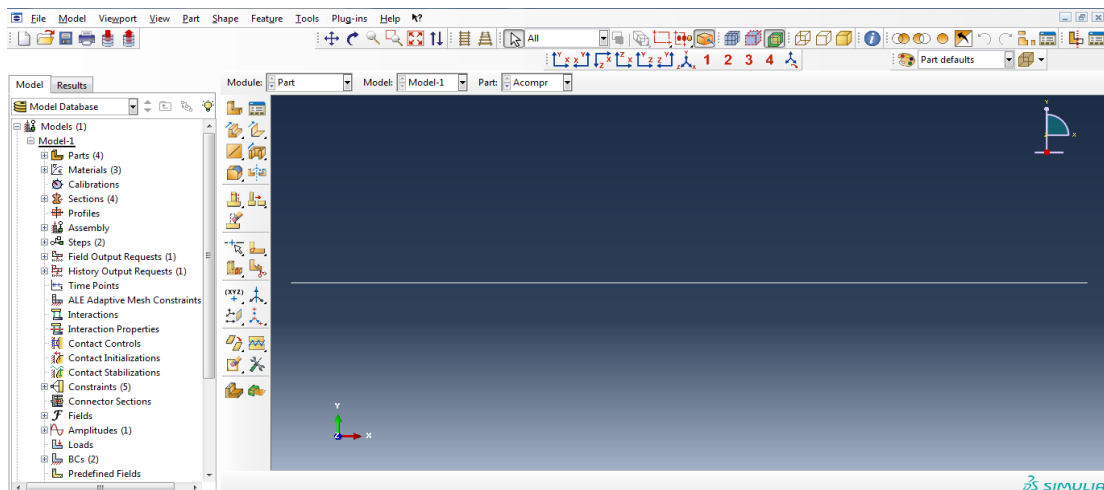


Figure II.3 : Interface Abaqus/CAE

Comme tout logiciel informatique capable de résoudre des équations mathématiques ou des problèmes de logique, Abaqus permet d'effectuer la résolution d'un problème décrit par un fichier d'entrée et dont il écrit la solution vers un autre fichier de sortie.

II.4 Modules d'Abaqus et étapes de modélisation

Le logiciel possède en tout neuf modules dont huit pour modéliser et introduire toutes les données nécessaires et le neuvième pour visualiser les résultats. Il s'agit des modules suivants :

- Module Part
- Module Property
- Module Assembly
- Module Step
- Module Interaction
- Module Load
- Module Mesh
- Module Job
- Module Visualization

II.4.1 Module Part

Ce premier module permet de créer des objets géométriques nécessaires au problème. Ces objets peuvent être soit dessinés dans Abaqus/CAE soit importés d'un logiciel de dessin. Le premier outil de ce module, « create part » (Fig.II.4), permet de créer des pièces en fonction de leurs caractéristiques. Pour cela l'utilisateur doit d'abord définir l'espace de modélisation qu'il soit en 3D, en 2D ou en axisymétrique. La seconde étape consiste à définir le type de pièce (sa déformabilité) autant que ses caractéristiques mécaniques : solide, coque, fil ou point. Lorsqu'on travaille en trois dimensions comme c'est le cas dans ce projet, on utilise extrusion pour la poutre et sweep pour les armatures.

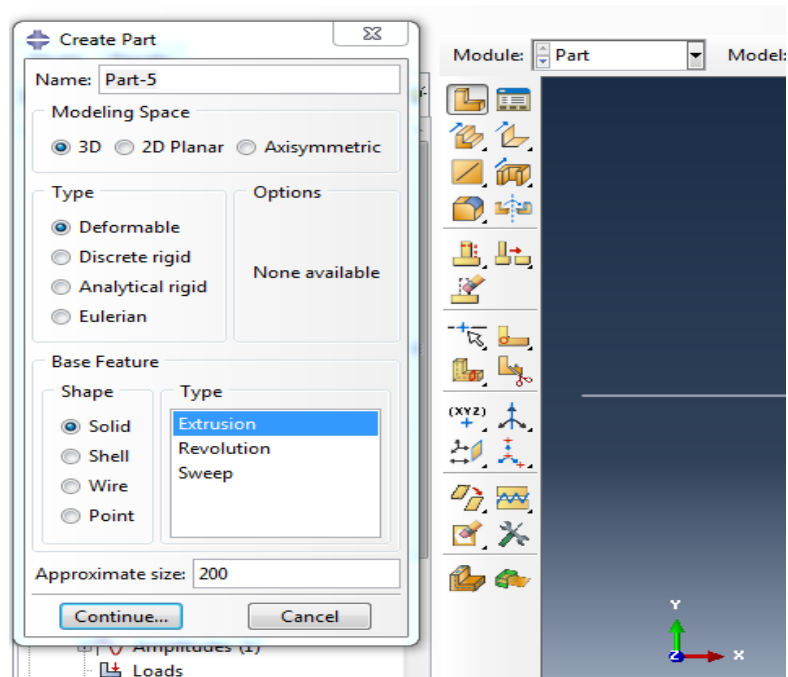



Figure II.4 : Module Part

II.4.2 Module Property

Sa fonction principale est de définir les propriétés de l'objet à modéliser. Le module permet aussi de créer des matériaux et des sections et de leur affecter des repères d'orientation et des types de profilés. La création des matériaux se fait avec l'outil « create material »  en définissant la loi de comportement du matériau de la pièce à modéliser tout en élaborant ses propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques. Le béton et l'acier sont les deux matériaux qui ont été définis dans ce travail.

II.4.2.1 Modèle pour le matériau béton

Nous distinguons trois modèles de comportement du béton dans le logiciel Abaqus :

- Brittle Cracking
- Concrete Smeared Cracking
- Concrete Damaged Plasticity

Pour parvenir à modéliser le comportement du béton élastoplastique dommageable il faut d'abord passer par la définition de sa densité. Le modèle « elastic » permet de définir son modèle élastique et d'introduire le module de Young et le coefficient de poisson. Le domaine plastique quant à lui sera défini en utilisant « Concrete Damaged Plasticity » (Fig.II.5).

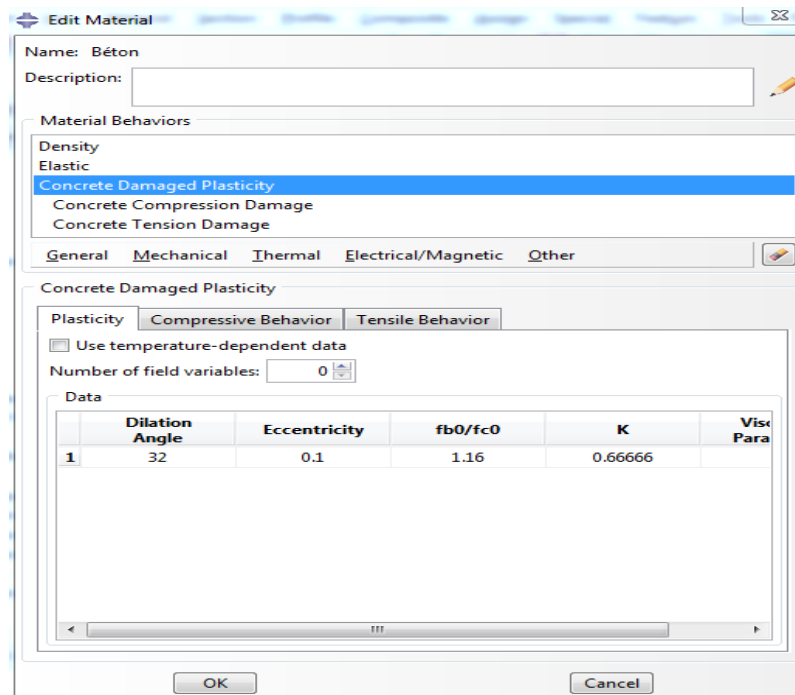


Figure II.5 : Modélisation du matériau béton

Présentation du modèle « Concrete Damaged Plasticity »

Ce modèle est basé sur la plasticité et l'endommagement du béton. Les deux principaux mécanismes de rupture connus par ce modèle sont la fissuration en traction et l'écrasement en compression. Il présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- L'utilisation des concepts d'élasticité isotrope endommagée en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique du béton ;
- Son utilisation pour le béton ordinaire même si son travail principal consiste à analyser les structures en béton armé ;
- Sa capacité à contrôler les effets de récupération de rigidité lors des inversions des charges cycliques ; etc.

- Comportement à la traction

La réponse est linéaire élastique sous la traction simple de la courbe contrainte-déformation jusqu'à ce que la valeur de la contrainte à la rupture σ_{t0} soit atteinte. La contrainte à la rupture correspond à l'apparition des microfissures dans le matériau béton et leur localisation progressive jusqu'à engendrer la rupture totale du matériau.

- Comportement à la compression

La réponse est linéaire jusqu'à la valeur limite élastique σ_{C0} . La partie plastique est caractérisée par un écrouissage suivi d'adoucissement au-delà de la contrainte de rupture σ_{CU} .

II.4.2.2 Modèle pour le matériau acier

Le modèle utilisé pour le matériau acier dans cette simulation est le modèle élastoplastique à écrouissage isotrope. Les différents paramètres de ce modèle sont introduits dans le fichier de données.

II.4.3 Module Assembly

Le module Assembly (Fig.II.6) permet de rassembler toutes les parties dans un même système de coordonnées. Chaque partie du modèle à réaliser se trouvant dans son propre système, indépendamment des autres parties.

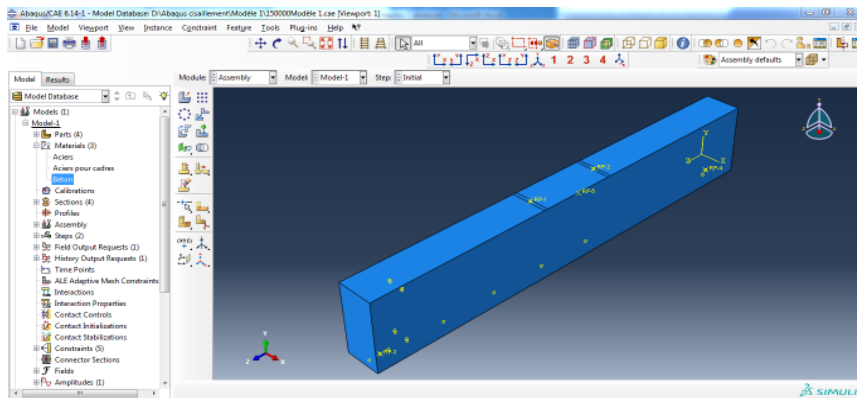


Figure II.6: Module Assembly

II.4.4 Module Step

Il permet de définir des paramètres tels que l'incrément, la valeur du temps de pas et la valeur du temps final qui est un temps virtuel. C'est aussi dans cette partie qu'on introduit les variables de sortie nécessaires afin de les visualiser plus tard dans le module « visualization »(Fig.II.7).

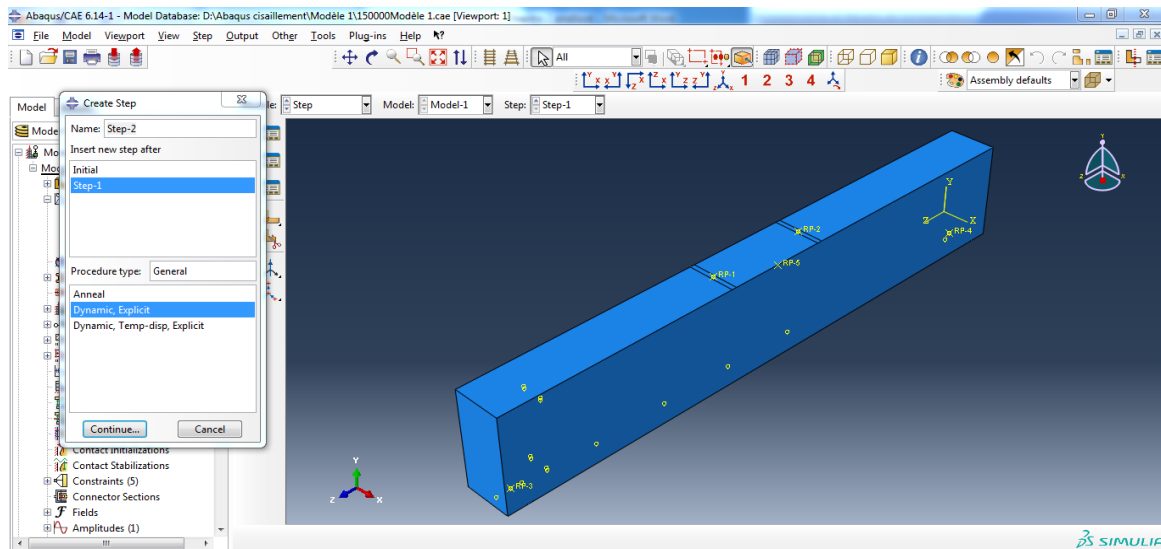


Figure II.7 : Module Step

II.4.5 Module Interaction

Dans le but d'obtenir une poutre en béton armé qui travaille comme un seul élément, il est de bon usage de spécifier les interactions c'est-à-dire tous les contacts et toutes les connections entre les différentes parties et régions du modèle. Ces interactions doivent être explicitement définies au risque de ne pas être reconnues par le logiciel.

II.4.6 Module Load

Il concerne les chargements et les conditions aux limites qui dépendent des Steps. Une force peut être définie au Step 1 mais sera inactive au Step 2.

Les conditions aux limites sont définies grâce à l'outil « Create Boudary Condition ». En fonction du travail et du résultat visé, on peut définir les conditions aux limites ou même imposer un déplacement.

Quant aux chargements, ils sont définis grâce à l'outil « Create Load ». On peut avoir une charge concentrée, un moment, une pression, etc. Il faut à chaque fois définir l'amplitude.

II.4.7 Module Mesh

Grâce à ce module on peut générer un maillage élément fini sur un assemblage.

II.4.8 Module Job

Le module Job constitue en quelque sorte la partie qui synthétise tous les autres modules car il est utilisé pour analyser le modèle conçu. En effet, le calcul se fait à l'aide du module Job qui reprend les caractéristiques de celui-ci à partir du module Step.

II.4.9 Module Visualization

Comme l'indique son nom, ce module permet de visualiser le modèle ainsi que les résultats, les courbes de charges, les déformations et les contraintes.

II.5 Présentation des modèles

II.5.1 Introduction

Un programme numérique de référence a été conçu afin de quantifier l'apport des fibres.

Dans le cadre de la modélisation numérique qui est menée dans un espace tridimensionnel (3D), des poutres en béton-composite sous chargement monotone ont été modélisées et confrontées aux poutres en béton armé avec deux barres de 12 mm de diamètre dans la partie tendue et deux autres de 10 mm de diamètre dans la partie comprimée. Les deux (02) armatures disposées dans la zone tendue sont censées avoir un comportement élastoplastique parfait. Les cadres en acier ont chacun un diamètre de 6 mm. L'interaction entre le béton et le composite sera modélisée comme une liaison réelle ou une liaison parfaite.

Les simulations que nous allons conduire vont nous permettre d'une part de réaliser une étude comparative du comportement mécanique des matériaux étudiés et d'autre part de vérifier la pertinence des résultats expérimentaux à travers le modèle élément fini proposé.

II.5.1.1 Présentation du modèle numérique de référence

Le modèle de référence ci-dessous (Fig.II.8) est celui qui nous a permis de trouver la rupture en cisaillement.

