



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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Génie civil**

Spécialité : **Structures**

Présentée par : **Merhouni Ryim**

Hallas Bouchra

Thème

Comportement Des Poutres En Béton Armé Renforcées Avec Des Plaques En PRFC

Soutenu le,

Devant le Jury :

Adim Belkacem	Président	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
Bouزيد Haytham	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
Bourada Fouad	Examineur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

*Avant de présenter ce travail, Premièrement nous remercions **ALLAH** qui nous a amène jusqu'à la fin de ce modeste travail.*

*Nous présentons nos sincère remerciements les plus respectueux et notre gratitude sont également adressés à notre encadreur Docteur « **BOUZID HAYTHAM** » pour leurs conseils durant cette année.*

*Nos plus vifs remerciements à Monsieur « **ADIM BELKACEM** » et Monsieur « **BOURADA FOUAD** » les membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail.*

*Ainsi à tous les enseignements de la faculté des **SCIENCES ET TECHNOLOGIES** sans exception.*

D'autre part, nous remercions tous les personnes qui nous ont encouragé pour suivre nos études.



Dédicace Ryim

Je tiens avec grande plaisir à dédier ce modeste travail :

*A ma source d'amour et de motivation Mon père
et Ma mère, qui m'ont soutenu et encouragé à
aller de l'avant durant mes années d'étude.*

*A mon cher frère Ali, et mes petites sœurs
Yasmin, Tasnim et Tasbih.*

A mon âme sœur, mon fiancé Farid.

*A toute ma famille, mes amies et les plus chers de ma vie sans
exception*

A toute la promotion 2022 Génie civil

A tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite

A ma binôme BOUCHRA qui a contribué à la réalisation de ce

modeste travail et mes amies proches Nariman et Insaf.

*Enfin : A toute personne qui occupe une place
dans mon cœur.*

RYIM



Dédicace Bouchra

Je dédie ce présent mémoire :

A mes parents ;

A toute ma famille sans exception ;

A mes amies ;

A toutes la promotion 2022 Génie Civil ;

*A tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte
de la réussite ;*

*A mon binôme « **RYIM** » qui a contribué à la réalisation de ce
modeste travail ;*

Enfin : A tous ceux qui sont très chers.



BOUCHRA

Résumé

L'étude de comportement des éléments en béton armé est compliquée à cause de la non linéarité des matériaux surtout à l'état plastique. De plus en plus, l'ajout d'autres matériaux rend l'élément plus compliqué. Dans ce cadre, les poutres en béton armé renforcées avec des matériaux composites est l'un des systèmes compliqués qui a pris l'attention des chercheurs. Récemment, les chercheurs utilisent des différents programmes numériques pour résoudre les problèmes liés à ce type d'éléments, où la plupart des programmes fonctionnent à la base de la méthode des éléments finis. Dans ce contexte, l'objectif principal de cette recherche est l'étude du comportement élastique et plastique des poutres en béton armé renforcées avec des plaques en PRFC, en utilisant le logiciel Castem 2000 version 18. L'étude est réalisée en 2D à l'aide de l'élément triangulaire 3. En premier lieu, la création de la géométrie des poutres ainsi que les lignes des armatures et de la plaque. Ensuite, l'introduction des propriétés des matériaux et les conditions aux limites et celles de chargement. Enfin, l'exécution des calculs et l'extraction des résultats. Les résultats obtenus ont montré que le module élastique et l'épaisseur des plaques ont influé positivement la résistance globale des poutres, mais, ils ont un effet négatif sur la ductilité des poutres.

Mots clés : Castem 2000, Poutre, Plaque, PRFC, Béton armé, Comportement.

Abstract

The study of the behavior of reinforced concrete elements is complicated because of the non-linearity of materials, especially in the plastic range. Moreover, the addition of other materials makes the element more complicated. In this field, reinforced concrete beams strengthened with composite materials is one of the complicated systems that has taken the attention of researchers. Recently, researchers are using different numerical programs to solve problems related to this type of elements, where most of programs are based on the finite element method. In this context, the main objective of this research is to study the elastic and plastic behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates, using Castem 2000 software version 18. The study is carried out in 2D model using the triangular element with 3 nodes. First, the creation of the geometry of the beams as well as the lines of the reinforcements and the CFRP plate. Then, the introduction of material properties, boundary and loading conditions. Finally, the execution of the calculations and the extraction of the results. The results obtained showed that the elastic modulus and the thickness of the plates had positively influenced the overall strength of the beams, but they have a negative effect on the ductility of the beams.

Keywords: Castem 2000, Beam, Plate, CFRP, Reinforced concrete, Behavior.

ملخص

دراسة سلوك العناصر الخرسانية المسلحة معقدة بسبب عدم خطية المواد، خاصة في المجال البلاستيكي الغير مرن. أكثر فأكثر، فإن إضافة مواد أخرى تجعل العنصر أكثر تعقيداً. في هذا السياق، تعد روافد الخرسانة المسلحة المعززة بمواد مركبة أحد الأنظمة المعقدة التي لفتت انتباه الباحثين. في الأونة الأخيرة، استخدم الباحثون برامج رقمية مختلفة لحل المشكلات المتعلقة بهذه الأنواع من العناصر، حيث تعتمد معظم البرامج على طريقة العناصر المنتهية. وفي هذا السياق، يتمثل الهدف الرئيسي لهذا البحث في دراسة السلوك المرن والبلاستيكي للروافد الخرسانية المسلحة المعززة ببلوحات الياف الكربون، باستخدام برنامج Castem 2000 الإصدار 18. يتم إجراء الدراسة في معلم ثنائي الأبعاد باستخدام العناصر المثلثية ثلاثية العقد.

أولاً، يتم إنشاء هندسة الروافد وكذلك خطوط التعزيزات وشفيحة الكربون. ثم إدخال خصائص المواد والمساند والتحميل. أخيراً، إجراء الحسابات واستخراج النتائج. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن معامل المرونة وسمك الصفائح أثرا بشكل إيجابي على تحمل الروافد، لكن كان لهما تأثير سلبي على المرونة.

الكلمات المفتاح: Castem 2000، رافده، شفيحة، الياف الكربون، الخرسانة المسلحة، السلوك.

Résumé	I
Sommaire	IV
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	VIII
Notaions et symboles	X
Introduction	1

CHAPITRE I : INTRODUCTION ET CARACTERISTIQUES DE FRP

I.1. Introduction	5
I.2. Matériaux composites	5
I.2.1. Définition	5
I.2.2. Constituants des matériaux composites	6
I.2.3. Propriétés du composite	10
I.2.4. Classification des matériaux composites	11
I.2.5. Matériaux composites structuraux	11
I.2.6. Applications des matériaux composites « PRF » en génie civil	12
I.2.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites	12
I.3. Matériaux PRF	12
I.4. Intérêt des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment et les travaux publics	13
I.5. Fibres de carbone	13
I.5.1. Définition	13
I.5.2. Processus et éléments de base de la production	14
I.5.3. Propriétés thermomécaniques et physico-chimiques	15
I.5.4. Avantages et inconvénients des fibres des carbonés	17
I.5.5. Domaine d'application de PRFC	17
I.5.6. Utilisations dans le domaine de construction	18
I.6. Plaques en PRFC	18
I.6.1. Description	18
I.6.2. Domaines d'utilisation	18
I.6.3. Avantages des plaques en PRFC	19
I.7. Conclusion	20

CHAPITRE II : TYPES DE RENFORCEMENT

II.1.	Introduction	22
II.2.	Renforcement.....	22
II.3.	Types de renforcement.....	23
II.3.1.	Renforcement avec des barres.....	23
II.3.1.1.	Barres en carbone (PRFC).....	23
II.3.1.2.	Barres en verre (PRFV).....	26
II.3.1.3.	Barres en Aramide (PRFA).....	26
II.3.2.	Renforcement avec des plaques.....	26
II.3.2.1.	Renforcement par collage de plaques composites.....	26
II.3.3.	Renforcement avec en tissu.....	32
II.3.3.1.	Tissu de fibres de carbone (TFC).....	32
II.3.3.2.	Tissu en fibres en verre.....	36
II.4.	Conclusion.....	39

CHAPITRE III : MODELISATION

III.1.	Introduction.....	41
III.2.	Présentation du Logiciel.....	41
III.2.1.	Définition.....	41
III.2.2.	Organisation d'un calcul	42
III.2.2.1.	Préparation du modèle de calcul.....	42
III.2.2.2.	Résolution du système d'équations	43
III.2.2.3.	Traitement des résultats.....	43
III.3.	Modélisation.....	44
III.3.1.	Hypothèse de modélisation.....	45
III.3.2.	Géométrie.....	45
III.3.3.	Conditions aux limites.....	46
III.3.4.	Chargement.....	46
III.3.2.	Caractéristiques des matériaux.....	46
III.4.	Validation du programme.....	47
III.5.	Conclusion.....	48

CHAPITRE IV : ETUDE PARAMETRIQUE

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Détails des poutres.....	50
IV.3. Etude paramétrique.....	51
IV.3.1. Effet du module d'élasticité des plaques ($E_{f_{rp}}$).....	51
IV.3.2. Effet de l'épaisseur des plaques ($ep_{f_{rp}}$).....	57
IV.3.3. Effet de la limite élastique des plaques ($F_{f_{rp}}$).....	65
IV.4. Conclusion.....	70
Conclusion générale	71
Références	73

Tableau 1.1 :	Avantages et inconvénients des matériaux composites	12
Tableau 1.2 :	Caractéristique des fibres de carbone	16
Tableau 1.3 :	Propriétés en traction des fibres de carbone	16
Tableau 1.4 :	Avantages et inconvénients des fibres de carbone	17
Tableau 2.1 :	Mise en place du confinement par tissu TFC	35
Tableau 3.1 :	Détails des poutres	47
Tableau 3.2 :	Flèches élastiques expérimentales et numériques	48
Tableau 3.3 :	Flèches ultimes expérimentales et numériques	48
Tableau 3.4 :	Forces maximales expérimentales et numériques	48
Tableau 4.1 :	Résultats de l'effet du module d'élasticité des plaques (E_{fip})	54
Tableau 4.1 :	Effet d'épaisseur des plaques (ep_{fip})	61
Tableau 4.1 :	Effet de la limite élastique des plaques (F_{fip})	67