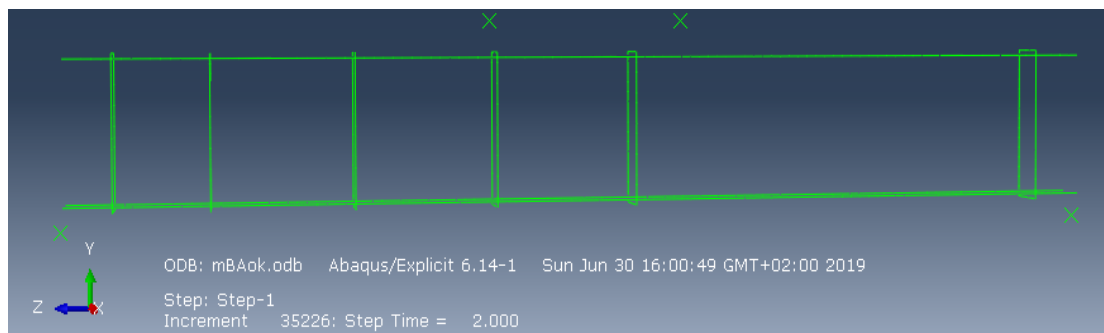


Figure II.8 : Présentation du modèle numérique de référence

II.5.1.2 Présentation des modèles renforcés

En plus du modèle de référence présenté ci-haut, quatre autres modèles renforcés ont été étudiés. L'analyse et les résultats de ces modèles sont détaillés dans le troisième chapitre consacré aux résultats et discussion.

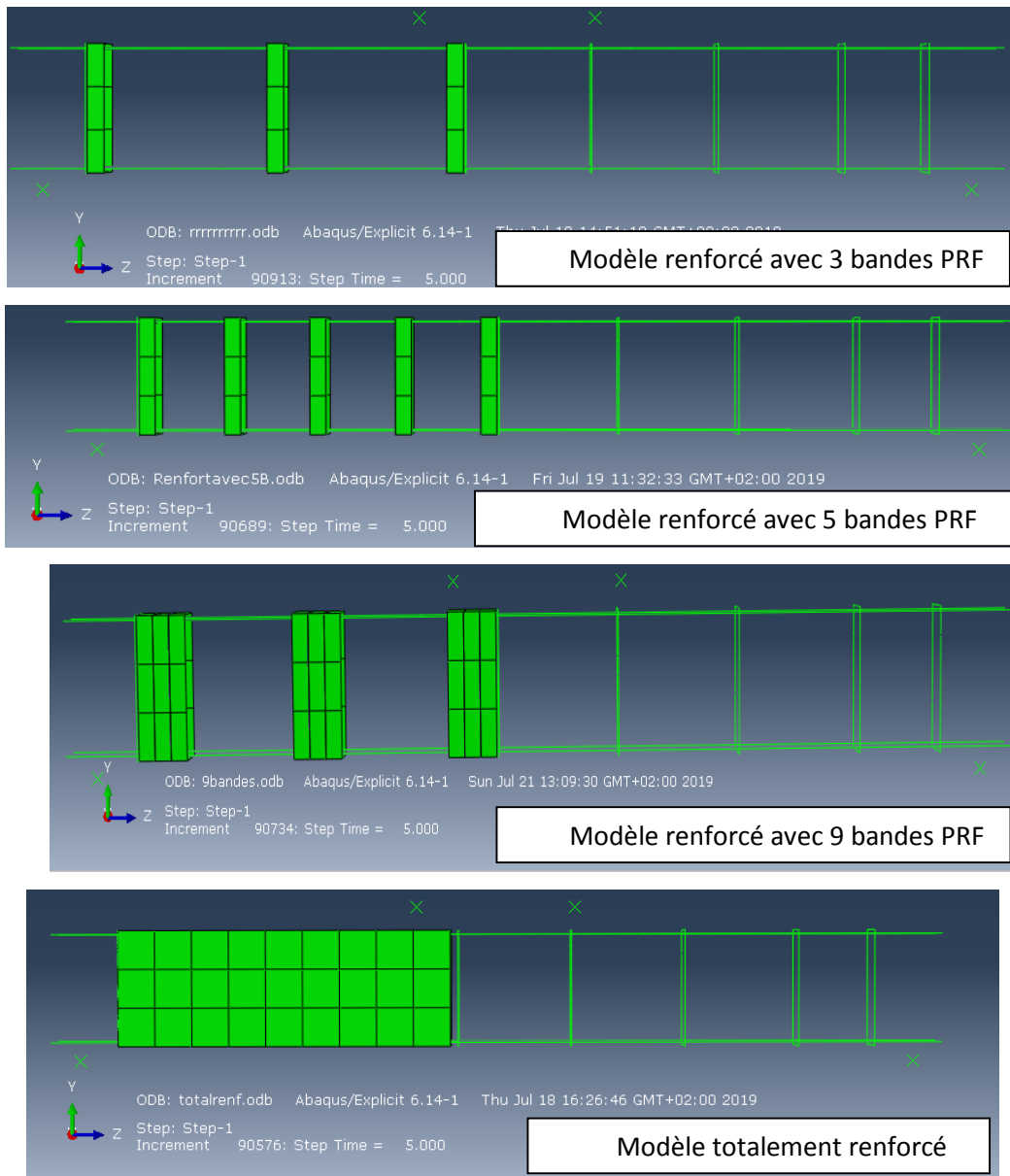


Figure II.9 : Présentation des modèles renforcés

II.5.2 Matériaux

II.5.2.1 Béton

Pour le béton une loi de comportement élastoplastique a été adoptée. Les paramètres introduits sont récapitulés dans le tableau suivant.

Tableau II.3 : Caractéristiques mécaniques du béton

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

Le modèle endommagement plasticité est utilisé pour représenter le comportement du béton. Le modèle présume que les deux principaux défauts du béton sont la fissuration en traction et l'écrasement en compression. Le béton employé a une résistance caractéristique de 25MPa. Le module de Young ou module d'élasticité du béton est calculé grâce à la formule suivante :

$$E_b = 11000 \sqrt[3]{f_{c28}} \quad (\text{II.5})$$

Donc pour $f_{c28} = 25$ MPa, on obtient : $E_b = 32164$ MPa

Avec : E_b : Module de Young

f_{c28} : Résistance caractéristique à 28 jours

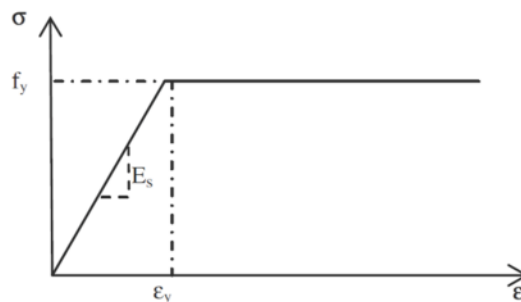
Le comportement du béton en traction est linéaire jusqu'à la résistance maximale. Le comportement à la traction après post-fissuration, qui dépend fortement de l'énergie de fissuration, n'est pas à déterminer dans le test de caractérisation du béton.

II.5.2.2 Aciers

Le comportement de l'acier dans le modèle numérique est supposé élastoplastique parfait et identique pour la traction et la compression comme le montre la figure II.10 et le tableau II.4 ci-après. Le module d'élasticité E_s , la limite élastique f_y et le coefficient de Poisson sont considérés comme étant :

$E_s = 210000$ MPa ; $f_y = 400$ MPa et $\nu = 0.3$.

Nous tiendrons compte du glissement dans le processus de calcul à cause du coefficient de friction acier-béton.

**Figure II.10** : Comportement de l'acier

E_s : Module d'élasticité

f_y : Limite élastique

ε_y : Déformation

Le tableau II.4 ci-dessous résume les différentes valeurs utilisées pour les aciers.

Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques de l'acier

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

II.5.2.3 Les polymères renforcés de fibres (PRF)

Les PRF sont utilisés dans cette étude pour assurer le renforcement de la poutre en béton armé. Le principe consiste à provoquer la fissuration au niveau de la poutre ferrillée non renforcée. Cette partie va ensuite être renforcée par le matériau composite afin de quantifier l'apport de ce dernier en termes de résistance et de déformation. Un modèle est utilisé dans cette étude pour modéliser le comportement du PRF qui est considéré comme linéaire élastique isotrope jusqu'à la rupture.

II.5.3 Géométrie

Les caractéristiques géométriques sont illustrées sur la figure II.11. Les dimensions et les propriétés mécaniques des différents matériaux constitutifs ont été soigneusement introduites pour pouvoir prendre en compte tous les paramètres d'étude et de valider le modèle élément fini proposé. La plaque creuse représente le PRF et la poutre pleine représente le béton armé. Les trois éléments ont été associés, supposant une liaison parfaite entre le composite, l'acier et le béton.

La poutre et la plaque composite sont toutes deux rectangulaires. La poutre, pleine, a une section de 10*20 cm² et une longueur de 120cm. La plaque, creuse, a une longueur de 15 cm, une largeur de 5 cm et une épaisseur de 3 mm. L'ensemble est partitionné pour repérer la position des appuis et la concentration des charges.

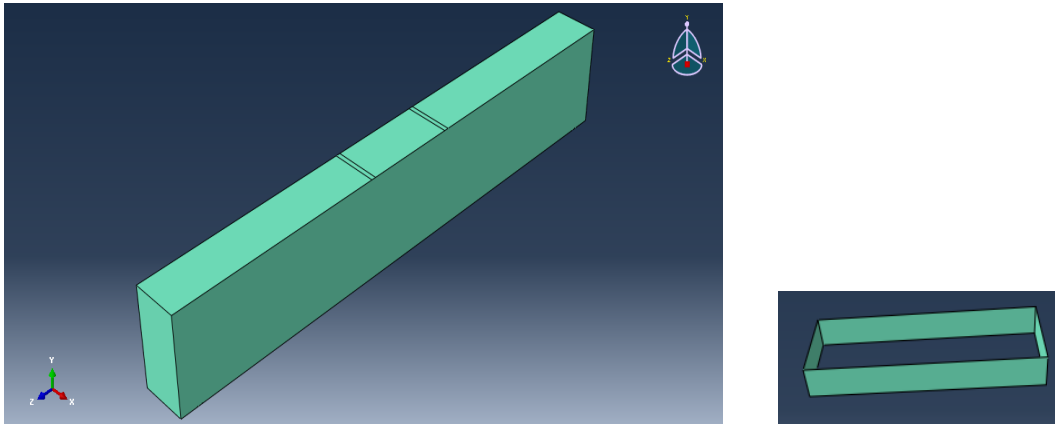


Figure II.11 : Géométrie des éléments

Les poutres composites modélisées sont soumises à un chargement en flexion quatre (04) points jusqu'à la rupture.

II.5.4 Contact béton-composite

Le contact entre les éléments et l'enveloppe composite est modélisé par une méthode classique. L'interaction est assurée par la fonction « Embedded Region » du logiciel Abaqus. L'interface étant modélisée comme une liaison parfaite, il n'y a pas de décollement entre le composite et le béton. La perte de cohésion dans le système composite étudié peut être signalée aussi bien dans les différentes composantes que dans l'interface entre les composantes. On ne peut observer la rupture au niveau de l'interface que lorsque la préparation de la surface de contact n'est pas bonne.

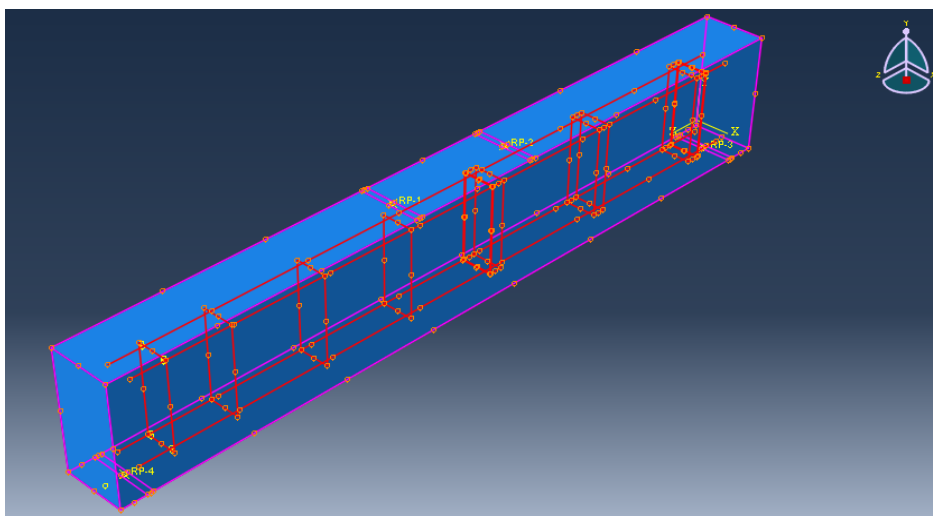


Figure II.12 : Contact béton-composite

II.5.5 Étude de maillage par éléments finis

Le maillage est une méthode qui permet de diviser l'élément en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et d'examiner chaque particule séparément. L'assemblage des particules élémentaires nous ramène à l'élément initial.

La taille des éléments a une grande influence sur la précision des résultats lors de la modélisation. Plus la taille des éléments est grande plus le temps de calcul est réduit et moins les résultats sont exacts. La taille des éléments ne doit pas non plus être trop petite pour ne pas avoir un temps de calcul trop important. Il convient donc de jouer sur la taille des éléments et le temps pour trouver un maillage convenable. Généralement, seulement les parties de la structure sensibles à des phénomènes significatifs sont maillées plus finement, le reste de la structure est maillée plus grossièrement car il existe très peu de risque. La densité du maillage doit être, alors, optimale pour atténuer la taille du problème et le temps d'exécution.

En ce qui concerne le type d'éléments, pour le béton, des éléments finis tétraédriques en 3D HEX8 (éléments d'Abaqus, composés de huit nœuds, ayant chacun six degrés de liberté) avec une formulation lagrangienne (C3D8) pour assurer le maillage de la poutre avec une dimension de 2cm dans les trois directions (2cm x 2cm x 2cm). Le matériau composite quant à lui est maillé par des éléments finis quadratiques (deux dimensions) à quatre nœuds avec huit degrés de liberté, avec notamment une dimension de cinq centimètres dans les deux directions assurant ainsi un maillage moyen (composite : 2D, 5cm x 5cm).

Tableau II.5 : Taille des maillages

Éléments	Taille des maillages (mm)
Poutre	10
Plaque composite	50
Cadres en aciers	10
Armatures tendes	50
Armatures comprimées	50

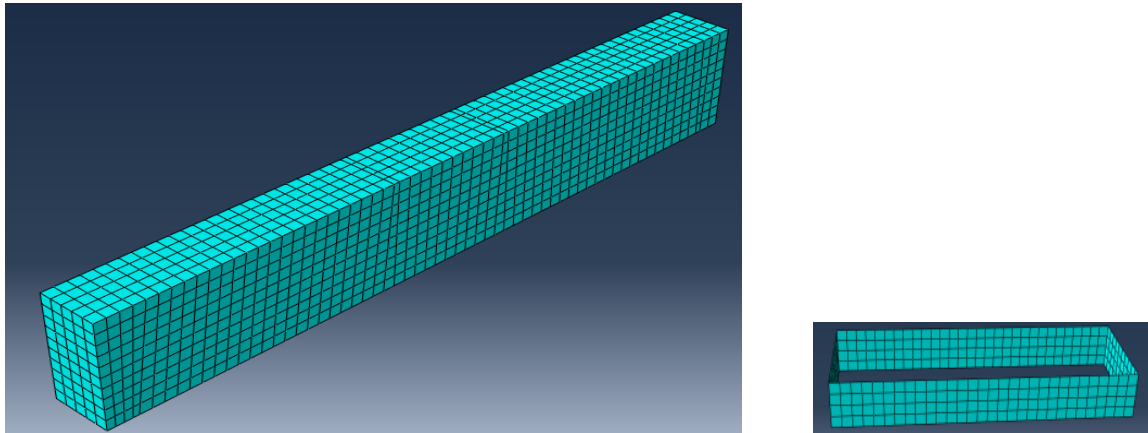


Figure II.13 : Maillage des éléments

Plus le maillage est raffiné, plus l'exactitude de la simulation augmente.

II.5.6 Conditions aux limites

Les appuis sont considérés comme simples et sont modélisés comme une ligne bloquée dans la direction verticale (U_2) sur la position de l'appui réel dans le test. Dans ce modèle, l'axe Z du système des coordonnées coïncide avec l'axe de la poutre.

Tous les détails nécessaires sur les points d'application et les distances entre les charges sont rapportés sur la figure II.14 ci-dessous.

Les conditions sont :

- Au niveau des poutres d'appui les déplacements verticaux sont bloqués par les deux appuis.
- Deux charges linéaires ont été appliquées respectivement au niveau de la poutre pour avoir une flexion quatre (04) points.
- Un déplacement maximum de 2 mm a été imposé.

Les deux charges ont augmenté graduellement jusqu'à la rupture.

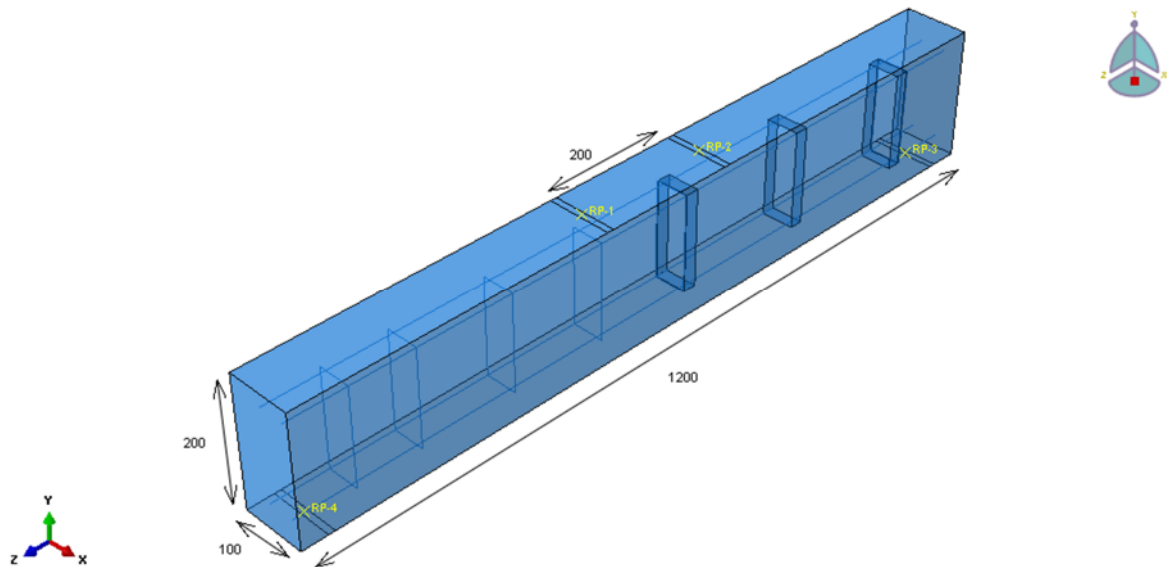


Figure II.14 : Poutre en béton armé soumise à la flexion quatre points

II.6 Conclusion

Le logiciel Abaqus est bien adapté pour ce type de travail. Cette partie détaille de manière assez claire les différentes étapes à suivre dans le logiciel ABAQUS pour faire la simulation numérique d'une poutre rectangulaire. Même si la thématique est à caractère numérique, il est important de souligner que la simulation numérique se fait en amont des travaux expérimentaux pour donner le ton et l'idée générale sur les séances expérimentales. Les simulations que nous allons voir dans le prochain chapitre vont nous permettre de vérifier la pertinence des résultats à travers le modèle élément fini et de réaliser une étude comparative du comportement mécanique des éléments étudiés.

Chapitre

III

Résultats et discussion

III.1 Introduction

La partie résultats et discussion constitue l'essence même de notre travail de recherches. Dans le cadre de ce chapitre, nous essayerons de faire le parallèle entre le modèle numérique de référence et les différents modèles renforcés pour évaluer les apports de ce renforcement. Tous les résultats de la simulation numérique en termes d'évolution des contraintes, de déformation et de dégradation de la rigidité seront présentés et discutés.

III.2 Effet du nombre de cadres composites

Plusieurs variantes de renforcement avec PRF sont testées, en fonction du nombre de cadres. Trois, cinq et 9 cadres ont été considérés en plus du modèle totalement renforcé. Les schémas correspondants ainsi que les résultats obtenus pour ces configurations ainsi que pour la poutre de référence, comme l'état de contrainte, le mode de rupture et les courbes force- déplacement sont donnés ci-dessous.

Tous les modèles renforcés étudiés présentent une concentration de contrainte dans la zone médiane.

III.2.1 Modèle numérique de référence

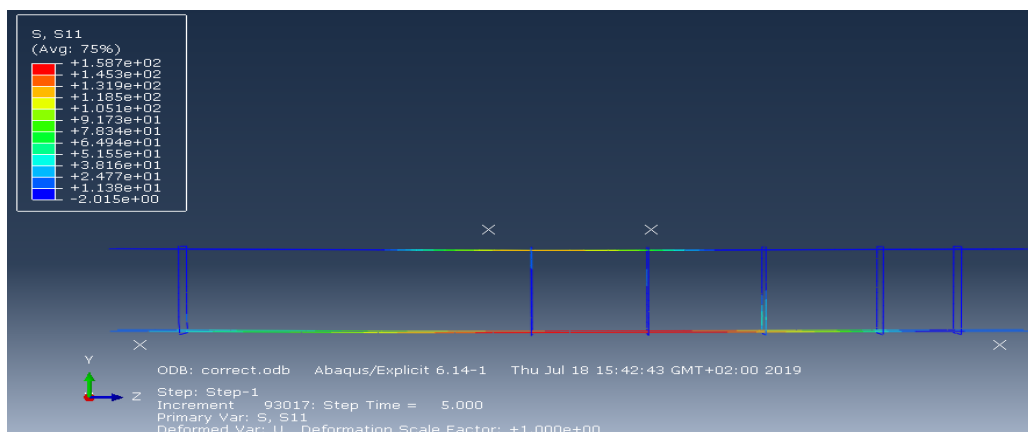


Figure III.1 : Etat de contrainte du modèle numérique de référence

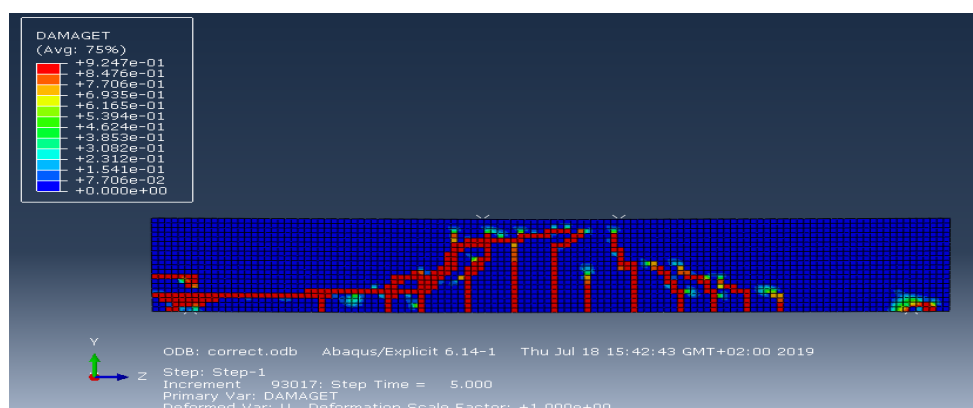


Figure III.2 : Mode de rupture du modèle numérique de référence

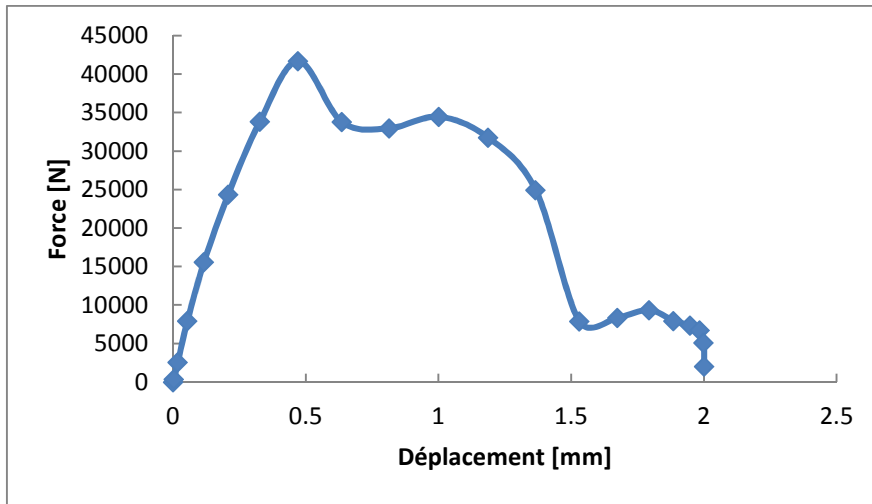


Figure III.3 : Courbe force-déplacement du modèle numérique de référence

III.2.2 Modèle renforcé avec 3 bandes de PRF

Les bandes composites sont disposées en respectant un certain espacement, comme indiqué sur la figure III.4 ci-dessous.

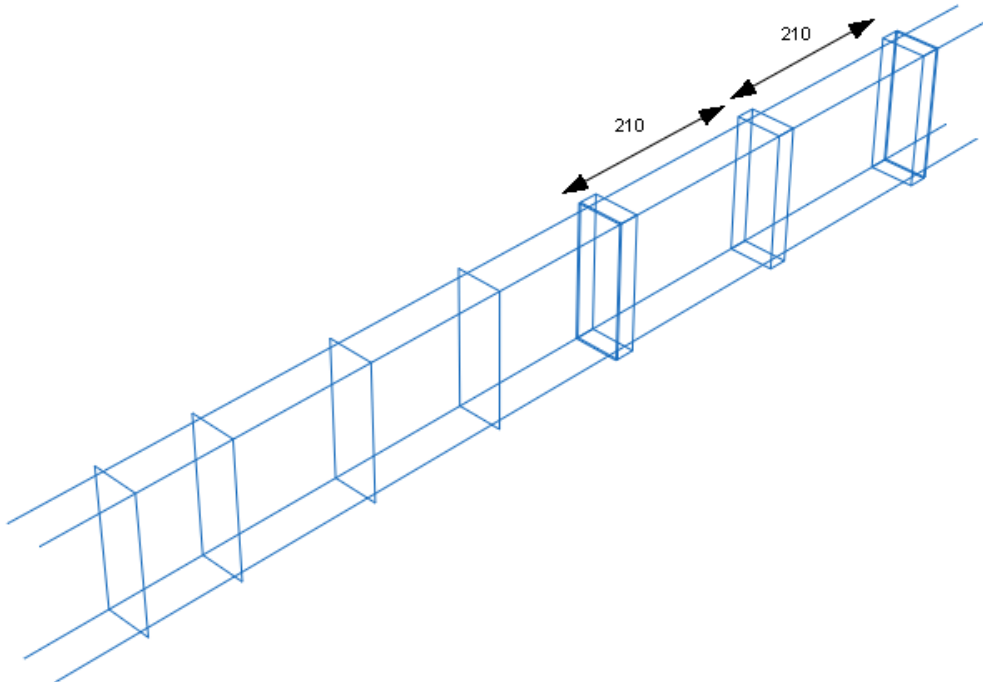


Figure III.4 : Espacement entre les bandes composites du modèle renforcé avec 3 bandes de PRF

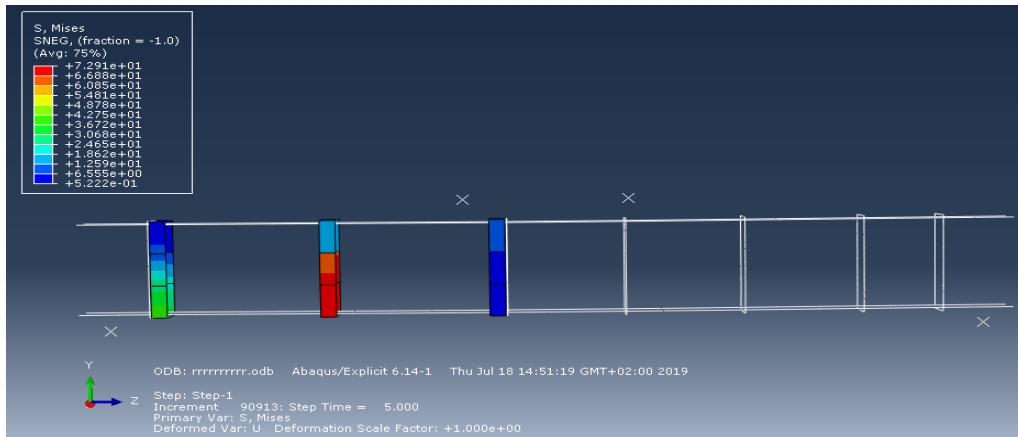


Figure III.5 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de PRF

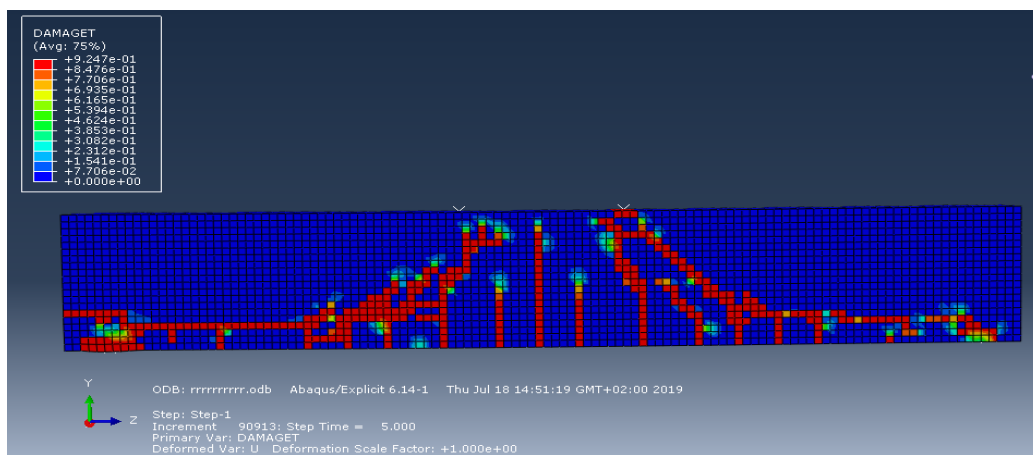


Figure III.6 : Mode de rupture modèle renforcé avec 3 bandes de PRF

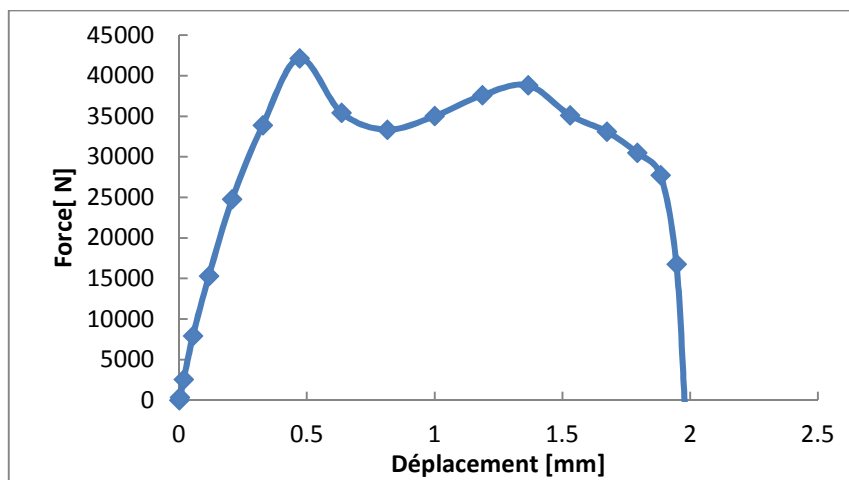


Figure III.7 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de PRF

III.2.3 Modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

L'espaceur utilisé pour les bandes est montré sur la figure III.8 ci-dessous.