Figure 1.1 :	Exemple d'un matériau composite	5
Figure 1.2 :	Différents types des fibres	8
Figure 1.3 :	Différentes familles de matrice	10
Figure 1.4 :	Fibres de carbone	13
Figure 1.5 :	Processus de fabrication du PAN et des fibres de carbone.....	15
Figure 1.6 :	Plaques en PRFC.....	19
Figure 2.1 :	Renforcement par collage de plaques composites.....	27
Figure 2.2 :	Réparation avec du mastic.....	28
Figure 2.3 :	Collage des plaques en Frp.....	29
Figure 2.4 :	Tissu de fibres de carbone.....	32
Figure 2.5 :	Domaine d'application de Tissu de fibres de carbone.....	33
Figure 2.6 :	Tissu en fibres en verre.....	37
Figure 2.7 :	Technologie d'application de tissu de fibre de verre.....	38
Figure 3.1 :	Organigramme du modèle de calcul.....	42
Figure 3.2 :	Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul.....	44
Figure 3.3 :	Maillage de la poutre.....	46
Figure 3.4 :	Chargement de la poutre.....	46
Figure 4.1 :	Détails de la poutre étudiée.....	46
Figure 4.2 :	Diagrammes F- Δ en fonction de l'effet du module d'élasticité.....	50
Figure 4.3 :	Effet d' E_{frp} sur Δ_y	53
Figure 4.4 :	Effet d' E_{frp} sur F_y	54
Figure 4.5 :	Effet d' E_{frp} sur F_{max}	55
Figure 4.6 :	Effet d' E_{frp} sur Δ_u	56
Figure 4.7 :	Effet d' E_{frp} sur μ_Δ	56
Figure 4.8 :	Diagrammes F- Δ en fonction de l'effet du l'épaisseur.....	60
Figure 4.9 :	Variation du Δ_y en fonction d' ep_{frp}	61
Figure 4.10 :	Variation du F_y en fonction d' ep_{frp}	62
Figure 4.11 :	Variation du F_{max} en fonction d' ep_{frp}	63
Figure 4.12 :	Variation du Δ_u en fonction d' ep_{frp}	63
Figure 4.13 :	Variation de la ductilité μ_Δ en fonction d' ep_{frp}	64
Figure 4.14 :	Diagrammes F- Δ en fonction de l'effet du la limite élastique	66
Figure 4.15 :	Variation du Δ_y en fonction	67
Figure 4.16 :	Variation du F_y en fonction F_{frp}	68

Figure 4.17 :	Variation du F_{\max} en fonction F_{frp}	69
Figure 4.18 :	Variation du Δ_u en fonction F_{frp}	69
Figure 4.19 :	Variation du μ_{Δ} en fonction F_{frp}	70

Symboles	Signification
CFRP	Polymère renforcé par fibres de carbone
HR	Haute résistance
HM	Haut module
PREV	Fibres de verre
PRFA	Fibres d'aramides
PRFB	Fibres de basaltes
TD	Résines thermodurcissables
TP	Résines thermoplastiques
UP	Résines polyesters
EP	Résines époxyde
PIRP	Résines polyamides thermodurcissables
PF	Résines phénoliques
PRF	Polymère renforcé avec des fibres
PEEK	Polyester-éther-Cétone
PPS	Polypropylène
PSUL	Poly sulfone
PAN	Poly acrylonitrile
IM	Fibres à module intermédiaires
THM	Fibres de très haut module
TFC	Tissu de fibres de carbone
η	Coefficient de comportement
ϕ	Diamètre
Cast3M	Castem
E.F	Eléments finis
SEMT	Service d'études mécaniques et thermiques
DMS2	Département de modélisation des systèmes et structures
DMT	Département de mécanique et de technologie
CEA	Commissariat français à l'Energie atomique

E_{frp}	Module d'élasticité des plaques
e_{pfrp}	Épaisseur des plaques
F_{frp}	Limite élastique des plaques
Δ_y	Flèche élastique
F_y	Limite élastique des poutres
F_{max}	Force maximale obtenue en fonction de la variation du module
Δ_u	Flèche ultime
μ_{Δ}	Ductilité de déplacement

Introduction

Différentes recherches ont été menées sur la technique de renforcement ou de réparation des poutres en béton armé. Les recherches ont été focalisées sur le comportement de ce type de poutres, en particulier sur la nouvelle capacité après le renforcement et sur le mode de rupture (**Bazan et Victor 2020**).

Dans la pratique courante, les poutres en béton armé sont souvent renforcées par des plaques en matériaux composites dans la partie inférieure, c-à-d, la face de la partie tendue. L'utilisation des plaques en polymère renforcé de fibres de carbone (**PRFC**) est la plus répandue vue aux nombreux avantages présentés, puisqu'elles affichent un rapport résistance-poids très élevé et ne corrodent pas. Ainsi, les plaques en PRFC peuvent à la fois servir au renforcement en flexion et en cisaillement (**Spadea et al 1998**).

Les chercheurs ont étudié les problèmes liés à ce type de poutres expérimentalement, numériquement ou théoriquement, où les méthodes numériques et théoriques ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs pour gagner du temps et l'économie des matériaux et de l'argent. Dans ce contexte, les recherches numériques ont utilisé des programmes basés principalement sur la méthode des éléments finis (MEF).

Dans ce cadre, l'objectif principal de la présente recherche est l'étude numérique de comportement des poutres en béton armé renforcées par des plaques en PRFC. La recherche comprend les domaines élastique et plastique. Dans ce contexte, le logiciel Castem2000 version 18 est choisi pour mener cette recherche. Ce logiciel est basé sur la MEF, où il est destiné aux chercheurs de la mécanique des structures et des fluides. Le programme construit est basé d'une part sur le modèle « Mazars » du béton endommagé, d'autre part, les éléments barres et coques sont respectivement utilisés pour modéliser les barres de renforcement longitudinales et la plaque en PRFC.

Pour atteindre l'objectif principal de cette recherche, le présent mémoire est organisé en trois parties, à savoir :

- La partie bibliographique qui comprend les deux premiers chapitres à la fois. Par le biais du premier chapitre, elle présente une introduction et les différentes caractéristiques de polymère renforcé de fibres (FRP). D'autre part, à travers le deuxième chapitre, elle présente les différentes méthodes de renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites.

- La deuxième partie qui définit le logiciel utilisé, les paramètres étudiés, la construction du programme sur le Castem, ainsi que sa validation.
- La troisième partie qui présente les résultats de l'étude paramétrique à savoir, les flèches élastique et ultime, ainsi que la capacité et la ductilité des poutres renforcées.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats et remarques trouvés et quelques perspectives pour les futures recherches.

CHAPITRE I

Introduction et caractéristiques de FRP

I.1. Introduction

Le présent chapitre fait l'objet d'identifier les matériaux composites. Ensuite, il met l'accent sur le sujet le plus important dans cette recherche, les fibres de carbone, l'historique, la définition du matériau, éléments de base de la production, propriétés, et domaine d'application. Ceci sera mentionné ci-dessous.

I.2. Matériaux composites

I.2.1. Définition

On peut définir un matériau composite comme un assemblage d'au moins deux éléments miscibles de nature différente dont les propriétés se complètent et bénéficient d'une synergie qui accroît les performances de la matière (Chayma, 2017). La matière composite étudiée est donc constituée de fibres représentant le renforcement et de résine représentant la matrice (Riad et al, 2013).

Il est possible de moduler les comportements mécaniques et physiques en modifiant les éléments suivants : la nature des composants, la proportion des composants et l'orientation des fibres.

Les fibres procurent les principales propriétés mécaniques du matériau composite, par exemple rigidité, la résistance et la dureté (Riad et al, 2013).

Un matériau composite consiste en un renforcement généralement sous forme de fibres minérales, organiques ou végétales qui assurent une résistance mécanique (résistance à la traction) et un liant. Appelée matrice habituellement sous forme d'une matière plastique (polymère) (Chayma, 2017).

Donc un matériau composite est constitué généralement d'une matrice et d'un renfort (Figure 1.1), qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser et qu'ils sont très hétérogènes et anisotropes (Abderrafik, 2021).

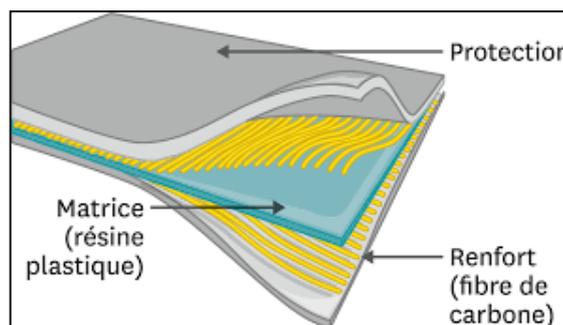


Figure 1.1: Exemple d'un matériau composite.

I.2.2. Constituants des matériaux composites

Les composites sont des matériaux synthétiques fabriqués avec des mélanges intimes de matériaux de différent état, composition, et forme. Leurs composants sont toujours clairement différenciés et gardent leur identité séparée. Cependant, ils travaillent de manière solidaire dans le composite, en réunissant des caractéristiques qui ne sont pas atteintes séparément (**Riad et al, 2013**).

a/-Les fibres

Les fibres (renforts) contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres.

Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances) (**Riad et al, 2013**).

➤ **Fibres de carbone (CFRP)**

Les fibres de carbone peuvent être extraites à partir de pétrole brut ou de charbon, ou par synthèse à partir de poly acrylonitrile. Il existe deux types de fibres de carbone, celles à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation.

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation. En outre, les fibres de carbone sont inertes à température ambiante ainsi que pour la plupart des agents chimiques.

➤ **Fibres de verre (PREY)**

Les fibres de verre sont moins chères et présentent une plus faible résistance mécanique une plus grande déformabilité, ce qui les rend la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Par contre Les plus grands inconvénients des fibres de verre sont les problèmes de relaxation (sensibilités à l'humidité) et leur dégradation par des phases alcalines, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées.

- Les différents types de fibres de verre, classés selon leurs applications spécifiques, sont :
 - Verre E (Electrique) possédant d'excellentes propriétés d'isolation électrique (le moins cher) ;
 - Verre S (Résistant) ayant de très hautes résistances et rigidité à la traction (le plus cher) ;
 - Verre C (Chimique) stable chimiquement dans les environnements acides ;
 - Verre AR (Alcali-Résistant) utilisé pour prévenir la corrosion l'attaque dans des matrices cimentaires.

➤ **Fibres d'aramides (PRFA)**

Les fibres d'aramide ont été introduites en 1971, elles sont obtenues à partir de polymères polyamides aromatisés. La structure de la fibre d'aramide est anisotrope et donne une plus grande résistance et un module dans la direction longitudinale de la fibre. Les fibres d'aramide sont produites par plusieurs fabricants sous différents noms de marque telles que :

- Kevlar (Dupont, USA); > Twaron (Akzo, Pays-Bas);
- Technora (Teijin, Japon): - SVM (Russie).

Comme avantage ces fibres ont une très grande ténacité qui leur confère une bonne résistance au choc et à la fatigue, et un comportement élastique en traction et ductile en compression. Cependant, Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées et aux radiations « ultra-violet ».

➤ **Fibres de basaltes (PRFB)**

Ces fibres sont obtenues par la transformation de laves d'origine volcanique. Elles sont composées de minéraux comme le plagioclase. Le pyroxène et l'olivine et présentent des propriétés chimiques très intéressantes, essentiellement ses résistances au feu.

Les fibres de basaltes sont utilisées dans des applications des barres d'armature en composite, les résultats des essais physiques ayant montré une résistance maximale à la traction jusqu'à (4) fois supérieure à la résistance à la traction d'une barre d'armature classique en acier (**Ghettah et Al, 2015**).