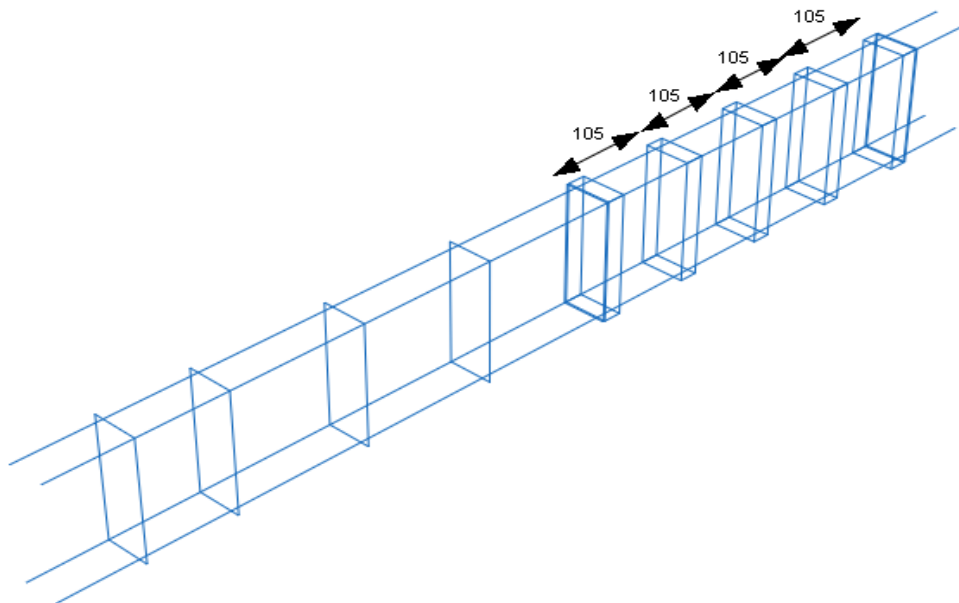


Figure III.8 : Espacement entre les bandes composites du modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

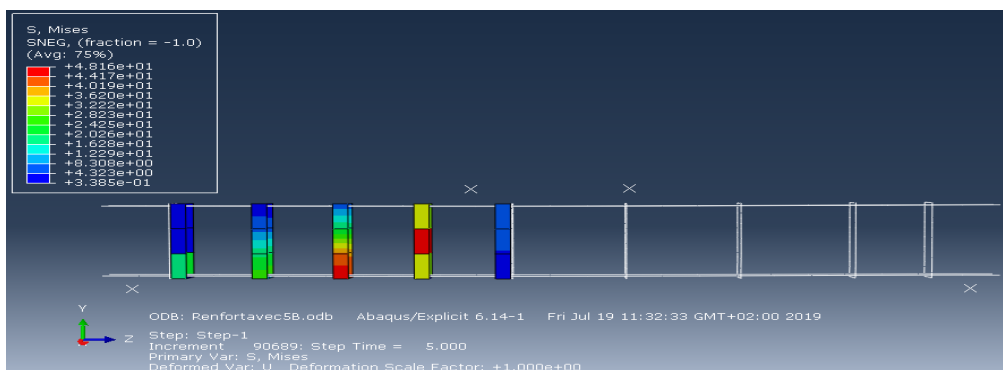


Figure III.9 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

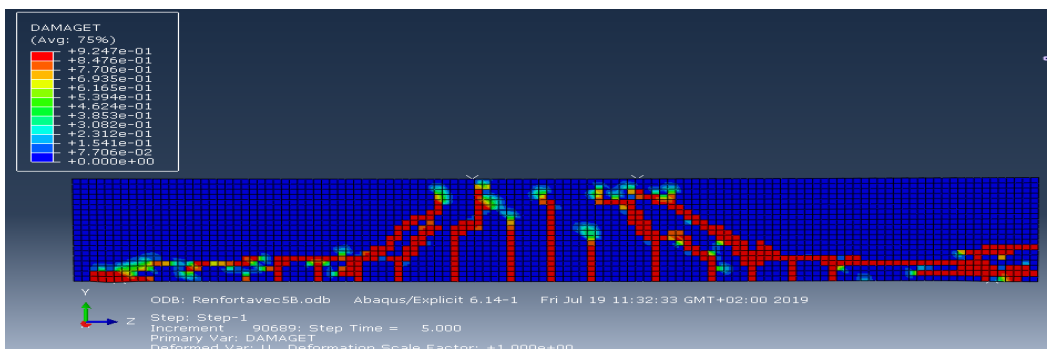


Figure III.10 : Mode de rupture du modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

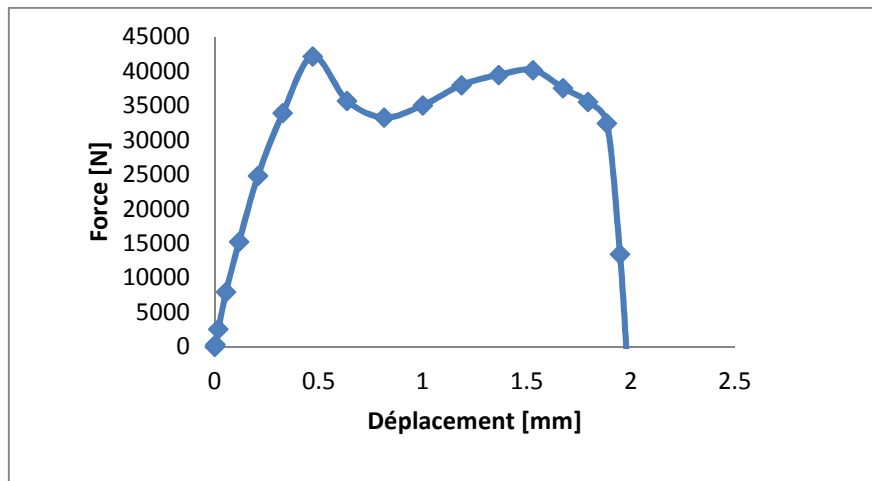


Figure III.11 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

III.2.4 Modèle renforcé avec 9 bandes de PRF

La figure III.12 ci-après montre les espacements entre les différentes bandes composites.

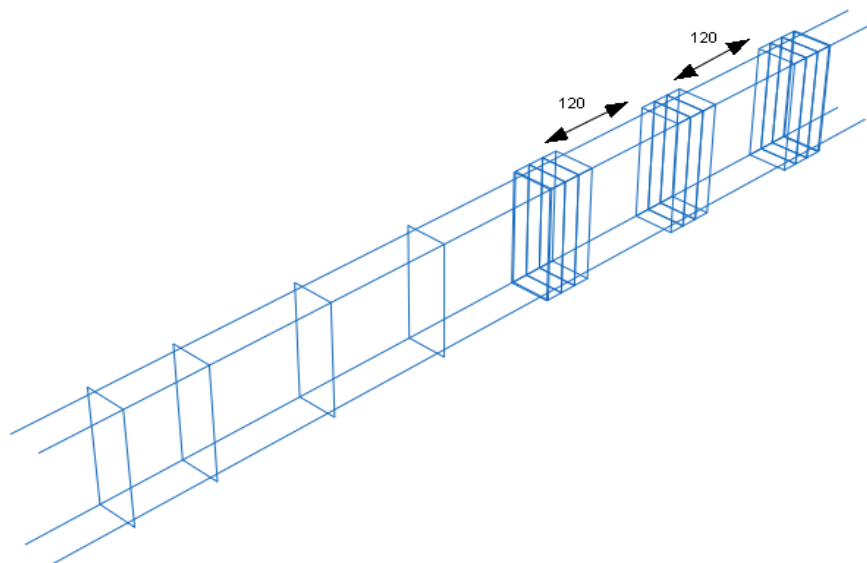


Figure III.12 : Espacement entre les bandes composites du modèle renforcé avec 9 bandes de PRF

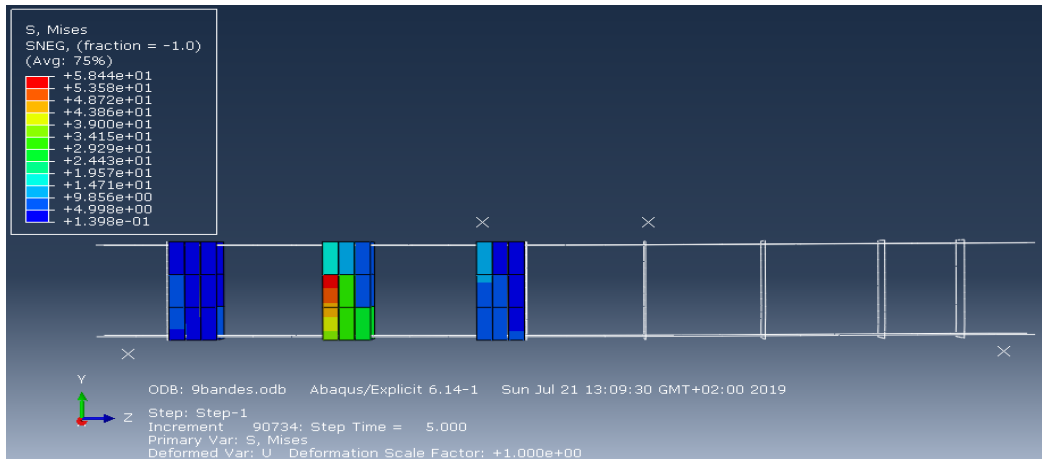


Figure III.13 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 9 bandes de PRF

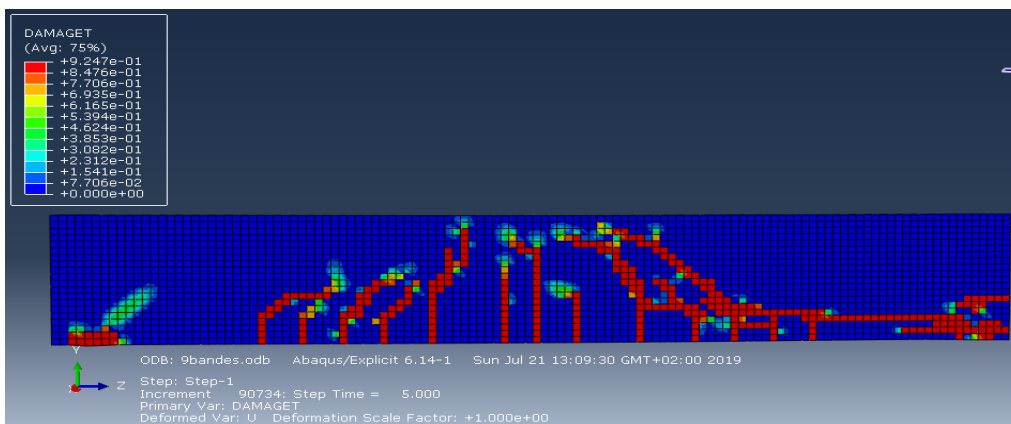


Figure III.14 : Mode de rupture du modèle renforcé avec 9 bandes de PRF

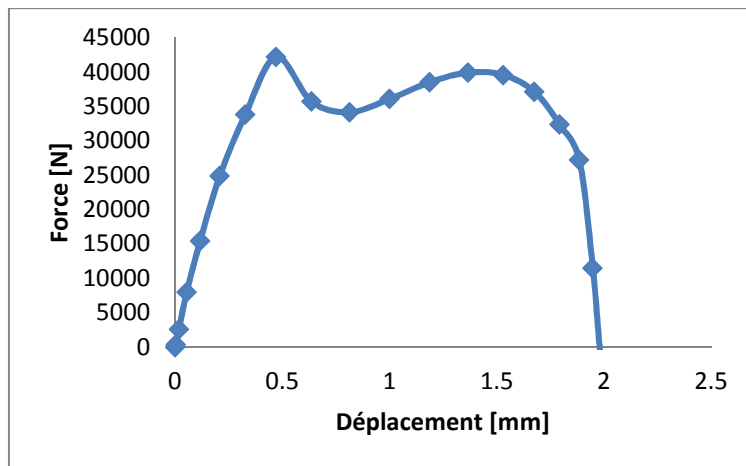


Figure III.15 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 9 bandes de PRF

III.2.5 Modèle totalement renforcé

La figure III.16 ci-dessous montre l'espacement utilisé pour disposer la bande PRF.

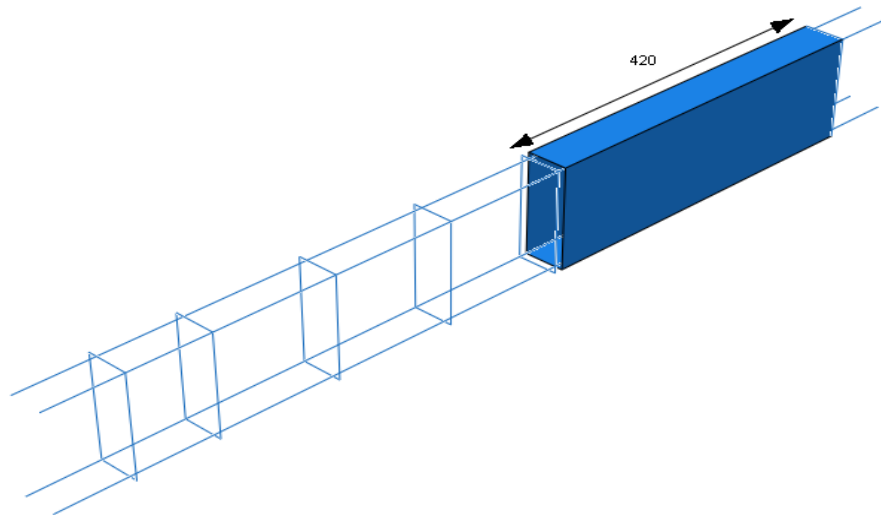


Figure III.16 : Disposition de la bande PRF du modèle totalement renforcé

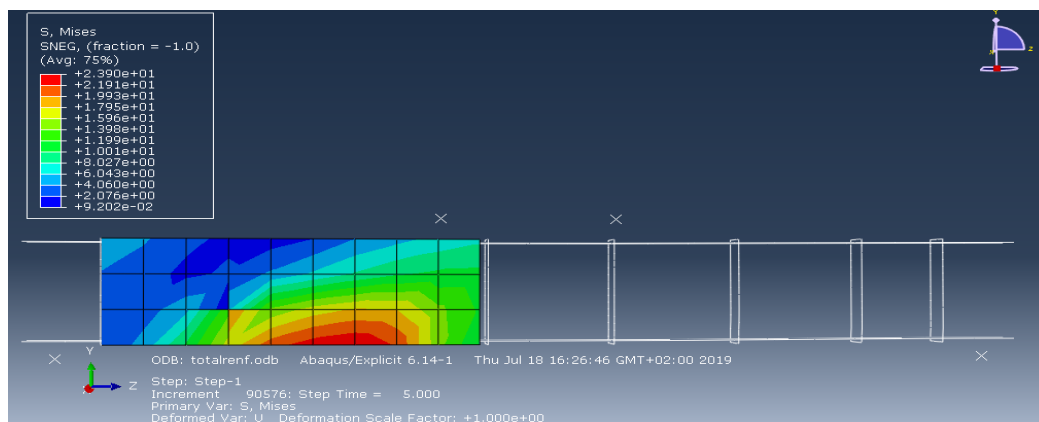


Figure III.17 : Etat de contrainte du modèle du modèle totalement renforcé

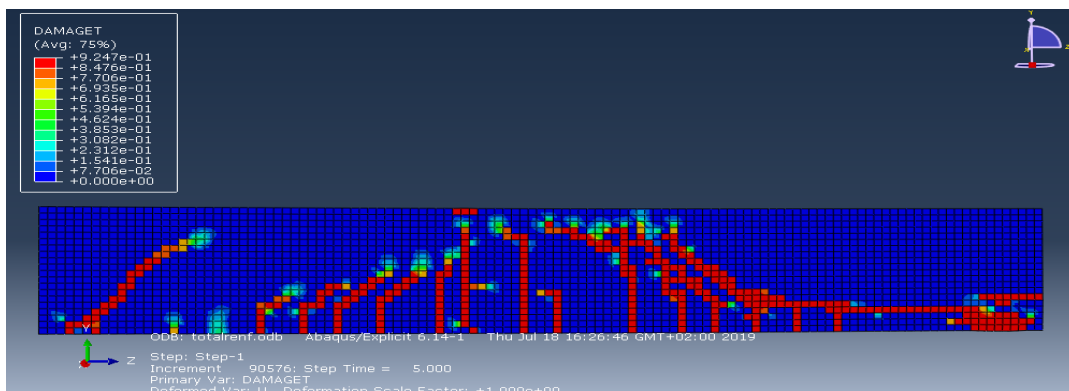


Figure III.18 : Mode de rupture du modèle totalement renforcé

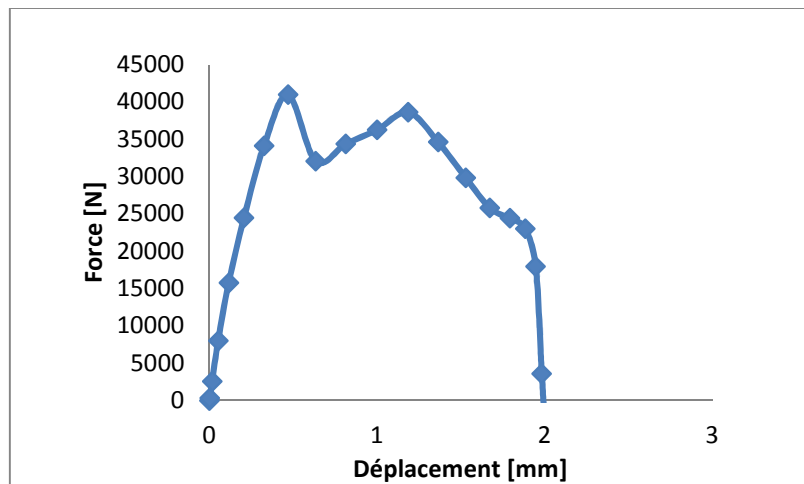


Figure III.19 : Courbe Force-Déplacement du modèle totalement renforcé

III.3 Effet de l'épaisseur du PRF

➤ Epaisseur de 3mm

Les résultats (l'état de contrainte, le mode de rupture et la courbe force-déplacement) de ce modèle sont détaillés au paragraphe III.2.2 (modèle renforcé avec 3 bandes de PRF).

➤ Epaisseur de 6 mm

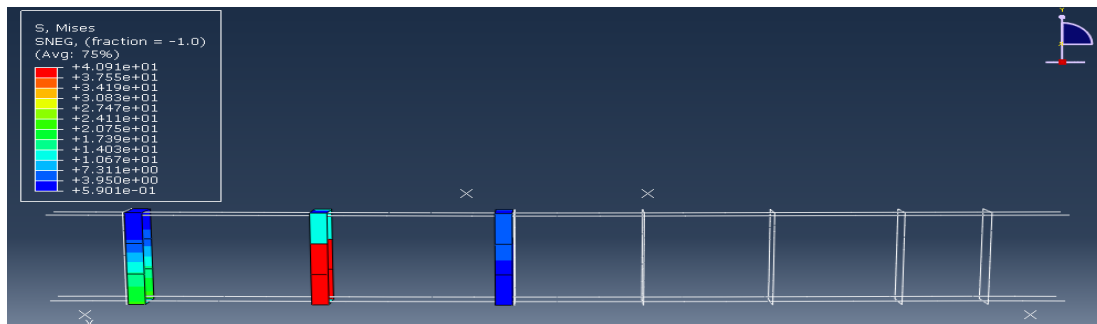


Figure III.20 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de 6mm d'épaisseur

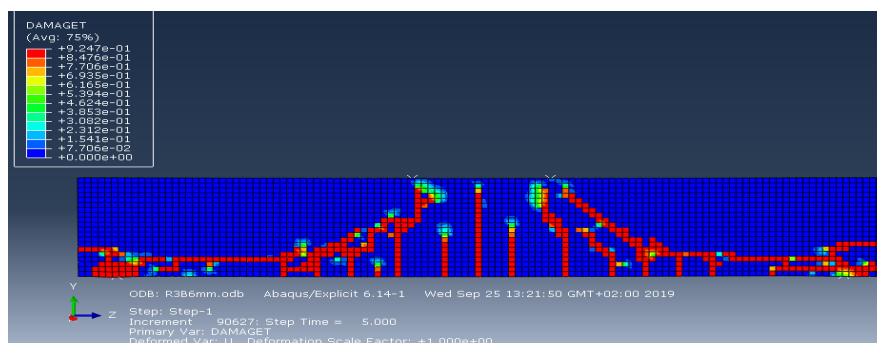


Figure III.21 : Mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes de 6mm d'épaisseur

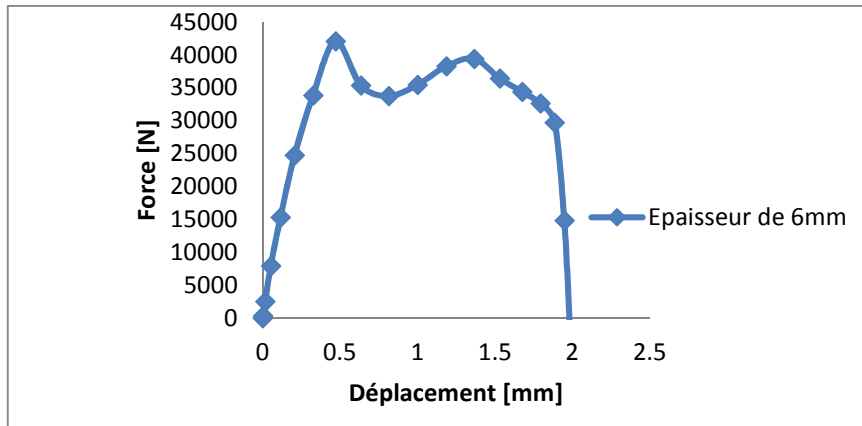


Figure III.22 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de 6mm d'épaisseur

➤ Epaisseur de 9mm

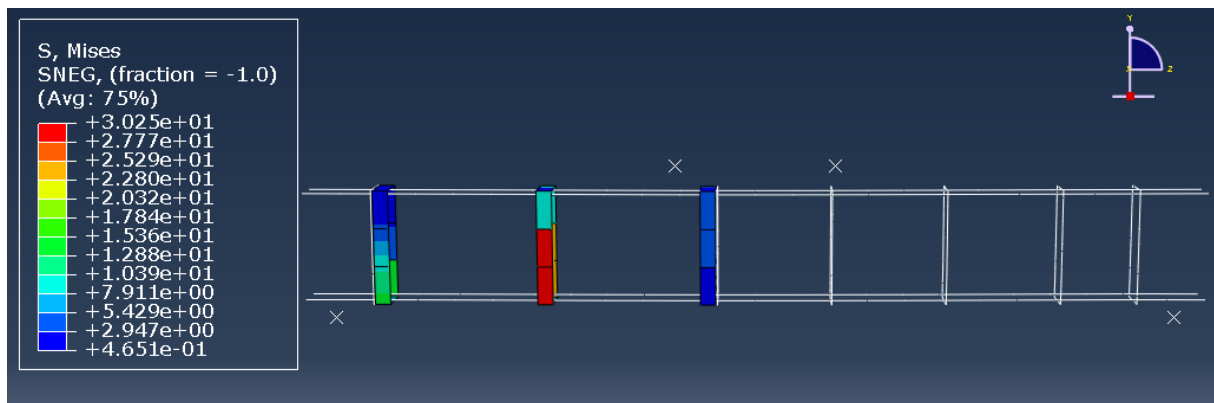


Figure III.23 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de 9mm d'épaisseur

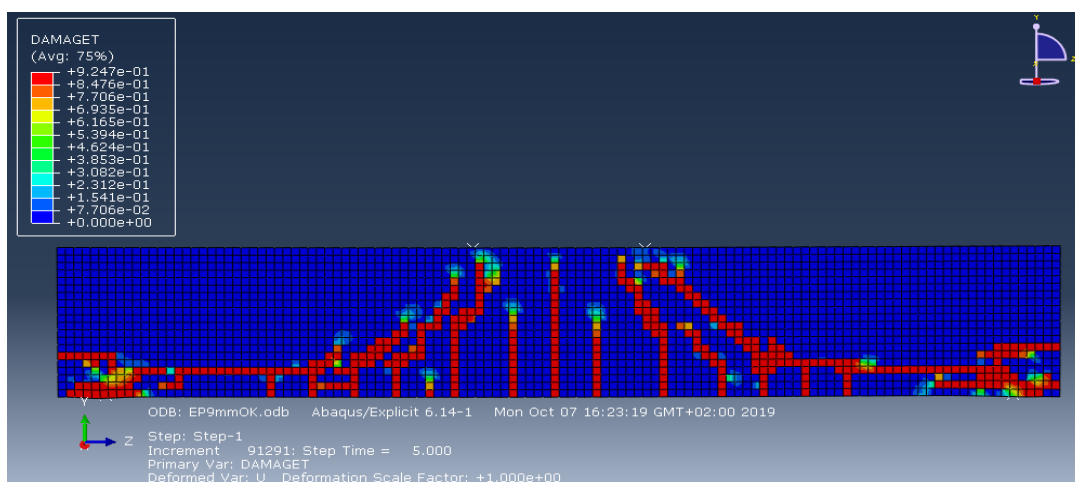


Figure III.24 : Mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes de 9mm d'épaisseur

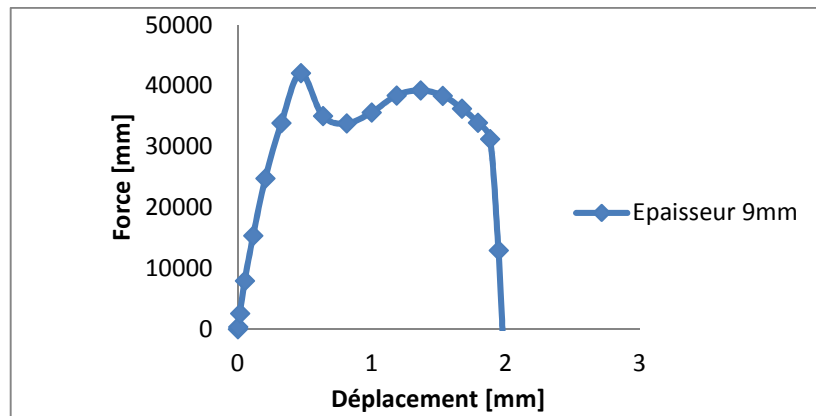


Figure III.25 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de 9mm d'épaisseur

Confrontation des résultats

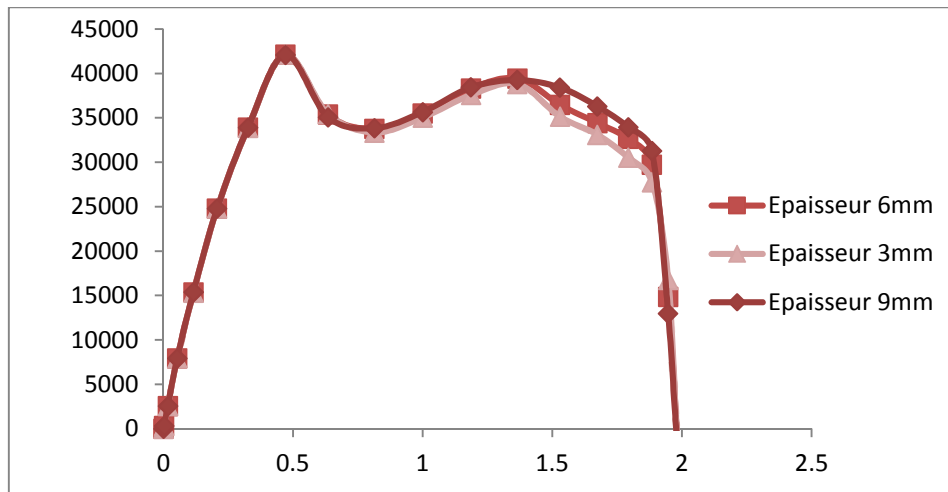


Figure III.26 : Confrontation des courbes force-déplacement

Aucune amélioration significative en termes de résistance et de ductilité n'est observée dans les trois cas. La variation de l'épaisseur n'a pas une grande conséquence sur les performances mécaniques d'une poutre en béton armé renforcée au cisaillement lorsqu'elle n'est pas importante. On note bien au contraire une diminution de la résistance (tableau III.1). Toutefois, un léger gain en ductilité est à mettre en évidence lorsque l'épaisseur de la bande a été doublée puis triplée. Les modes de ruine sont également pratiquement les mêmes dans les trois variantes.

Tableau III.1 : Résultats de l'effet de l'épaisseur du PRF

Epaisseur de la bande PRF	Forces (KN)
3 mm	42,170
6 mm	42,159
9 mm	42,137

III.4 Effet de la largeur du PRF

➤ Modèle renforcé avec 3 bandes de 20mm de largeur

L'état de contrainte, le mode de ruine et la courbe force-déplacement de ce modèle sont donnés plus haut au paragraphe III.2.2 (modèle renforcé avec 3 bandes de PRF).