Fibres de verre



Fibres de carbone



Fibres d'aramides



Fibres de basaltes

Figure 1.2: Différents types des fibres.

b/- Matrices

La matrice est un polymère, thermodurcissable (le plus fréquent) ou thermoplastique. Elle a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi quelques fonctions comme la protection du renfort contre les conditions environnementales et les attaques externes, la répartition des charges et l'assemblage des fibres pour donner la forme voulue du composites (**Riad et al, 2013**).

-Les différents paramètres qui influencent les propriétés mécaniques des polymères sont :

- La température ;
- La forme et la distribution des masses moléculaires ;
- La cristallinité ;
- La fréquence.

1. Résines thermodurcissables (TD)

Elles sont associées à des fibres longues, leur structure à la forme d'un réseau tridimensionnel, dont la transformation est irréversible. Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites. Parmi ceux qui sont les plus utilisés (**Ghettah et Al, 2015**) :

- Les résines polyesters (UP) : sont généralement utilisées avec les fibres de verre ; les résines vinylester : sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes ;
- Les résines époxyde (EP) : qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone : les résines polyamides thermodurcissables (PIRP) pour des applications à haute température.
- Les résines phénoliques (PF) : utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes.

2. Résines thermoplastiques (TP)

Elles sont associées à des fibres courtes, et forment une structure réversible dont ils peuvent être recyclés et utilisés plusieurs fois. Malgré ces bonnes tenues mécaniques, elles présentent quelques inconvénients comme la mauvaise adhérence sur les fibres, la viscosité élevée et les coûts de fabrication (**Ghettah et Al, 2015**).

Les principales familles thermoplastiques utilisées dans les composites PRF sont :

- Le polyester-éther-cétone (PEEK).
- Le polypropylène (PPS).
- Le poly sulfone (PSUL).

Les différentes familles de matrice sont résumées dans le schéma de la **Figure 1.3**

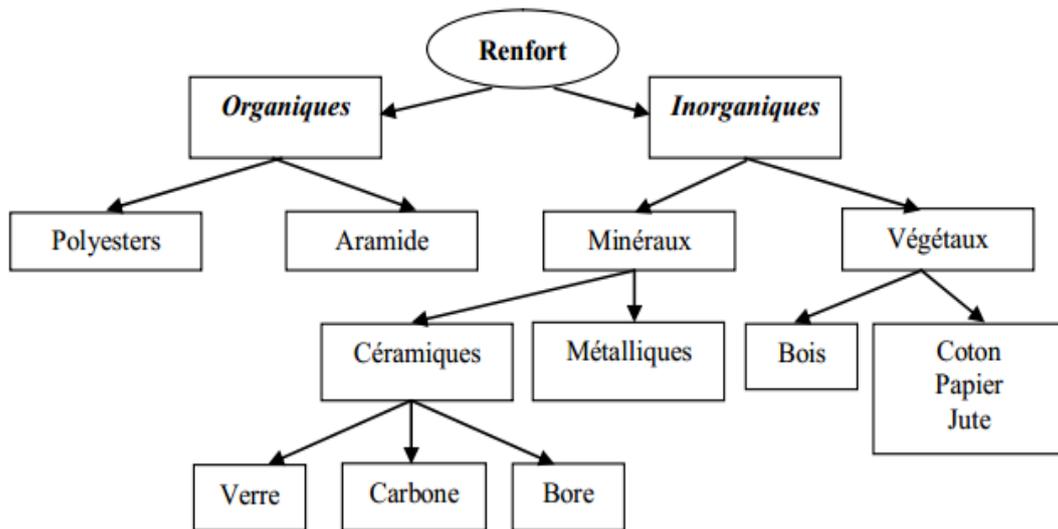


Figure 1.3 : Différentes familles de matrice. (Riad et al 2013).

c/-Interfaces

Afin d'assurer une compatibilité entre le renfort et la matrice l'utilisation d'une couche d'interface est indispensable qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine (Abderrafik, 2021).

Ces produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, qui peuvent jouer sur le comportement mécanique notamment, la résistance au cisaillement inter laminaire, la résistance à la corrosion et au vieillissement, et la tenue en fatigue et aux chocs, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. + Couche désigne couche supérieure, - couche désigne couche inférieure (Abderrafik, 2021).

I.2.3. Propriétés du composite

Les propriétés mécaniques du composite varient selon la matrice, les fibres utilisées, de leur distribution et de leur direction. Les composites contiennent en général entre 30 et 60 % de fibres. Les fibres peuvent être disposées toutes dans le même sens ou selon un quadrillage particulier ; désigné comme composite unidirectionnel ou multidirectionnel. Dans les expériences, un tissu de fibres de carbone bidirectionnel également appelé maillage à 90° sera utilisé (Florianne et Al, 2018).

Dans le cas d'un composite unidirectionnel, la résistance à la traction est supérieure dans la direction des fibres que dans la direction perpendiculaire. Il est donc primordial de placer le CFRP dans le sens adéquat (Florianne et Al, 2018).

I.2.4. Classification des matériaux composites

➤ Composites à fibres

Les matériaux composites renforcés de fibres sont des fibres continues ou discontinues sous forme de fibres coupées et de fibres courtes, etc. La disposition des fibres, leur orientation permettant de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites pour obtenir des matériaux s'étendant des matériaux fortement. Le concepteur possède donc un type de matériel à partir duquel il peut modifier et moduler à sa guise les comportements mécaniques et physiques en jouant sur (Abderrafik, 2021) :

- La nature des constituants.
- La proportion des constituants.
- L'orientation des fibres.

Le rôle des particules est très important dans l'interprétation du composite, il consiste à améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'élaboration, la diminution des retraits...etc. Dans de nombreux cas, les matières particulaires sont simplement utilisées comme charge afin de réduire le coût des matériaux sans réduire leurs propriétés (Riad et al, 2013).

➤ Composite à particules

Les matériaux composites sont des matières particulaires lorsque le renfort prend la forme de particules. Les particules, contrairement aux fibres, n'ont pas de dimensions préférées (Abderrafik, 2021).

I.2.5. Matériaux Composites Structuraux

La rigidité d'un composite dépend du nombre et de l'empilage des couches, de leur nature, de leur orientation, de leur séquence d'empilement, etc. Généralement les matériaux composites structuraux sont classés en trois catégories (Abderrafik, 2021) :

- Les monocouches
- Les stratifiés
- Les sandwichs
- Autre structures (structure 3D)

I.2.6. Applications des matériaux composites « PRF » en génie civil

Dans le génie civil, l'utilisation des matériaux composites occupe une grande part de plus en plus importante par rapport aux autres secteurs grâce à leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la rigidité et la résistance spécifiques, la résistance à la fatigue et à la corrosion (Riad et al, 2013).

En général, la technique d'utilisation des matériaux composites peut être utilisée pour améliorer la ductilité ainsi que d'autres propriétés, le type PRF polymère renforcée de fibres (Riad et al, 2013).

I.2.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les avantages et inconvénients principaux de l'utilisation de matériaux composites est résumé dans le **Tableau** suivant :

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients des matériaux composites (Chayma, 2017).

Avantages	Inconvénients
Légèreté Grande possibilité de maniement Insensibilité à l'humidité, la chaleur et la corrosion Bonne tenue aux agressions chimiques et naturelles (UV) Bonne tenue en fatigue Résistance et rigidité élevées Amortissement d'énergie	Sensibilités aux impacts Difficulté de réparation

I.3. Matériaux PRF

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « PRF » sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux qui donnent aux composites leur comportement hautement directionnel, imposant anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture (Riad et al, 2013).

I.4. Intérêt des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment et les travaux publics

L'intérêt des utilisations des polymères renforcés de fibres dans le génie civil se trouve essentiellement dans (Riad et al, 2013) :

- Sa faible densité ;
- Ses propriétés mécaniques longitudinales ;
- L'absence de corrosion ;
- Sa très bonne tenue à la fatigue ;
- Sa facilité de manipulation.

I.5. Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont fait leur apparition en 1880 grâce à T. Edison qui les utilisa comme filament dans les lampes. A partir de 1960, des recherches se sont orientées vers la conception de fibres de carbone de haut module et de haute résistance.

Les fibres de carbone peuvent être produites à partir de l'un des trois précurseurs suivants : la rayonne, le Poly acrylonitrile (PAN) et le brai de pétrole. Cependant, les fibres de carbone utilisées pour les renforts sont produites à partir de brai de mésophase ou de PAN (Chayma, 2017).

I.5.1. Définition

La fibre de carbone fait partie d'une famille de matériaux appelés les composites. Il s'agit de matériaux faits de deux ou plusieurs matériaux constitutifs qui demeurent séparés et distincts à l'échelle macroscopique tout en formant un seul composant. Autrement dit, les produits ne subissent pas de réaction chimique, mais demeurent deux entités chimiques séparées (Québec, 2007).

Les matériaux composites les plus primitifs comprenaient la paille et la boue utilisées afin de fabriquer des briques pour la construction de bâtiments (Québec, 2007).



Figure 1.4: Fibres de carbone.

I.5.2. Processus et éléments de base de la production

La production de fibres de carbone à partir de brai de mésophase nécessite tout d'abord de traiter thermiquement le brai isotope afin d'orienter les molécules poly aromatiques. Ensuite, le filage et l'étirage de cette mésophase sont réalisés pour l'obtention des fibres. Les difficultés rencontrées lors du filage et de l'étirage sont liées à la viscosité croissante de cette phase qui survient avec l'augmentation de la masse moléculaire de la mésophase (augmentation du taux de structures poly aromatiques orientées).

Les fibres ainsi formées présentent deux types de textures dont la structure "oignon" (alignements concentriques) est souhaitée en raison de sa meilleure résistance à la propagation des fissures. Les fibres sont ensuite oxydées puis carbonisées et graphitées. L'oxydation permet de rendre la fibre infusible avant de procéder à la carbonisation à 1500°C. Selon la qualité de la fibre de carbone recherchée, l'étape de graphitisation (jusqu'à 2000°C) est réalisée pour augmenter le module à la traction. La fabrication des fibres de carbone à partir de PAN passe par quatre étapes (voir **Figure 1.5**)

Tout d'abord, les fibres de PAN sont oxydées à des températures allant de 200 à 400°C pour un temps qui varie entre 30min et 3h. Cette étape a pour objectif de rendre les fibres de PAN infusibles en formant des cycles poly aromatiques. Ensuite, les fibres de PAN oxydées sont carbonisées sous atmosphère neutre d'azote à des températures allant de 1000 à 1500°C.

La carbonisation permet d'enrichir le matériau en carbone (95 % de carbone) et de modifier sa microstructure. La fibre est alors composée d'unités poly aromatiques de base mesurant environ 1 nm ce qui confère une structure organisée limitée. Finalement, la fibre carbonisée est ensuite graphitisée (portée à une température entre 1800 et 2000°C) afin d'augmenter son taux de carbone (99 % de carbone graphite). Cette étape conduit à une croissance et une orientation des cristaux nano scopiques dans l'axe longitudinal de la fibre. On obtient donc des filaments de 5 à 7 µm de section, très longs et ayant une très grande résistance à la traction.