➤ Modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

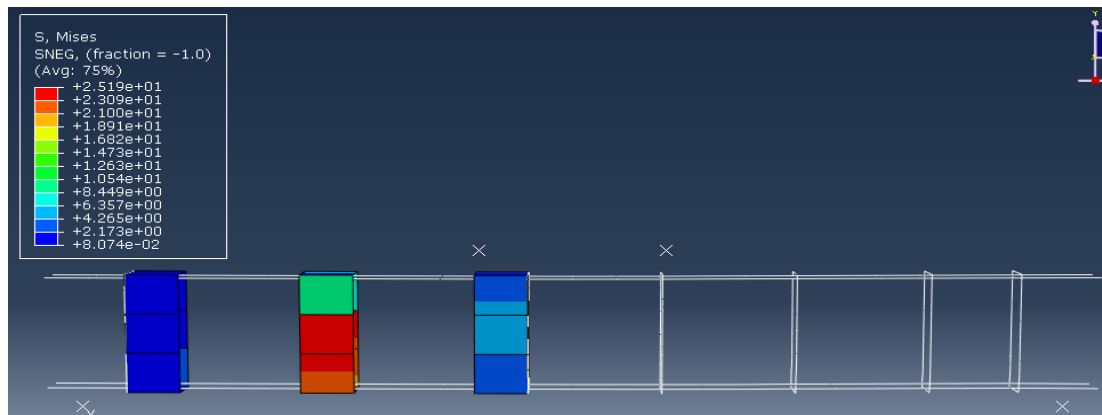


Figure III.27 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

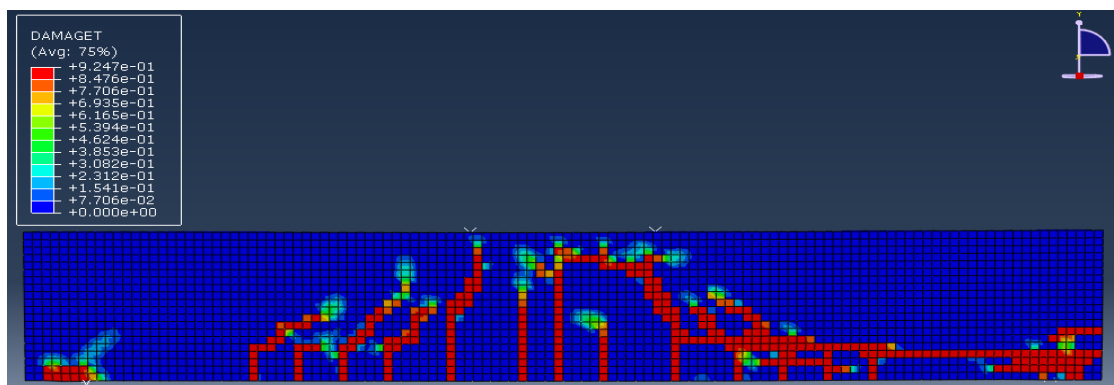


Figure III.28: Mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

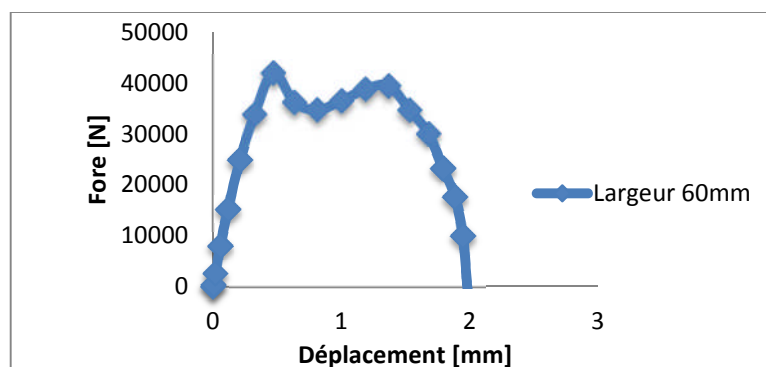


Figure III.29 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

Confrontation des résultats

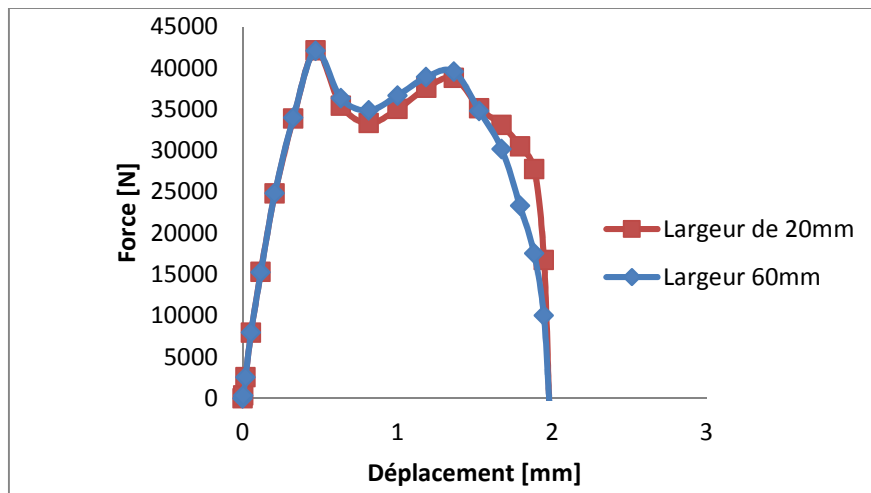


Figure III.30 : Confrontation des courbes force-déplacement

Tout comme l'épaisseur, nous constatons aussi que la largeur du PRF n'influence pas considérablement la résistance mécanique d'une poutre en béton armé renforcée au cisaillement dans notre cas étudié. Bien au contraire, cette dernière passe de 42,170 KN pour le modèle renforcé avec 3 bandes de 20 mm de largeur à 42,109 KN pour le modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur. La courbe des résultats du modèle renforcé avec trois bandes de 60 mm de largeur présente toutefois une bonne option en déformabilité. L'allure des deux modes de rupture est quasiment la même.

III.5 Évolution des dommages

Cette partie concerne l'étude de la propagation des fissures dans notre poutre en béton armé. Le modèle élément fini permet effectivement de représenter l'évolution de ces fissures dans les éléments considérés. Pour cela, nous avons analysé le processus de fissuration ainsi que les modes de rupture des spécimens renforcés et non renforcés, en nous appuyant sur les dommages de traction. Afin d'illustrer l'évolution des dommages l'exemple de la poutre en béton armée renforcée avec trois (03) bandes composites est donné. Sur un intervalle d'incrément de 0 à 5, nous avons choisi les incréments de 1.25, 2.25 et 3.25 pour voir l'évolution des dommages.

Les trois incréments seront respectivement soumis à un même chargement de 1KN, 25KN et 50KN.

Dommages de traction

La figure III.20 ci-dessus illustre l'évolution des dommages en traction pour les trois incréments retenus.

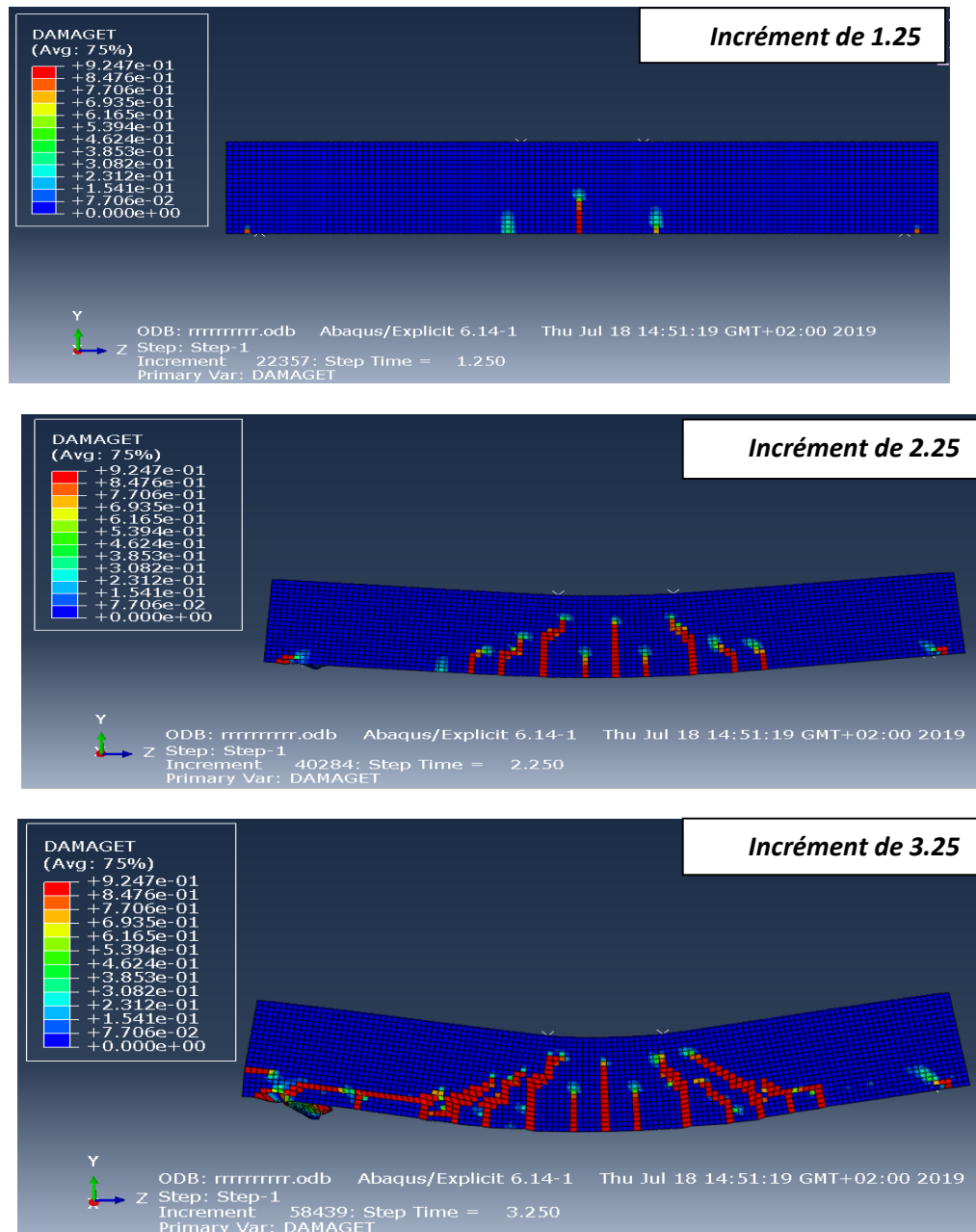


Figure III.31 : Evolution des dommages dus à la traction

L'augmentation des dommages dans la poutre est proportionnelle à l'augmentation du chargement extérieur appliqué. En effet, plus le chargement extérieur augmente, plus les dommages sont importants.

Par ailleurs, une observation minutieuse sur l'état de l'endommagement nous permet de dire qu'à un même taux de chargement et au même endroit les dommages de la poutre de référence en béton armé sont plus importants que ceux de la poutre composite (fig.III.32).

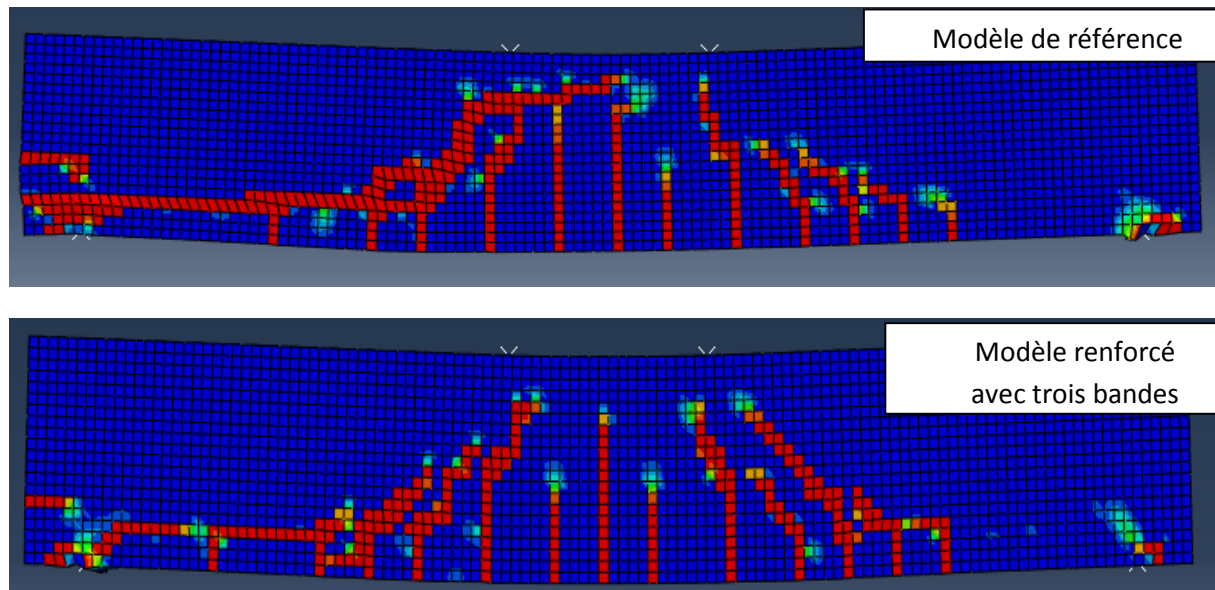


Figure III.32 : Évolution des dommages de traction

Cette approche numérique vient consolider la thèse selon laquelle le renfort composite joue un rôle primordial dans la reprise des sollicitations et influence les modes de rupture.

Plusieurs microfissures de flexion se font remarquer en premier lieu dans la zone tendue pour des chargements moyens avant l'apparition des fissures de cisaillement dans les bielles inclinées. Les fissures de cisaillement sont moins intenses dans la zone renforcée par le PRF en comparaison avec les fissures de la poutre de référence. Ceci peut être expliqué par le fait que les bandes de PRF reprennent une partie de la contrainte ayant engendré ces fissures après que le béton ait cédé, ce qui réduit le nombre et l'ampleur des fissures jusqu'à ce que le composite cède à son tour, provoquant la rupture de la poutre.

III.6 Confrontation des résultats

Le modèle numérique de référence et les quatre modèles renforcés ont la même géométrie et sont constitués de matériaux ayant les mêmes propriétés physiques ; nous pouvons donc légitimement nous permettre de comparer les résultats. La confrontation des courbes permet de mieux voir la fiabilité de la procédure numérique. La figure III.33 ci-dessous montre l'évolution du chargement extérieur appliqué en KN en fonction du déplacement vertical jusqu'à la rupture des poutres.

III.6.1 Comparaison des courbes

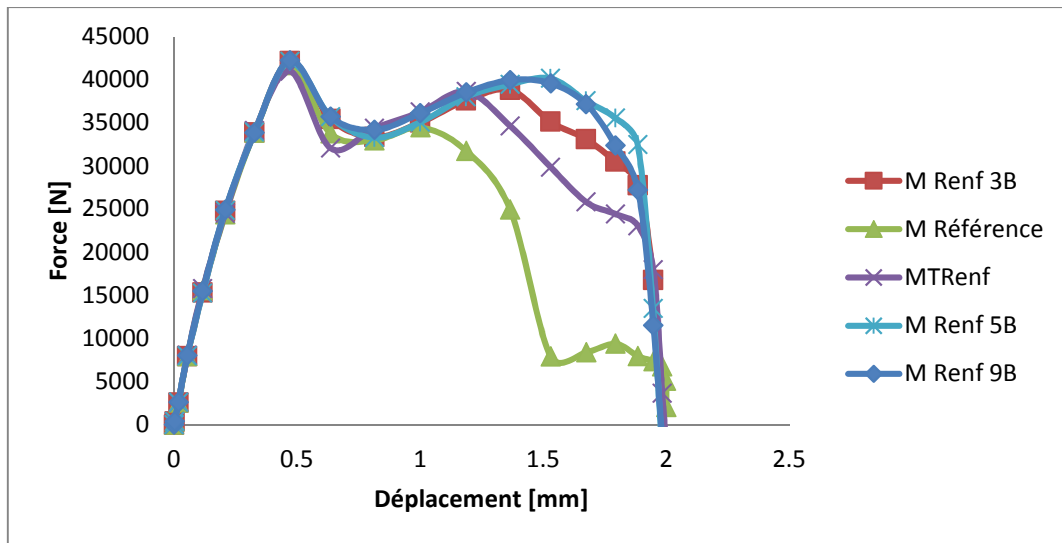


Figure III.33 : Confrontation des courbes force-déplacement

M renf 3B : Modèle renforcé avec trois bandes composites

M référence : Modèle de référence

MTRenf : Modèle totalement renforcé

M Renf 5B : Modèle renforcé avec cinq bandes composites

M Renf 9B : Modèle renforcé avec neuf bandes composites

La confrontation des courbes force-déplacement permet de remarquer la similitude qui existe entre les cinq graphes : ils se coïncident pratiquement jusqu'à la charge ultime.

Les courbes des modèles renforcés présentent la même allure, c'est-à-dire deux paliers. Le premier pic correspond à la charge ultime provoquant la première fissure dans la poutre. Le second pic correspond au travail des PRF qui sont plus ductiles, particulièrement pour les cas de renfort avec 3, 5 et 9 cadres PRF (à chaque fois qu'augmente le nombre de PRF, on obtient une meilleure ductilité). Par contre pour le totalement confiné, il y a une baisse de résistance et de ductilité. On peut croire, alors qu'il y a un renforcement optimal qui donnerait de meilleurs résultats en termes de résistance et de ductilité.

La courbe de référence présente une bonne corrélation avec les quatre modèles renforcés. Les valeurs de la capacité portante de nos différents modèles sont presque les mêmes. En effet, la capacité portante de la poutre de référence qui est de 41.716 KN n'est pas loin de celle de la poutre composite ayant la plus grande valeur c'est-à-dire 42.246 KN, soit un apport en résistance de 1,27 %.

Pour un même déplacement de 2mm, aucun d'entre eux n'a pu améliorer de façon considérable la résistance mécanique de la poutre. Le tableau III.2 ci-dessous présente de façon détaillée les différents modèles ainsi que leur force ultime.

Tableau III.2 : Tableau récapitulatif des valeurs des différents modèles

Modèles	Force (KN)
Modèle de référence	41,716
Modèle renforcé avec 3 bandes	42,170
Modèle renforcé avec 5 bandes	42,160
Modèle renforcé avec 9 bandes	42,246
Modèle totalement renforcé	40,996

Même si l'amélioration de la résistance mécanique n'a pas été au rendez-vous, ces résultats sont globalement satisfaisants et cohérents. En effet, la déformabilité qui est un paramètre important dans ce cas de figure a été nettement améliorée pour tous les quatre modèles renforcés. Ce gain de déformabilité permet à la poutre de résister un peu plus longtemps à cause de la présence des composites avant de se rompre contrairement au modèle de référence qui en est dépourvu. Un autre point non négligeable est aussi que, la poutre renforcée, au lieu de se rompre directement et continuellement, a repris à travailler et à résister sous l'effet des composites PRF. La rupture de la poutre renforcée sera observée au moment où les composites ne peuvent plus assurer leur rôle de maintien.

Les modèles renforcés avec 5 bandes et avec 9 bandes sont ceux qui présentent de meilleurs résultats en termes de résistance (quoique les gains sont de l'ordre de 1,064% et 1,27% respectivement) et de ductilité.

Le modèle renforcé avec 3 bandes a certes montré une légère amélioration dans la résistance (1,088%) mais sa ductilité reste tout de même moins bonne que celle des deux modèles précédents.

Le renforcement total n'est pas le choix idéal et cela peut s'observer sur la figure III.33. Il présente une moins bonne résistance, soit une baisse de 1,72% par rapport au modèle de référence en plus d'avoir une moins bonne ductilité. En plus de cela, ce type de renforcement n'est pas économique.

III.6.2 Comparaison des modes de rupture

Les modes de rupture des différents modèles étudiés sont regroupés sur la figure III.34 ci-dessous.

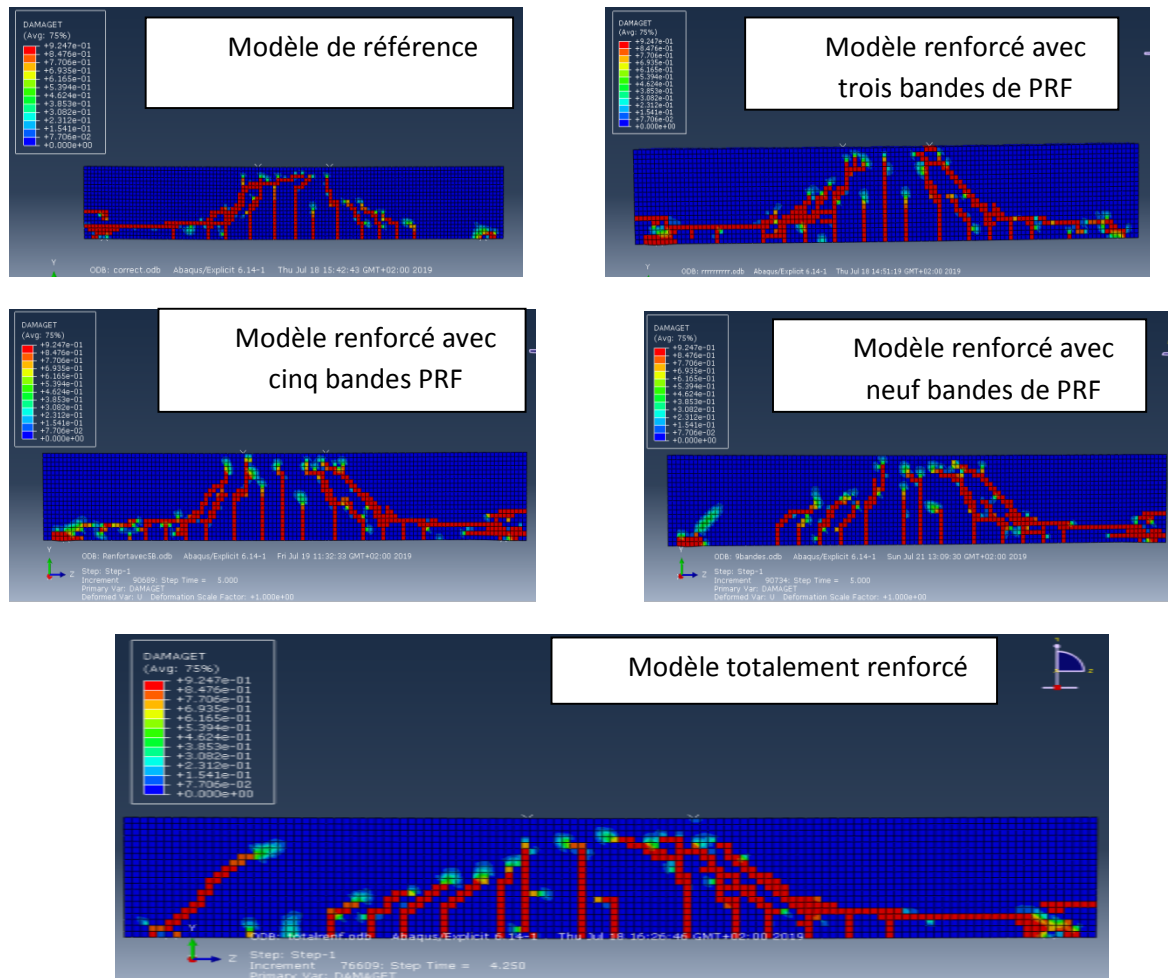


Figure III.34 : Comparaison des modes de ruine des différents modèles

Nous constatons dans le mode de rupture du modèle numérique de référence l'existence des dommages dus à l'effort tranchant. Ils apparaissent dans la zone qui n'est ni ferrillée ni renforcée. Néanmoins, ces modes de cisaillement sont beaucoup plus importants dans la partie non renforcée. La partie de la poutre renforcée par des cadres en acier comporte moins de dommages car ces derniers travaillent normalement et assurent la non-propagation des fissures.

Concernant les modèles renforcés, après l'apparition des premières fissures, le PRF est sollicité et comme il présente de très bonnes caractéristiques mécaniques, il a encore une marge avant qu'il ne cède à son tour provoquant ainsi la rupture du spécimen.

Lorsque que nous essayons de renforcer la poutre avec trois bandes composites comme nous pouvons le constater sur la figure III.34 ci-dessus, nous remarquons l'existence des dommages aussi bien dans la partie renforcée par des cadres en acier que dans la partie renforcée avec des composites. Ces dommages se propagent de manière symétrique et tendent à s'équilibrer : les deux résistances c'est-à-dire la résistance des composites et celle des cadres en acier se valent. Le PRF équilibre parfaitement les cadres en acier puisque les dommages apparaissent pratiquement de façon identique dans les deux parties de la poutre.

Avec cinq bandes, nous constatons l'effet du composite dans le mode de ruine. Le PRF a une marge supplémentaire par rapport aux cadres en acier, puisque les dommages de la partie renforcée par PRF sont moins importants que ceux de la partie ferrailée non renforcée. Les bandes composites ont commencé par travailler en poussant la poutre à avoir un cisaillement plus important dans la partie ferrailée non renforcée. La résistance des cadres en acier dans ce cas est moins importante que celle des cinq bandes composites. Plus la zone renforcée est rigide, moins les dommages sont importants et indirectement on pousse les fissures à se propager dans la zone moins rigide. En comparant ce modèle au modèle de référence, on remarque une apparition plus importante de cisaillement dans la zone non renforcée.

Le renforcement avec neuf (09) bandes composites disposées trois par trois semble être une bonne solution car le résultat du mode de rupture est plus que satisfaisant comme nous pouvons le remarquer sur la figure III.34 ci-dessus. Les dommages s'estompent encore plus. Plus on met de matière moins est endommagée la partie renforcée, car le composite reprend les efforts assurant ainsi une meilleure ductilité. Ce modèle, comparé au modèle de référence et aux autres modèles renforcés est celui qui présente un très bon mode de rupture. Le mode de cisaillement que présentait le modèle de référence dans la partie non renforcée est quasiment absent. Les 09 composites, grâce à leur disposition et à leur très bonne résistance, ont poussé les dommages à se répandre dans la partie ferrailée non renforcée.

Dans le cas du renforcement total, on voit clairement que les composites ont commencé par travailler. En effet, les dommages qui étaient presque répartis équitablement dans le modèle précédent (renforcement avec trois (03) bandes composites) se concentrent cette fois-ci à droite de la poutre, c'est-à-dire dans la partie ferrailée non renforcée. Ce transfert des dommages s'explique par le bon fonctionnement des composites qui ont une plus grande résistance comparée à celle des cadres en acier. Cet empêchement de la propagation du dommage s'explique également par la rigidité de la zone renforcée. L'enveloppe est très rigide, mais ce n'est pas pour autant que cela améliore la résistance et la ductilité de la poutre (sa courbe est en dessous de toutes les autres des poutres renforcées). Ceci laisse penser que le renfort total n'est pas la meilleure solution au problème de cisaillement. C'est ainsi que se conforte aussi, l'idée que pour le renforcement en cisaillement, il y'a finalement une disposition optimale qu'il faut aller chercher entre le cas non renforcé et renforcé avec enveloppe entière

Nous remarquons toutefois l'apparition d'une fissure à gauche de la poutre totalement renforcée. Elle correspond en fait au cadre en acier qui est posé à cet endroit. D'ailleurs il y'a des dommages à cet endroit pour tous les cas renforcés, sauf qu'elle est un peu plus prononcée dans le cas du renforcement total.

L'exemple considéré ci-dessous nous permet de mieux mettre en évidence l'intérêt de ce renforcement et surtout la qualité du matériau utilisé. En effet, pour un même step considéré (le troisième step dans ce cas), nous remarquons toujours l'existence des modes de cisaillement dans le modèle de référence. Les fissures sont déjà importantes à ce stade comme le montre la figure III.35 ci-après.

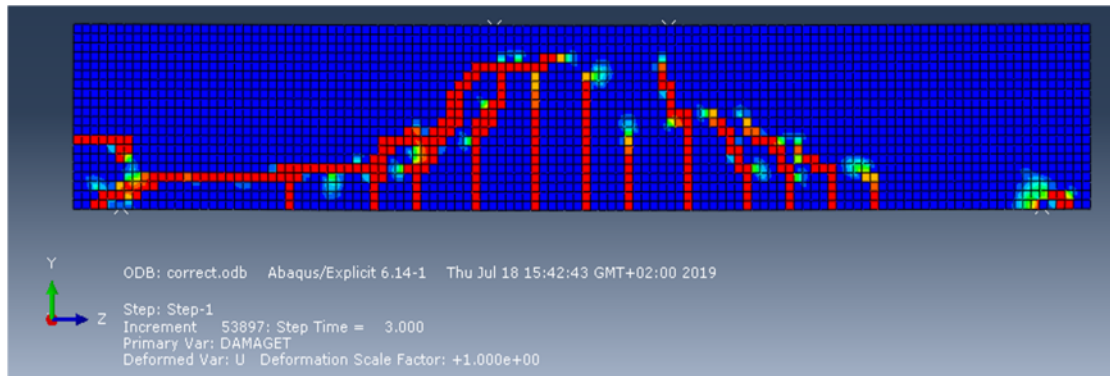


Figure III.35 : Evolution du mode de rupture du modèle de référence

Par contre pour tous les quatre modèles renforcés (on a considéré ici le modèle renforcé avec trois bandes), ces modes de cisaillement sont moins importants et tendent à disparaître. Cette différence explique l'apport des PRF en termes de résistance mais surtout de ductilité. Les matériaux ont commencé par influencer sur la poutre bien avant d'atteindre le step final fixé à 5.

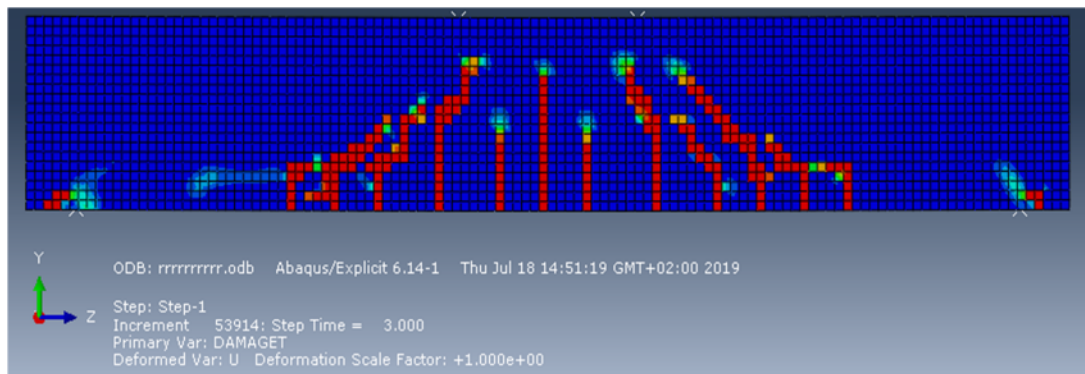


Figure III.36 : Evolution du mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes

Même si numériquement l'apport des PRF en matière de résistance est à déplorer, nous observons tout de même que physiquement, ils apportent un gain considérable en termes de ductilité.

III.7 Évolutions des déplacements globaux

Les déplacements globaux et les dégradations de la rigidité lors de la simulation sont représentés sur les figures III.37 et III.38 ci-après. Nous avons choisi d'étudier dans cette partie le déplacement global de la poutre de référence et celui de la poutre renforcée avec trois bandes composites. Au même incrément et avec un même chargement de 25KN, les résultats ne sont pas forcément identiques.

III.7.1 Poutre de référence

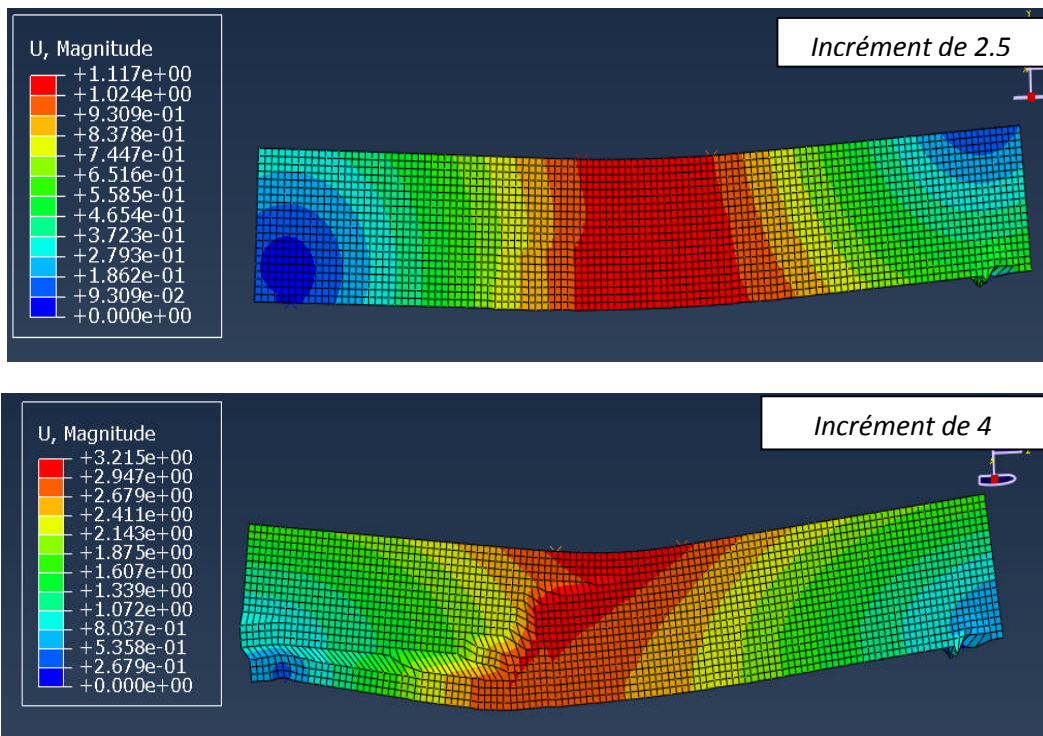


Figure III.37 : Evolution des déplacements globaux de la poutre de référence

III.7.2 Poutre renforcée avec trois bandes composites

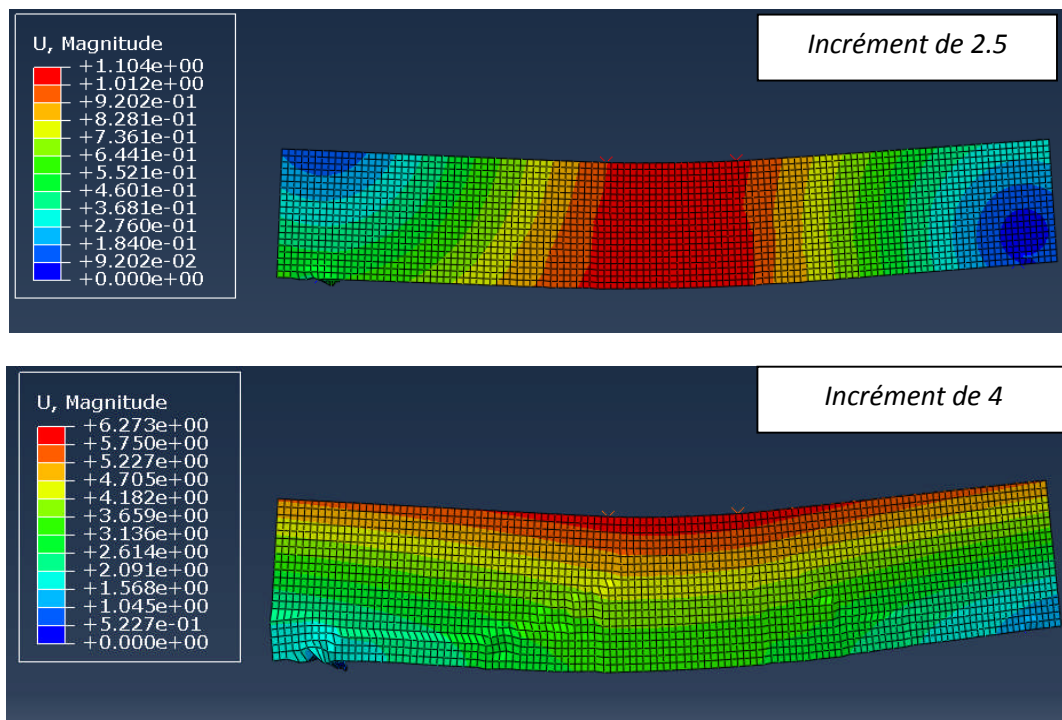


Figure III.38 : Evolution des déplacements globaux de la poutre renforcée avec 3 bandes