La fibre de carbone ainsi obtenue (après carbonisation ou graphitisation) possède une mauvaise adhérence avec les polymères. En effet, les unités de base sont plus ou moins fortement liées chimiquement entre elles, ce qui réduit les propriétés d'adhérence de la surface. Les fibres subissent alors un traitement de surface qui est choisi en fonction de l'adhérence fibre/matrice requise. Le traitement peut être de nature physique (création de

rugosités de surface pour améliorer l'adhérence) ou de nature chimique (fonctionnalisation de la surface, modification de l'énergie inter faciale).

Enfin la manipulation des fibres de carbone nécessite, comme les fibres de verre, la mise en forme d'un fil de base. Ce fil est obtenu après ensimage de la fibre de carbone et par association de plusieurs fibres. Ces fils de base sont ensuite bobinés ou tissés. Industriellement, les fibres de carbone obtenues par le précurseur PAN sont technologiquement plus faciles à produire car les filaments de PAN donnent directement les fibres de carbone. Ce procédé continu est aussi très stable ce qui permet d'obtenir une qualité de fibre stable au cours de la production. De ce fait, les fibres sont principalement produites par ce procédé. Les fibres issues du précurseur brai de mésophase sont réservées exclusivement à la production de fibres de hauts modules d'élasticité mais ayant une résistance à la traction limitée. 95% des fibres de carbone fabriquées sont destinées à la fabrication des polymères renforcés (Chayma, 2017).

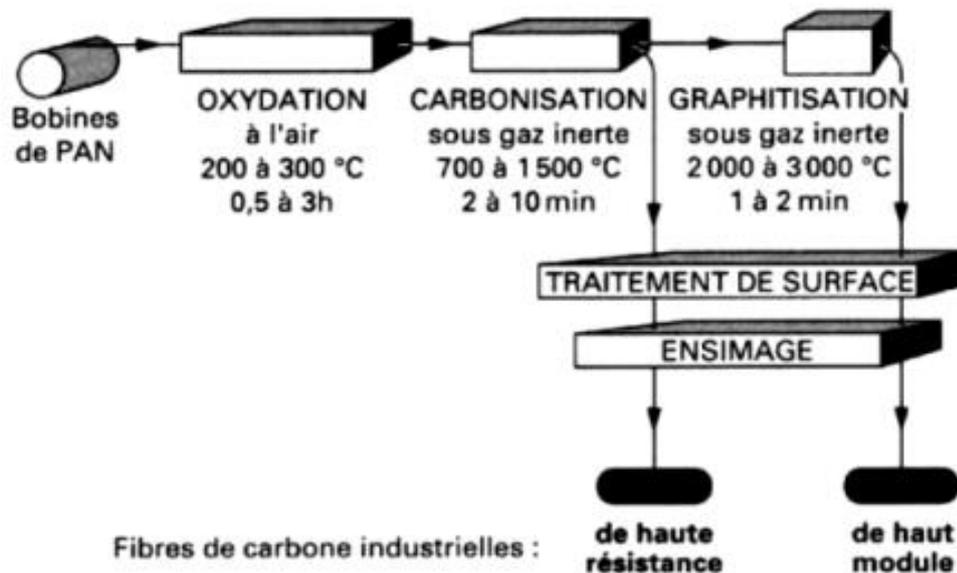


Figure 1.5 : Processus de fabrication du PAN et des fibres de carbone.

I.5.3. Propriétés thermomécaniques et physico-chimiques

Comparativement aux fibres de verre, les fibres de carbone ont une nanostructure ordonnée ce qui offre un bien meilleur module d'élasticité et une meilleure résistance à la traction par rapport à la structure amorphe de la fibre de verre (**Tableau 1.2**). Par contre, le taux d'allongement à la rupture des fibres de carbone est significativement plus faible que celui des fibres de verre (Chayma, 2017).

Tab1.2 : Caractéristique des fibres de carbone

Caractéristique	Diamètre	Densité	Résistance à la traction	Module de Young
Valeur	5-7(μ m)	1.8 (g/cm ³)	2410-5790 (MPa)	230-825 (GPa)

S'agissant les Propriétés en traction des fibres de carbone sont résumés dans le **Tableau 1.3.**

Tab1.3 : Propriétés en traction des fibres de carbone (Chayma, 2017)

Fabrication	Nom commercial		Classe	E (GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)	Précurseurs		
Toray (Asie) Soficar (Europe) CFA (USA)	Toray ca	T300	HR	230	3530	1.5	PAN		
		T300 J	HR	230	4210	1.8	PAN		
		T400 H	HR	250	4410	1.8	PAN		
		T700 S	HR	230	4900	2.1	PAN		
		T800 H	IM	294	5490	1.9	PAN		
		T800S	IM	294	6370	2.2	PAN		
		T1000G	HM	377	4410	1.2	PAN		
		M40	HM	475	4120	0.8	PAN		
		M40J	HM	540	4020	0.8	PAN		
		M46 J	HM	588	3920	0.	PAN		
		T400 H	HR	250	4410	1.8	PAN		
				T101 F	UG	33	800	2.4	Brai iso
				T201 F	UG	33	700	2.1	Brai iso
		P-55 S	HM	380	1900	0.5	Brai méso		
		P-75 S	HM	520	2100	0.4	Brai méso		
		P-100 S	THM	760	2410	0.3	Brai méso		
		P-120 S	THM	825	2410	0.3	Brai méso		
1) D'après les fiches techniques des producteurs									

I.5.4. Avantages et inconvénients des fibres des carbones

Les fibres de carbone présentent plusieurs atouts et quelques inconvénients qui sont résumés dans le **Tableau 1.4**.

Tab1.4 : Avantages et inconvénients des fibres de carbone (Chayma, 2017)

Avantages	Inconvénients
Légèreté Haute performance Grande résistance à la fatigue Stabilité thermique Transparence aux rayons X Résistance et rigidité élevées Faible dilatation thermique	Coût de fabrication élevé Tenue faible au choc et à l'abrasion bobinage difficile (raideur élevée)

Les fibres de carbone présentent l'inconvénient d'être sensibles en atmosphère oxydante. Ceci est important à prendre en considération lors de l'élaboration ou du recyclage d'un composite. Les fibres de carbone commercialisées peuvent être classées selon leurs propriétés en traction. Le tableau 1.5 présente la répartition des différents types de fibres de carbone selon leurs fournisseurs correspondants. On distingue (Chayma2017):

- Les fibres d'usage général ou d'application thermique (UG) : $E < 200$ GPa ;
- Les fibres haute résistance (HR) : $200 \text{ GPa} < E < 250$ GPa ;
- Les fibres à module intermédiaires (IM) : $250 \text{ GPa} < E < 350$ GPa ;
- Les fibres haut module (HM) : $350 \text{ GPa} < E < 550$ GPa ;
- Les fibres de très haut module (THM) : $E > 550$ GPa.

I.5.5. Domaine d'application de PRFC

Essentiellement, le plastique renforcé de fibre de carbone peut être utilisé presque partout où l'on utilise actuellement l'acier, l'aluminium ou tout autre matériau synthétique, ce qui comprend le tunnel, le châssis, les composants de suspension, le capot, la boîte à air, les pièces de protection et ainsi de suite. Les utilisations sont donc pratiquement illimitées. L'inconvénient principal du matériau est son prix. Sa résistance aux chocs est également un problème, bien que celui-ci puisse être en grande partie résolu en intégrant d'autres substances Comme le Kevlar dans le mélange (Marc, 2021).

I.5.6. Utilisations dans le domaine de construction

Dans le domaine de génie civil, la réparation, la réhabilitation ou le renforcement des structures à l'aide de matériaux composite connaissent un large essor ces dernières décennies. Dans le cas du renforcement des structures en béton armé, ce procédé consiste à associer aux armatures internes défaillantes ou insuffisantes d'une structure existante, un matériau résistant aux efforts de traction. Collées sur les faces externes des zones tendues de la pièce à renforcer, les fibres de carbone tissées participent à la reprise des sollicitations de la structure. Ceci a été déjà validé expérimentalement (**Meliani et Al, 2015**).

I.6. Plaques en PRFC

I.6.1. Description

La plaque est fabriquée dans un matériau composite de carbone de haute qualité (plastique renforcé avec des fibres de carbone, PRFC) produit industriellement et qui se distingue par sa grande résistance et une grande qualité.

Le PRFC est un plastique renforcé de fibres de carbone dans lequel les fibres de carbone sont intégrées en renfort, la plupart de temps en plusieurs couches, au sein d'une matrice en résine synthétique. Composants hautement résistants – principalement destinés à la construction aéronautique et à la course. Le PRFC peut être travaillé facilement (fraisage, perçage, sciage, ponçage).

Le PRFC peut être utilisé pour des applications à haute température. Parfait pour le modélisme, car le carbone possède une grande résistance pour un faible poids. Le matériau n'est pas flexible, extrêmement léger, très stable, ne se corrode pas, à l'aspect caractéristique et prisé du carbone grâce à sa structure tissée (**Alfa-Carbon, 2022**).

I.6.2. Domaines d'utilisation

- Plaques d'impression pour l'impression en 3D.
- Drones, multi-coptères.
- Modélisme.
- Construction navale et de bateaux.
- Sport automobile.
- Pièces en carbone.
- Renforcement et réparations des éléments structuraux.

I.6.3. Avantages des plaques en PRFC

- Faible masse.
- Excellente résistance à la fatigue.
- Peut être utilisé à grande vitesse.
- En amortissant les vibrations il permet des utilisations silencieuses.
- Montage et démontage faciles.

Les panneaux en PRFC permettent de produire d'excellentes structures en sandwich. Ainsi, un morceau de mousse peut être déposé entre deux plaques en PRFC, puis découpé à la forme souhaitée. Le résultat est très léger mais très stable (**Alfa-Carbon, 2022**).