Nous constatons d'après ces résultats que la poutre renforcée avec trois bandes de composite possède un meilleur comportement en termes de déplacement par rapport à celle de référence avec un ferrailage simple. La flèche de rupture de la poutre de référence, lorsqu'on considère un incrément de 4, est inférieure (3.21 mm) à celle de la poutre renforcée (6.27 mm). Cette valeur explique le gain de la ductilité.

III.8 Conclusion

La modélisation numérique par la méthode des éléments finis simule bien le comportement des poutres en béton armé vis-à-vis de la charge ultime en cisaillement. L'évolution des dommages de traction et de compression est progressive et proportionnelle à l'augmentation de la charge appliquée. Les quatre modèles renforcés étudiés présentent tous un mode de rupture en cisaillement proche de celui du modèle de référence avec en plus un gain important de déformabilité et mettent ainsi en valeur l'importance d'utiliser les PRF pour assurer le renfort interne. Les courbes force-déplacement des modèles renforcés ont une bonne correspondance avec celle du modèle de référence. Nous constatons également d'après les résultats des modes de rupture que le renforcement total n'est pas une bonne option car à force de trop renforcer une zone, on fini par provoquer des ruptures dans des zones non endommagées. Les modèles renforcés qui ont présenté de meilleurs résultats en termes de déformabilité et de résistance sont ceux dans lesquels on a utilisé neuf bandes et cinq bandes.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

La durabilité des ouvrages d'art est aujourd'hui un sujet incontournable : après quelques accidents spectaculaires survenus dans les cinq continents et pour des ponts de toute nature, les ingénieurs ont pris conscience de l'importance de l'entretien en même temps qu'ils étaient amenés à entreprendre des opérations souvent très lourdes de renforcement des ouvrages.

Le premier chapitre de ce travail de recherches réservé à l'étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'intérêt des composites textiles-mortiers et leurs performances en termes de résistance en traction, couplée à de faibles ouvertures de fissures. Elle a confirmé l'efficacité du renforcement au cisaillement des poutres en béton armé par des renforts des matériaux composites par des méthodes de renforcement telles que le collage externe, le collage dans les rainures en surface du béton, etc.

Les deux derniers chapitres qui constituent l'essence même de ce projet sont basés sur une analyse de modélisation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel Abaqus pour le renforcement au cisaillement d'une poutre en béton armé. Nous avons d'abord conçu le modèle numérique de référence avant de concevoir les quatre autres modèles numériques renforcés pour simuler leur comportement mécanique sous chargement.

Les matériaux composites améliorent de façon conséquente les performances mécaniques des structures en béton armé. Le décollement et le délaminage de la plaque de renforcement causés par une forte concentration aux bords de la poutre sont les principaux problèmes observés lors du renforcement externe. Les limites de cette technique de renforcement nous poussent à penser à un autre type de renforcement innovant et moins connu jusqu'à présent : le renforcement interne. Le mécanisme consiste à enrouler les composites autour des armatures de traction et de compression avant le coulage. Il permet de réduire le poids propre de la structure et d'améliorer ses performances mécaniques notamment sa résistance mécanique et sa déformabilité.

Les résultats du renforcement interne par composites PRF sont encourageants et de bon augure pour la suite des recherches plus approfondies. Ces travaux de recherche montrent que ce type de renforcement peut être aussi efficace que le renforcement externe. Même si sa mise en place est difficile du fait de sa disposition, son apport en matière de résistance mais surtout de déformabilité n'est pas à occulter.

PERSPECTIVES

Pour corroborer notre travail de recherches, des travaux complémentaires devraient être réalisés.

- Refaire le même travail de recherche en privilégiant la partie expérimentale. Les propriétés mécaniques introduites dans la simulation numérique doivent être identiques à celle trouvées dans les travaux expérimentaux.

- Etudier le comportement à long terme des structures en béton armé renforcées par les PRF notamment le fluage et la fatigue.
- Inclure l'effet d'encrage sur les composites PRF parmi les critères fondamentaux.
- Tenir comptes de l'adhérence entre les différents composants de la poutre développée en intégrant dans les simulations numériques des modèles de glissement.
- Refaire le même travail en flexion et comparer les résultats avec les modèles ayant subi un renforcement externe.
- Afin de mettre en valeur l'utilisation des matériaux composites dans les travaux de réhabilitation et de réparation, il serait indispensable de faire une étude technico-économique approfondie pour démontrer la rentabilité de cette technique.
- Il serait intéressant de tester l'effet du renforcement avec PRF en présence d'un ferrailage transversal minimum, pour évaluer l'effet de l'interaction des cadres en acier et du PRF sur le comportement des poutres renforcées.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Tissu à base de fibre de verre

Figure I.2 : Tissu à base de fibres de carbone

Figure I.3 : Tissu à base de fibres de basalte

Figure I.4 : Tissu à base de fibres d'aramide

Figure I.5 : Exemples de tricotage à maille jetée multiaxial

Figure I.6 : Exemple d'un canevas

Figure I.7 : Grille à maille jetée à trois dimensions

Figure I.8: Différentes caractéristiques de maillage du tissu

Figure I.9 : Exemple de tressage 2D, tressé circulaire

Figure I.10: Illustration d'un textile collé sans passer par le tricotage, le tissage ou le tressage

Figure I.11: Phases du comportement d'une poutre en béton armé fléchie renforcée par composite

Figure I.12 : Configuration latérale du renforcement à l'effort tranchant

Figure I.13 : Configuration transversale du renforcement à l'effort tranchant

Figure I.14 : Rupture en cisaillement d'une poutre

Figure I.15 : Rupture en cisaillement d'un mur (séisme de Turquie, mai 2003)

Figure I.16 : Renforcement en cisaillement d'une poutre

Figure I.17 : Poutre en béton armé réparée par collage de composite, endommagé par cisaillement (Croston [84]).

Figure II.1 : Ferrailage adopté pour la poutre

Figure II.2 : Discrétisation par éléments finis

Figure II.3 : Interface Abaqus/CAE

Figure II.4 : Module Part

Figure II.5 : Modélisation du matériau béton

Figure II.6: Module Assembly

Figure II.7: Module Step

Figure II.8 : Présentation du modèle numérique de référence

Figure II.9 : Présentation des modèles renforcés

Figure II.10 : Comportement de l'acier

Figure II.11 : Géométrie des éléments

Figure II.12 : Contact béton-composite

Figure II.13 : Maillage des éléments

Figure II.14 : Poutre en béton armé soumis à la flexion quatre points

Figure III.1 : Etat de contrainte du modèle numérique de référence

Figure III.2 : Mode de rupture du modèle de référence

Figure III.3 : Courbe force-déplacement du modèle de référence

Figure III.4 : Espacement entre les bandes composites du modèle renforcé avec 3 bandes de PRF

Figure III.5 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes

Figure III.6 : Mode de rupture Modèle renforcé avec 3 bandes

Figure III.7 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes

Figure III.8 : Espacement entre les bandes composites du modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

Figure III.9 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 5 bandes

Figure III.10 : Mode de rupture Modèle renforcé avec 5 bandes

Figure III.11 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 5 bandes

Figure III.12 : Espacement entre les bandes composites du modèle renforcé avec 5 bandes de PRF

Figure III.13 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 9 bandes

Figure III.14 : Mode de rupture Modèle renforcé avec 9 bandes

Figure III.15 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 9 bandes

Figure III.16 : Disposition de la bande PRF du modèle totalement renforcé

Figure III.17 : Etat de contrainte du modèle totalement renforcé

Figure III.18 : Mode de rupture du modèle totalement renforcé

Figure III.19 : Courbe Force-Déplacement du modèle totalement renforcé

Figure III.20 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de 6mm d'épaisseur

Figure III.21 : Mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes de 6mm d'épaisseur

Figure III.22 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de 6mm d'épaisseur

Figure III.23 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de 9mm d'épaisseur

Figure III.24 : Mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes de 9mm d'épaisseur

Figure III.25 : Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de 9mm d'épaisseur

Figure III.26: Confrontation des courbes force-déplacement

Figure III.27 : Etat de contrainte du modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

Figure III.28: Mode de rupture du modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

Figure III.29: Courbe Force-Déplacement du modèle renforcé avec 3 bandes de 60mm de largeur

Figure III.30 : Confrontation des courbes force-déplacement

Figure III.31 : Evolution des dommages dus à la traction

Figure III.32 : Évolution des dommages de traction

Figure III.33 : Confrontation des courbes force-déplacement

Figure III.34 : Comparaison des modes de ruine des différents modèles

Figure III.35 : Evolution du mode de ruine du modèle de référence

Figure III.36 : Evolution du mode de ruine du modèle renforcé avec 3 bandes

Figure III.37 : Evolution des déplacements globaux de la poutre de référence

Figure III.38 : Evolution des déplacements globaux de la poutre renforcée avec 3 bandes

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Récapitulatif des résistances mécaniques des composites classiques

Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles

Tableau II.1 : Récapitulatif des variantes testées

Tableau II.2 : Tableau des unités

Tableau II.3 : Caractéristiques mécaniques du béton

Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques de l'acier

Tableau II.5 : Taille des maillages

Tableau III.1 : Résultats de l'effet de l'épaisseur du PRF

Tableau III. : Tableau récapitulatif des valeurs des différents modèles

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Taljsten, B.**, « Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete », *International Journal of Adhesion Adhesives*, vol 17 n°4, 1997.
- [2] **V. Sierra-Ruiz, J.-F. Destrebecq, Michel Grédiac**, « The transfer length in concrete structures repaired with composite materials: A survey of some analytical models and simplified approaches », *Composite Structures*, 2002.
- [3] **Thanasis Triantafillou, N. Plevris**, « Strengthening of RC Beams with Epoxy-Bonded Fiber-Composite Materials », *Material and Structures*, may 1992, page 201-211.
- [4] **H.N. Graden, R.J. Quantrill, L.C. Hollaway, Anthony Thorne, G.A.R. Parke** « Experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams », *Construction and Building Materials*, 1998, 12, page 203-219.
- [5] **Thierry Chaussadent et Jean-Luc Clément**, « Renforcement des ouvrages en béton par collage de composites : bilan de deux opérations de recherche du LCPC », mars 2006
- [6] **Emmanuel Ferrier**, « Comportement de l'interface composite/béton sous des sollicitations de fluage thermo-stimulé et en fatigue oligocyclique : application au calcul prévisionnel de la durabilité de poutres BA renforcées », thèse soutenue à l'Université Claude Bernard Lyon I sous la direction de Patrice Hamelin, Décembre 1999.
- [7] **Mark Green, Aaron J.S Dent, Luke A. Bisby, Y.Beaudoin, P.Labossiere**, "Effect of freeze-thaw cycles on the bond durability between fibre reinforced polymer plate reinforcement and concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, February 2000.
- [8] **Y.Beaudoin, P.Labossiere and K.W. Neale**, "Wet-dry action on the bond between composites materials and reinforced concrete beams", 1st International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer(FRP) Composites for Construction, Sherbrooke, Canada, 1998.
- [9] **V.M.Karbhari, M. Engineer, D.A Eckel II**, « On the durability of composite rehabilitation schemes for concrete: use of a peel test », *Journal of Materials Science* n°32, p 147-156, 1997.
- [10] **Geng Ze-Jun, Chajes Michael J., Chou Tsu-Wei and Pan David Yen-Cheng**, « The retrofitting of reinforced concrete column-to-Beam connection », *composite science and technology*, page 1297-1305, vol n°58, 1998.
- [11] **Jean-Armand Calgaro et Roger Lacroix**, « Maintenance et réparation des ponts », *Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées*, juillet 1997.
- [12] **V. P. V. Rahman, T Kan , S. E. Morton, P.K. Dutta, A. Mukherjee, Y.M. Desai**, "Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening", *Composites Part B: Engineering*, p 461-470, vol 31, October 2000.
- [13] **Ninh T Nghuen, D. J. Ohelers, M. A. Bradford**, «An analytical model for reinforced concrete beams with bolted side plates accounting for longitudinal and transverse partial interaction», *International Journal of solids and Structures*, 38 (2001) 6985-6996.

- [14] **Oualid Limam**, «Dalles en béton armé renforcées par des matériaux composites», Approches aux états limites et essais, 2010.
- [15] **Claire Girard, Marie-Laure Dano, André Picard and Guy Gendron**, « Bearing Behavior of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates: Part I: Strength and Local Strains », Mechanics of Advanced Materials and Structures, November 2010.
- [16] **Jan Wastiels and Georges Patfoort**, « Mineral Polymer Matrix Composites”, Université Libre de Bruxelles, 1999.
- [17] **P. Purnell**, « The durability of glass fibre reinforced cements made with new cementitious matrices», Aston University, 1998.
- [18] **Van de Velde, P. Kiekens and L. Van Langenhove** « Basalt fibres as reinforcement for composites », University of New Orleans, 2003.
- [19] **Abdelmadjid SI SALEM**, « Développement d’une poutre en béton composite : analyse expérimentale et modélisation », thèse soutenue à l’Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou sous la présidence de monsieur BALI Abderrahim, mars 2016.
- [20] **Ba Tam Truong**, « Formulation, performances mécaniques et application d’un matériau TRC pour le renforcement et la réparation de structures en béton et / béton armé : approches expérimentale et numérique », thèse de doctorat soutenue à l’Université de Lyon, juillet 2016.
- [21] **Phi Long NGUYEN**, « Experimental and numerical study on thermo-mechanical behaviour of carbon fiber reinforced polymer and structures reinforced with CFRP», thèse soutenue à l’Université Claude Bernard Lyon I sous la direction du Professeur Catherine A. DAVY, juillet 2018.
- [22] **NGO Minh Duc**, «Renforcement au cisaillement des poutres en béton armé par des matériaux composites naturels (fibre de lin)», thèse soutenue à l’Université Claude Bernard Lyon I, septembre 2016.