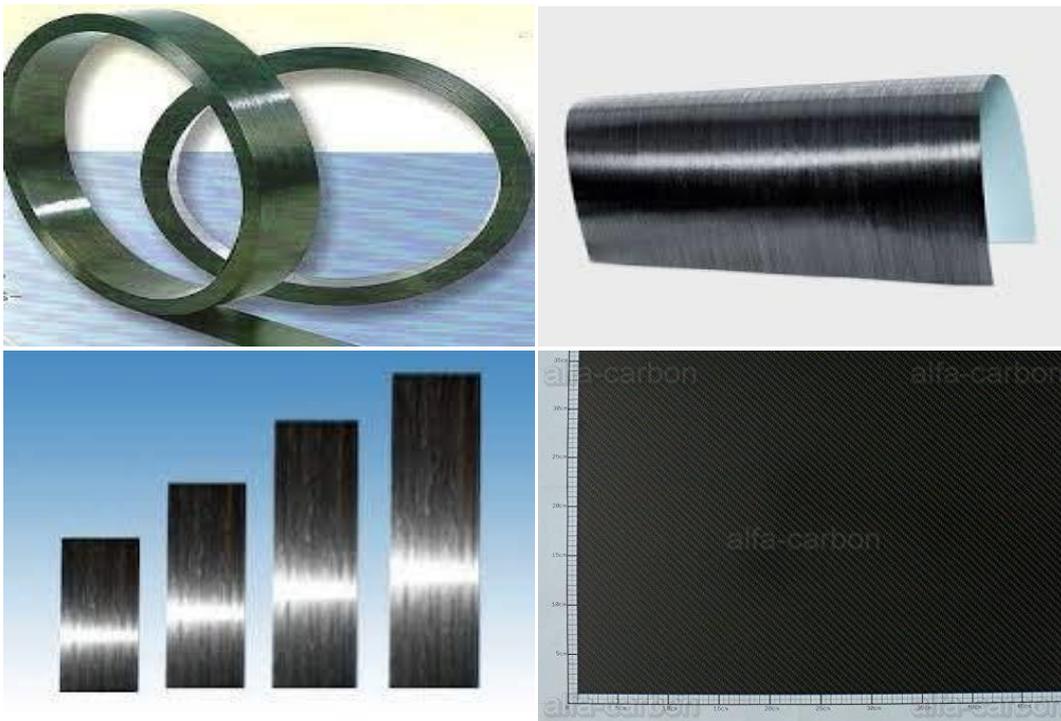


Figure 1.6 : Plaques en PRFC.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, conclure que dans le génie civil, l'utilisation des matériaux composites (PRF) occupe une grande part de plus en plus importante par rapport aux autres secteurs grâce à leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la rigidité et la résistance spécifiques, la résistance à la fatigue et à la corrosion.

En général, la technique d'utilisation des matériaux composites peut être utilisée pour améliorer la ductilité ainsi que d'autres propriétés.

CHAPITRE II

Types de Renforcement

II.1. Introduction

En raison du séisme survenu dans les régions de Boumerdès et d'Alger en 2003, de nombreux bâtiments en béton armé se sont, soit effondrés, soit endommagés de façon dangereuse. La question de les démolir et de les reconstituer à nouveau ou bien de les réparer dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles, fut alors posée. Une alternative aux techniques traditionnelles de réparation a été récemment mise en point. Il s'agit de la technique de renforcement par différents types. Cette technique se diffuse de plus en plus dans le domaine du génie civil. C'est ce qui sera étudié dans ce chapitre.

II.2. Renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs. Un renforcement peut être associé à une réparation (**Abdelhamid, 2021**).

Le renforcement regroupe l'ensemble des dispositions susceptibles de diminuer la vulnérabilité d'un bâtiment au séisme. Ces dispositions relèvent d'une étude détaillée des technologies de renforcement.

Selon le cas, les modes de renforcement diffèrent sensiblement :

-renforcement d'une structure par la création d'une ossature complémentaire (béton armé ou charpente métallique) destiné à se substituer, en partie ou en totalité, à l'ouvrage déficient pour le transfert des efforts sismiques.

-renforcement des éléments structuraux par la reconstitution et/ou l'adjonction d'éléments.

-réduction de l'action sismique par l'interposition des isolateurs.

-utilisation concomitante de plusieurs renforcements à choisir parmi ceux décrits ci-après.

Quelle que soit la solution de renforcement, il est conseillé de ne pas dépasser pour le coefficient de comportement la valeur $q \leq 2$ (**Abdelhamid, 2021**).

II.3. Types de renforcement

Depuis leur apparition sur le marché comme matériaux de renforcement des structures existantes, dans les années 1990, les composites en PRF offrent plusieurs avantages : ils sont parfaitement immunisés contre la corrosion et offrent un rapport résistance-poids très élevé.

De plus, les PRF offrent des possibilités quasi-infinies quant à leur disponibilité variée et leur facilité de mise en place. Le renfort en PRF est constitué de fibres qui sont liées entre elles par une résine polymère (matrice). Il se présente sous forme de lamelles ou de tissus. Les lamelles, un composite extrudé par tirage, offrent l'avantage d'un meilleur contrôle de fabrication et de pose, mais ne peuvent être utilisées que sur une surface à plat. Les tissus, beaucoup plus flexibles, peuvent être utilisés sur presque toutes les surfaces (plate, ronde, ovale, etc.), mais sont généralement plus difficiles à installer (**Germain, 2021**).

II.3.1. Renforcement avec des barres

Les propriétés du composite sont principalement influencées par le choix des fibres. Dans le génie civil, trois types de fibres dominent. Il s'agit de fibres de carbone, de verre et d'aramide, et le composite est souvent nommé par la fibre de renforcement, p. ex., PRFC pour Polymère renforcé de Fibre de Carbone. Ils ont des propriétés différentes, y compris le prix, qui rendent l'un plus approprié que l'autre à des fins différentes. À des fins de renforcement, les fibres de carbone sont les plus appropriées et seront donc concentrées dans ce qui suit. Toutes les fibres ont généralement une capacité de contrainte plus élevée que l'acier ordinaire et sont élastiques linéaires jusqu'à la défaillance. Les propriétés les plus importantes qui diffèrent entre les types de fibres sont la rigidité et la traction (**Carolin, 2003**).

Types de fibres utilisées dans les composites polymères renforcés de fibres

- Fibres de verre
- Fibres de carbone
- Fibres aramides

III.3.1.1. Barres en carbone (PRFC)

Les fibres de carbone ont un module d'élasticité élevé de 200 à 800 GPa. L'allongement final est de 0,3 à 2,5 % lorsque l'allongement inférieur correspond à la rigidité supérieure et vice versa. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et résistent à de nombreuses solutions chimiques. Ils résistent très bien à la fatigue, ne se corrodent pas et ne présentent pas de fluage ou de relaxation, ayant moins de relaxation que les torons d'acier à précontrainte à haute

résistance. La fibre de carbone est conductrice sur le plan électrique et, par conséquent, peut provoquer une corrosion galvanique en contact direct avec l'acier (Carolin, 2003).

La fibre de carbone est le plus cher des renforts les plus courants, mais dans les applications spatiales, la combinaison d'excellentes caractéristiques de performance et de poids léger en font un renfort indispensable dont le coût est d'une importance secondaire. Les fibres de carbone sont constituées de petite cristallite de graphite turbostratique. Ceux-ci ressemblent à des monocristaux de graphite sauf que les plans de couche ne sont pas emballés dans un mode le long de la direction c - axe. Dans un seul cristal de graphite, les atomes de carbone dans un plan basal sont disposés en rangées hexagonales et maintenus ensemble par de fortes liaisons covalentes. Entre les plans basaux seulement faible. Par conséquent, les monocristaux sont très anisotropiques avec le module plan de l'ordre de 100GPa alors que les molécules perpendiculaires au plan basal ne sont que d'environ 75GPa. Il est donc évident que pour produire des fibres à haut module et à haute résistance, les plans de base du graphite doivent être parallèles à l'axe des fibres. Ils ont des coefficients de dilatation thermique plus faibles que les fibres de verre et d'aramide. La fibre de carbone est un matériau anisotrope, et son module transversal est d'un ordre de grandeur inférieur à son module longitudinal. Le matériau a une très grande résistance à la fatigue et au fluage. Depuis sa résistance à la traction diminue avec l'augmentation du module.

Sa contrainte à la rupture sera également beaucoup plus faible. En raison de la fragilité du matériau à un module plus élevé, il devient critique dans les détails d'articulation et de connexion, qui peuvent avoir des concentrations de contraintes élevées. En raison de ce phénomène, les stratifiés en composite de carbone sont plus efficaces avec le collage qui élimine les attaches mécaniques (Nishikant, 2009).

a-Utilisation

Différents cas de renforcement de structures (Sika France SAS, 2022) :

a.1-Augmentation de charges

- Augmentation de la capacité portante des poutres, des dalles : augmentation des charges d'exploitation, trafic, changement de destination du local, etc.

a.2-Endommagement des éléments de structures

- Dégradation des matériaux de la structure
- Corrosion, diminution ou sectionnement d'armatures internes
- Accidents (impact de véhicule, séisme, incendie, etc.)

a.3-Amélioration des conditions de service et de durabilité

- Réduction de flèche et d'ouverture de fissure
- Réduction des contraintes dans les armatures internes
- Amélioration de la résistance/tenue à la fatigue de la structure

a.4-Modification de la structure

- Création de trémies (voile, dalle, poutre, etc.)
- Suppression de murs, poteaux

a.5-Renforcement préventif

- Renforcement parasismique (Eurocode8)
- Impact, explosion, etc.

a.6-Défauts de conception, défauts de calcul

- Insuffisance ou déficience des sections d'acier interne
- Défaut de positionnement des armatures dans le béton

b- Avantages

- Insensible à la corrosion
- Très haute performance
- Excellente durabilité et résistance/tenue à la fatigue
- Facile à transporter, à manipuler in-situ (légèreté)
- Invisible une fois installée (engravée dans le béton / protégée naturellement)
- Application rapide et économique
- Peu de préparation de surface du support / nivellement des irrégularités
- Surface renforcée circulaire (barre engravée, non exposée aux actions mécaniques extérieures)
- Solution de renforcement reconnue internationalement (**Sika France SAS, 2022**).

III.3.1.2. Barres en verre (PRFV)

Les fibres de verre sont considérablement moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites de fibre de verre sont devenus populaires dans de nombreuses applications, l'industrie nautique par exemple. Les modules des fibres sont de 70 à 85GPa avec un allongement final de 2 à 5 % selon la qualité. Les fibres de verre sont sensibles à la corrosion sous contrainte à des niveaux de contrainte élevés et peuvent avoir des problèmes de relaxation. Les fibres de verre sont sensibles à l'humidité, mais avec le bon choix de matrice, les fibres sont protégées (**Carolin, 2003**).

III.3.1.3. Barres en Aramide (PRFA)

L'aramide est l'abréviation de polyamide aromatique. Une marque bien connue de fibres d'aramide est Kevlar mais il existe d'autres marques aussi. Les modules des fibres sont de 70 - 200GPa avec un allongement final de 1,5 - 5 % selon la qualité. L'aramide a une énergie de fracture élevée et est donc utilisé pour les casques et les vêtements pare-balles. Les fibres aramides sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et au rayonnement ultraviolet et ne sont donc pas largement utilisées dans les applications de génie civil. De plus, les fibres d'aramide ont des problèmes de relaxation et de corrosion sous contrainte (**Carolin, 2003**).

III.3.2. Renforcement avec des plaques

III.3.2.1. Renforcement par collage de plaques composites

La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone – époxyde ou verre – époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression. Les avantages de l'utilisation de composites sont nombreux. On peut citer par exemple leur grande résistance à la fatigue, leur orientation. Dès lors, les études sur l'utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation se sont multipliées pour mieux comprendre les problèmes posés par cette nouvelle technique (**Ferrier et al, 1999**).



Figure 2.1: Renforcement par collage de plaques composites.

Les structures doivent souvent être réparées ou renforcées, et il existe diverses méthodes.

Malheureusement, la résistance à la traction n'augmente pas de la même manière au fil du temps. Cela signifie que la capacité portante des structures en béton est souvent limitée par la quantité d'armature. En ajoutant du renfort en le liant à la surface, la capacité portante peut dans de nombreux cas être augmentée. De nos jours, la plaque collée est principalement une feuille ou un stratifié de polymère renforcé de fibres, mais cela n'a pas toujours été le cas, comme nous le verrons plus loin (**Touati, 2015**).

a-Collage des plaques FRP

Le collage de plaques FRP peut être divisé en trois types : le collage de plaques stratifiées, la méthode de pose manuelle, et l'armature montée près de la surface, NSMR. Le collage de plaques stratifiées implique qu'un stratifié composite préfabriqué, souvent pulvérisé, est collé à la surface d'une structure en béton. **Wiberg (2000)** a étudié si un mélange cimentaire peut être utilisé comme matrice pour la pose à la main. Pour NSMR, les rainures sont découpées dans le couvercle en béton et les tiges composites sont collées dans la rainure NSMR avec des tiges quadratiques CFRP a été développé à l'Université de technologie de Lulea.

Les processus de renforcement pour les trois types de collage de plaques FRP sont différents à certains égards. Cependant, ils sont tous décrits en gros et impliquent trois moments principaux : la préparation, le collage FRP et l'achèvement (**Touati, 2015**).

a.1-Préparation

Avant de renforcer une structure, il faut prendre certaines mesures. La préparation variera selon le type de renforcement choisi. Mais certaines étapes sont communes. Si l'armature intérieure présente une corrosion importante ou si les chlorures contaminent fortement le béton, les barres corrodées et le béton doivent être enlevés et remplacés pour éviter que le revêtement de béton ne s'écaille. Lors du renforcement sur le terrain, il peut également y avoir des dommages causés par des impacts de véhicules et des erreurs lors de la construction qui doivent être prises en compte. La **Figure 2.2** montre comment des trous et des cavités mineurs ont été réparés avec du mastic, puis broyés (**Touati, 2015**).



Figure 2.2 : Réparation avec du mastic.

a.2-Collage FRP

Après la préparation, le système de renforcement peut être appliqué. Pour la pose manuelle, le travail de renforcement commence par l'application de l'adhésif sur la surface préparée avec un rouleau.

Ensuite, les fibres sont mises en place. Un rouleau est utilisé pour redresser les fibres et pour éliminer tous les vides plus grands. Normalement, il y a une couverture en papier ou en plastique sur les fibres pour faciliter la manipulation. Dans le cas où de nombreuses couches sont nécessaires, les dernières étapes sont répétées jusqu'à ce que l'épaisseur désirée soit atteinte epoxy.

Le collage des plaques de laminâtes commence par le remplissage des irrégularités dans la surface avec du mastic. La grande résine Viscosité utilisée pour le collage du laminât. L'époxy est ensuite appliquée sur le stratifié et le stratifié EST mis en place. Pressura est appliqué sur le stratifié à l'aide d'un rouleau ou à la main de sorte que le collage FRP à l'époxy soit réparti de façon uniforme avec une mise en place à la main et la plaque laminée illustré dans la **Figure 2.3**. (**Touati, 2015**).



Figure 2.3 : Collage des plaques en FRP.

a.3- Achèvement

Les travaux d'achèvement sont principalement entrepris pour des raisons de durabilité et d'esthétique, Pour protéger la matrice contre les rayons UV, le renforcement peut être peint, ce qui peut également améliorer les performances esthétiques. La couleur peut être choisie pour camoufler le renforcement sur la structure, camoufler la structure dans son environnement ou donner un aspect plus coloré dans l'environnement S'il est nécessaire de protéger le composite contre le feu, Protection spéciale contre les fibres Recouvrement par solide renforcement Autres travaux de finition légers dus aux exigences de surface La protection de l'environnement peut être arrangée en pulvérisant du sable de quartz sur la dernière couche d'époxy non traitée à partir de la pose manuelle (Taljsten et al, 1997).

b-Vérification de la qualité

Le succès d'un renforcement dépend d'une bonne exécution, Il existe certaines mesures qui peuvent être prises pour minimiser le risque de mauvaise qualité du renforcement interne La qualité du béton à la surface peut être mesurée par traction-de contrôle La régularité de la surface peut être mesurée avant le renforcement appliqué La réaction de l'époxy ne sera pas satisfaisante si la température est trop basse ou si l'humidité relative est trop élevée niveaux pouvant être mesurés .Les exigences qui doivent être remplies.

L'humidité relative sur la surface du béton ne doit pas dépasser 80 % au moment de l'application de l'apprêt, de l'époxy et de la peinture.

La température dans l'air doit être d'au moins 3 Couvrir le point de rosée réel, et ne doit pas être inférieure à 10 C.

Fournisseurs fiables devraient toujours être suivis. Si les demandes de durcissement ne sont pas remplies des arrangements spéciaux sont nécessaires.

Tentes et ventilateurs de chauffage peuvent être utilisés pour créer l'environnement requis.

Après renforcement, une fois l'adhésif durci, il est possible de détecter les vides sous les fibres en tapant une pièce sur la surface de la fibre.

Le son généré par le taraudage est différent si les vides sont piégés par rapport à un bon lien. Les vides et le désossage peuvent également être détectés par thermographie infrarouge.

En utilisant des sources de chaleur et des caméras infrarouges, les vides peuvent être détectés par les différences de température entre les zones collées et décollées qui se produisent en raison de différents transferts de chaleur (**Touati, 2015**).

c- Avantages et inconvénients

Comme avantages Dans certains cas, la méthode peut être utilisée sans restriction de la circulation sur le pont.

Autres avantages : Un faible poids des fibres facilite la manipulation sans équipement de levage sur le site. Changements négligeables de section, de poids et de hauteur libre d'une structure. Facile à appliquer.

Il existe également des inconvénients, tels que Sans protection, le renforcement est sensible au feu et à l'impact, Les consultants de conception, les entrepreneurs et les clients ont une expérience limitée.

Selon la structure qui sera renforcée, différents aspects pourraient se présenter. Pour toutes les méthodes de renforcement, il est de la plus haute importance de comprendre comment le renforcement affectera la structure finale (**Touati, 2015**).

d-Fabrication de plaques de PRV (GFRP)

Pour répondre au large éventail de besoins qui peuvent être requis dans la fabrication de composites, l'industrie a évolué four une douzaine de processus de fabrication séparés ainsi qu'un certain nombre de processus hybrides. Chacun de ces procédés offre des avantages et des avantages spécifiques qui peuvent s'appliquer à la fabrication de composites. La pose à la main - vers le haut et la pulvérisation - vers le haut sont deux processus de base.

La pose à la main - vers le haut est la méthode de fabrication la plus ancienne, la plus simple et la plus intense. Le processus est le plus courant dans la construction maritime FRP. La résine liquide est placée avec le renfort (fibre de verre tissée) contre la surface finie d'un

moule ouvert Les réactions chimiques dans la résine durcissent le matériau en un produit solide et léger. La résine sert de matrice pour les fibres de verre de renforcement Le pourcentage de fibres et de matrices était de 50:50 en poids. Les matériaux constitutifs suivants ont été utilisés pour la fabrication de la plaque :

1. E - verre tissé comme renfort
2. Époxy comme résine
3. Durcisseur comme diamine (catalyseur)
4. Alcool polyvinylique comme agent de libération.

Moulage par contact dans un moule ouvert à la main - jusqu'à a été utilisé pour combiner des couches de stratifié tissé dans l'ordre prescrit. Une plateforme plate en contreplaqué rigide a été choisie. Une feuille de plastique a été conservée sur la plate-forme de contreplaqué et une mince pellicule d'alcool polyvinylique a été appliquée comme agent de libération à l'aide d'un pistolet pulvérisateur. Le laminage commence par l'application d'une couche de gel (époxy et durcisseur) déposée sur le moule par une brosse, dont le but principal était de fournir une surface externe lisse et de protéger les fibres contre une exposition directe à l'environnement. La couche a été coupée à partir d'un rouleau de tissu stratifié. Des couches de renfort ont été placées sur le moule au-dessus de la couche de gel et la couche de gel a été appliquée à nouveau par brosse. Tout air pouvant être emprisonné a été retiré à l'aide de rouleaux d'acier dentelés. Le processus de pose de la main - vers le haut était la suite du processus ci-dessus avant que la couche de gel ait complètement durci.

Encore une fois, on a recouvert le dessus de la plaque d'une feuille de plâtre en appliquant de l'alcool de polyvinyle à l'intérieur de la feuille comme agent de libération. Ensuite, une plate-forme métallique lourde et plate-forme rigide a été conservée sur la plaque pour la compression, dans le but. Les plaques ont été laissées pour un minimum de 48 heures avant d'être transportées et câble forme exact pour l'essai (**Nishikant, 2009**).

II.3.3. Renforcement avec en tissu

II.3.3.1. Tissu de fibres de carbone (TFC)

a-Définition

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structurel par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone.

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants.

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliquée à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré. Le composite ainsi obtenu rivalise par ses caractéristiques mécaniques avec les meilleurs aciers sans avoir les inconvénients des effets de la corrosion.

Les avantages de fabriquer le composite directement sur le support sont de pouvoir mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine.

Par sa simplicité de mise en œuvre, l'absence de pression à exercer durant la pose et le durcissement de la colle, fait du TFC est un système de renforcement économique (Abdelhamid, 2021).



Figure 2.4 : Tissu de fibres de carbone (TFC).

b-Domaine d'application

- Ouvrages d'art
- Bâtiments (société Freyssinet,2009).

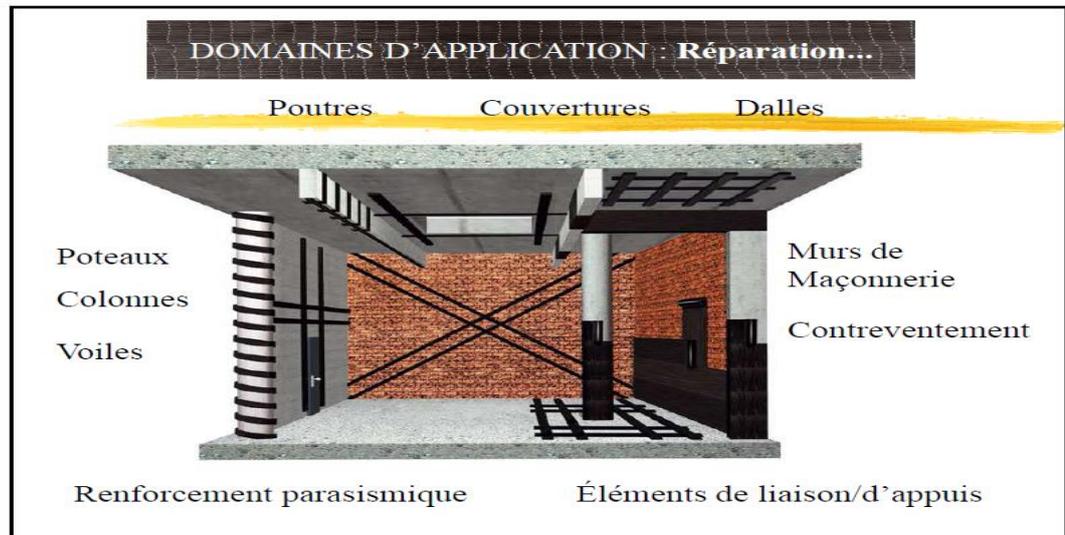


Figure 2.5 : Domaine d'application de Tissu de fibres de carbone.

c-Mise en œuvre

La mise en œuvre du composite directement sur le support permet de mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier des plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine (Freyssinet, 2009).

d- Avantages du TFC

- Résistance et module élastique élevés,
- Insensibilité à la corrosion,
- Légèreté,
- Grande souplesse de mise en œuvre sur des surfaces de toute forme et de toute nature,
- Excellente résistance à la fatigue et à l'abrasion.

e-Inconvénients

Le comportement transversal des fibres est relativement mauvais ;

- Le matériau, de par sa nature isotrope conduit a des comportements complexes, et donc a des difficultés de modélisation et de conception. De plus, lors des expérimentations, cela complexifie également l'identification des propriétés du matériau ;
- La fibre de carbone possède de plus une mauvaise résistance aux chocs et à l'abrasion ;
- La conductivité élevée du matériau peut conduire à des électrocutions, comme lorsqu'il est utilisé pour la construction d'un mat de voilier
- Fragilité à la courbure ou au pliage ;
- Coût élevé ;
- Fragilité au choc.

f-Pose de TFC

➤ **Préparation avant mise en œuvre (Farid, 2017) :**

1/-Préparation du support

- Le support doit être sec
- Le support doit être sain et propre des produit non adhérents et d'enduit de type peinture.
- Une élimination des surfaces qui offre un peu de cohésion, et une préparation de cette surface doit être faite afin de créer une rugosité suffisante

2/- Préparation du tissu de fibre de carbone

- Découper soigneusement les tissus ;
- Les tissus coupés rester à plat ou enroulés, pour éviter l'endommagement des
Fibres ;
- Tenir hors poussière

3/- Préparation de la résine

- Homogénéiser chaque composante séparément ;
- Verser le durcisseur dans la résine ;
- Mélanger cette dernière avec un agitateur mécanique jusqu'à obtenir un mélange uniforme.

Tableau 2.1 : Mise en place du confinement par tissu TFC (Farid, 2017).

Préparation de surface :

Ponçage au disque diamant des différentes faces du poteau et meulage des angles pour les arrondir,



Evacuation des poussières au moyen d'air comprimé,



Application d'une couche de résine,



Pose des bandes de TFC,



Marouflage au rouleau,



Pose d'une couche de résine de couverture,



➤ Mise en œuvre

- **Mise en œuvre de la résine**

L'application de la première couche de résine à l'aide d'un rouleur sur le support déjà préparé.

- **Mise en place du tissu**

Le placement du tissu sur la couche de résine, en prenant attention à l'orientation des fibres et à l'étirement excessif des tissus (Farid, 2017).

II.3.3.2. Tissu en fibres en verre

a- Historique

Vers les années 1960, des recherches portent sur la possibilité de traiter le verre standard (verre E) afin de le rendre stable en milieu alcalin. La société Pilkington achète les droits de cette nouvelle fibre de verre Alkali Résistante (AR), développée par Madjumdar. En plus d'un traitement au zirconium, les fibres d'un diamètre de 10 à 12 μm sont réunies entre elles par centaines puis ensimées. Cette opération protège les fibres de l'abrasion durant le malaxage et contre le développement excessif de cristaux agressifs à leur surface. Pilkington développe au début des années 1971 des procédés de fabrication pour ces produits ciment/fibres (GRC de l'anglais *Glass Reinforced Cement*) en s'inspirant de l'industrie des plastiques renforcés.

Le développement rapide des GRC depuis les années 1970 a conduit à l'élaboration d'un nouveau système breveté système Vetrotex-Saint-Gobain, développé en partenariat par le Centre de Recherche de Pont-à-Mousson et Vetrotex. Ce matériau est composé de fibre de verre AR dans un mélange de ciment, de polymères, d'adjuvants et d'ajouts spécifiques. Les faibles performances (fragilité, résistance en traction) du liant hydraulique sont compensées par l'utilisation de fibres de renfort afin de reprendre l'effort après la rupture de la matrice cimentaire.

L'interaction entre ces deux matériaux est conditionnée par l'ensimage des fibres. L'interface régule les phénomènes de mouillage et de pénétration des fibres par la matrice, afin d'obtenir un transfert de charge satisfaisant. La macro-fissure de la matrice est reprise par les fibres qui viennent ponter la fissure et répartir l'endommagement au travers de multiples microfissures. Une forte réserve de déformation est ainsi obtenue et les propriétés de matériau vont dépendre de plusieurs facteurs tels que la quantité et la longueur du renfort, la compacité de la matrice, etc. (Geoffrey, 2014).



Figure 2.6 : Tissu en fibres en verre.

b-Description

La toile de verre fait partie de la grande famille des revêtements muraux. Commercialisée sous la forme de rouleaux, elle est l'un des nombreux produits dérivés du verre. En effet les fibres de verre extrêmement fines, qui la composent et lui assurent sa solidité, sont fabriquées par étirement, lorsque le verre est rendu malléable à haute température. C'est le tissage de ces fibres de verre qui donne à la toile de verre son aspect si particulier et imprime sa surface de reliefs (**Finess, 2011**).

c-Propriété

La fibre de verre est intéressante à plus d'un titre. Ainsi elle permet des réductions de poids en perfectionnant les performances, pour un prix compétitif : on peut en faire une fabrication en séries. Elle permet par exemple un allègement des structures d'environ 30 % comparé à l'acier.

Parmi les autres propriétés, citons l'inertie chimique, la résistance aux chocs, l'isolation, etc (**Wikibis, 2022**).

d-Utilisation

Les principales utilisations de la fibre sont, par ordre d'importance (**Finess, 2011**) :

1. Les bâtiments et les infrastructures ;
2. Les transports ;
3. L'électricité et l'électronique ;
4. Les sports et loisirs ;
5. Les équipements industriels.

e-Caractéristiques :

- Résistant aux chocs et indéformable
- Non irritant
- Facile à appliquer
- Particulièrement inflammable.

f-Application

La technologie de collage des murs avec ce type de papier peint est très simple. Cependant, il y a quelques points à prendre en compte (**Recommman, 2022**):

1. C'est une erreur de penser que les côtés de la nappe fibreuse sont les mêmes. En règle générale, les rouleaux de fibre de verre sont enroulés à l'envers.
2. N'oubliez pas de travailler avec des bandes de papier peint avec des gants et des manches longues. Cela est particulièrement vrai du processus de découpe du papier peint en larges bandes, car la fibre de verre s'effrite et si elle entre en contact avec la peau, elle peut provoquer une irritation.
3. Pour coller des murs avec de la fibre de verre, vous devez utiliser de la colle pour le papier peint épais. Sa base est l'amidon, traité d'une manière spécifique spéciale.
4. N'oubliez pas qu'avant de coller ce type de papier peint, il est nécessaire d'appliquer un apprêt sur les murs ou de traiter la toile au préalable avec une solution de colle faible.

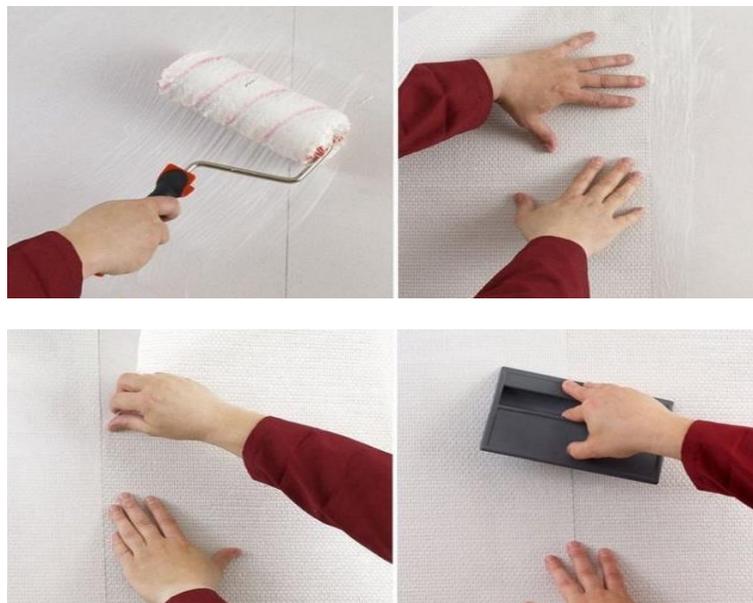


Figure 2.7 : Technologie d'application de tissu de fibre de verre.

g- Avantages

Le tissu en fibre de verre ainsi que le tissu en fibre de verre résineux sont tout d'abord une solution parfaite pour masquer les irrégularités qui peuvent se présenter sur les murs et les plafonds. Aussi, le tissu en fibre de verre est en mesure de cacher les éventuelles petites fissures. Par ailleurs, la toile de verre est un petit plus en matière d'isolation phonique et thermique, mais cela dépend de la qualité choisie. Elles peuvent également être peintes et repeintes autant de fois qu'on le souhaite (**Finess, 2011**).

h-Inconvénients

- La fibre de verre est plus difficile à réparer que le bois ;
- Sa dégradation sera rapide si de l'eau parvient à s'infiltrer sous la couche de fibre de verre ;
- La fixation à la structure doit se faire le dessous ce qui peut rendre l'installation difficile dans les espaces ;
- Restreints.

II.4. Conclusion

Les trois types de renforcement principaux ont été discutés dans ce chapitre. La méthode de renforcement par des plaques est le sujet de cette recherche. Le chapitre suivant sera présenté un modèle numérique de renforcement des poutres en béton armé. Le matériau PRFC est utilisé.

CHAPITRE III

Modélisation

III.1. Introduction

Le présent chapitre met en évidence le côté de programmation de cette étude. Premièrement, le logiciel Castem2000 version 18 est présenté ainsi que son principe de fonctionnement. Ensuite, la conception du modèle de calcul est exposée. Enfin, ce chapitre présente la géométrie de la poutre étudiée ainsi que son chargement, ses conditions aux limites et les propriétés des matériaux.

III.2. Présentation Du Logiciel

III.2.1. Définition

Castem (Cast3M) est un code de calcul pour l'analyse de structures par la méthode des éléments finis (E.F) et la modélisation en mécanique des fluides.

A l'origine, ce code a été développé au Service d'études mécaniques et thermiques (SEMT) du Département de modélisation des systèmes et structures (DMS2, anciennement Département de Mécanique et de Technologie, DMT) du Commissariat français à l'Energie Atomique (CEA). Le développement de **Castem** entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique, le but étant de définir un instrument de haut niveau, pouvant servir de support valable pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants, dans le domaine nucléaire comme dans le secteur industriel classique.

Dans cette optique, **Castem** présente un système complet, intégrant non seulement les fonctions de calcul proprement dites, mais également des fonctions de construction du modèle (préprocesseur) et de traitement des résultats (post-processeur).

Castem permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statique et dynamique (extraction de valeurs propres), des problèmes de thermique, des problèmes non linéaires (comportements, grands déplacements, grandes déformations, contact, frottement...), des problèmes dynamiques « pas-à-pas » selon un schéma implicite, la ruine des structures, problèmes couplant calculs fluides et structuraux, etc (CEA, 2022).

Le logiciel **Castem2000** fonctionne sur tout ordinateur PC ou compatible utilisant tous types de Windows. Afin de convertir les informations en entités informatiques par le programme, il faut disposer d'une interface. C'est le langage **GIBIANE** qui va permettre de communiquer directement avec le programme (Bouziid et Lardjane 2012).

III.2.2. Organisation d'un calcul

Une analyse générale effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut se décomposer en quatre grandes étapes (Djahmi, 2012) :

- Le choix de la géométrie et du maillage ;
- La définition du modèle mathématique ;
- La résolution du problème discrétisé ;
- L'analyse et le post-traitement des résultats.

III.2.2.1. Préparation du modèle de calcul

Le modèle de calcul représente l'ensemble des données que doit préparer l'utilisateur pour décrire les caractéristiques complètes du problème à analyser. Il peut être décrit par le schéma de la Figure 3.1 (Bouzid et Lardjane 2012).

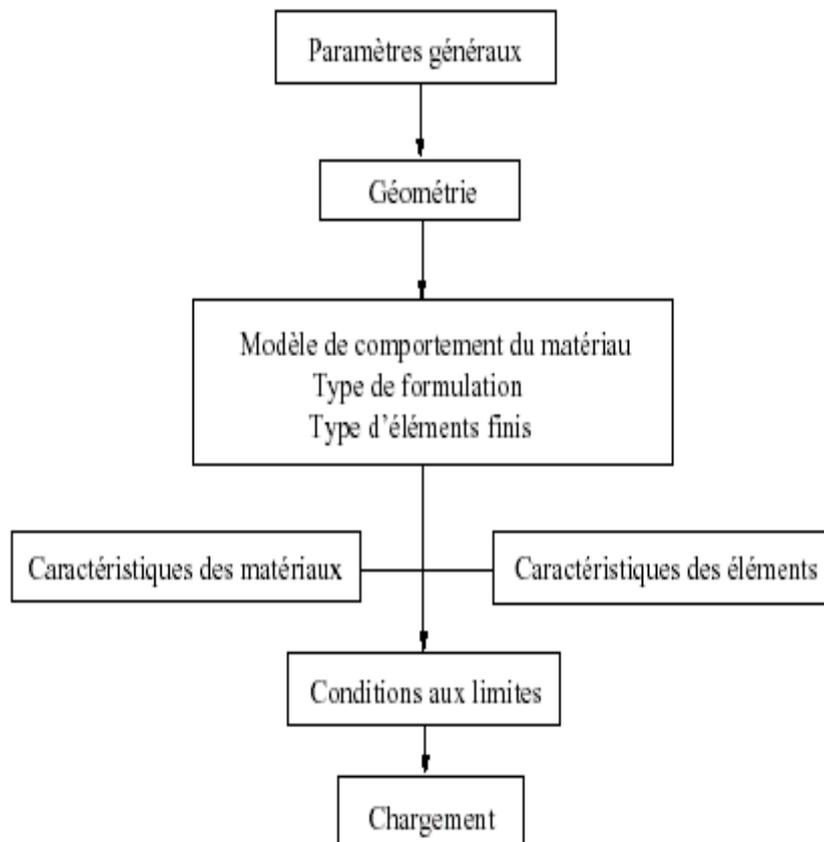


Figure 3.1 : Organigramme du modèle de calcul (Bouzid et Lardjane 2012).

- Les paramètres généraux sont définis avec les options générales de calcul.
- La géométrie représente la forme discrétisée du domaine à étudier.
- Le modèle associe au maillage une loi de comportement du matériau, la formulation éléments finis ainsi que le type d'éléments utilisés.
- Les caractéristiques des matériaux définissent les propriétés physiques des matériaux : module d'Young, coefficient de Poisson, masse volumique, (pour un calcul non linéaire, on ajoute la limite élastique du matériau).
- Les caractéristiques des éléments sont relatives à certaines données supplémentaires selon les types d'éléments choisis qui ne peuvent se déduire de la géométrie. Par exemple, pour les coques il est nécessaire d'indiquer leur épaisseur, pour les poutres leur section et leurs différentes inerties.
- Les conditions aux limites doivent s'ajouter à la matrice de rigidité.
- Application des chargements externes.

III.2.2.2. Résolution du système d'équations

Le système d'équation est défini comme suit (**Bouزيد et Lardjane 2012**) :

$$\bar{M}\ddot{u} + \bar{C}\dot{u} + \bar{K}u = \bar{F} \quad (3.1)$$

Avec :

\bar{M} , \bar{C} et \bar{K} sont respectivement les matrices de masse, amortissement et de rigidité.

u , \dot{u} et \ddot{u} sont respectivement les vecteurs de Déplacement, vitesse et accélération ;

\bar{F} est le vecteur de chargement.

III.2.2.3. Traitement des résultats

Il s'avère indispensable de traiter les résultats d'une analyse effectuée avec CASTEM 2000, ces résultats étant contenus dans des objets de type CHPOINT (analyse statique linéaire) ou de type SOLUTION (analyse modale). Ce traitement permet le calcul de grandeurs dérivées plus faciles à appréhender ou une visualisation en vue d'une meilleure interprétation des résultats. Deux groupes d'opérateurs sont disponibles à cet effet, l'un étant réservé au post-traitement des données et l'autre à la représentation graphique. Il est ensuite possible de sauvegarder les résultats en vue de les restituer dans des calculs ultérieurs (**CEA, 2022**).

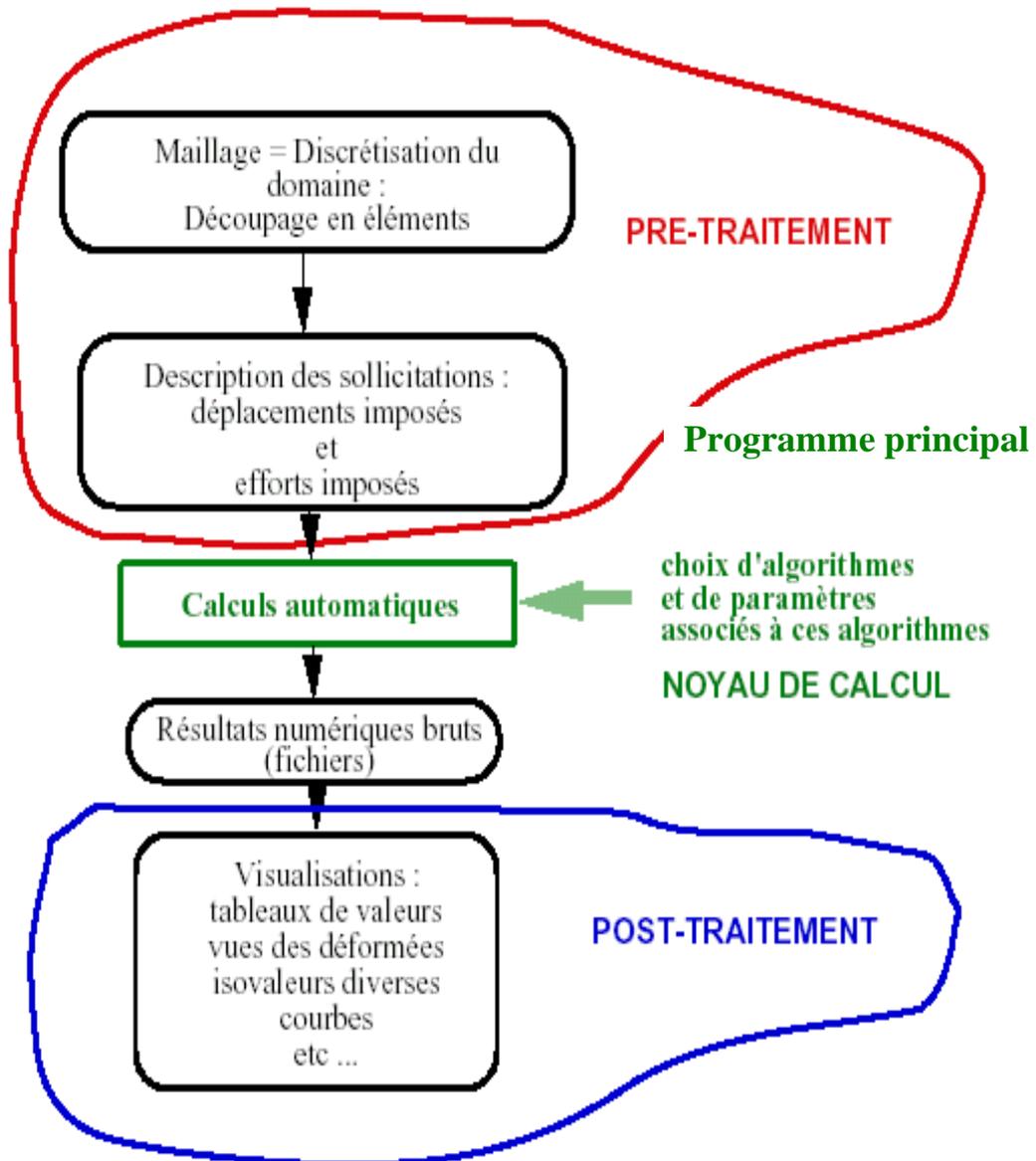


Figure 3.2 : Noyau de calcul, pré et post traitements du noyau de calcul (Bouزيد et Lardjane 2012).

III.3. Modélisation

Le Castem 2000 utilise l'analyse par éléments finis pour traiter les problématiques. Dans ce contexte, un modèle de calcul peut être construit de la manière suivante :

1. Description de la géométrie, maillage.
2. Choix du type d'éléments finis et du modèle de comportement.
3. Donnée des caractéristiques des matériaux et des caractéristiques géométriques supplémentaires.
4. Donnée des conditions aux limites.

5. Donnée du chargement.
6. Résolution du système.
7. Post-traitement des résultats

Dans cette recherche le model de calcul est construit comme suit :

1. Création de la géométrie ;
2. Introduire les propriétés des matériaux (béton, acier et carbone), les modèles suivants sont utilisés :
 - Pour le béton le modèle de déformation de MAZARS'
 - Pour l'acier l'élément **'barre'** ;
 - Pour les plaques l'élément **'plaque'** ;
3. Créer les conditions aux limites ;
4. Créer le chargement ;
5. Lancer l'analyse par la fonction **'PASPAS'** ;
6. Extraire les résultats (Modélisation et simulation numérique Prise en Main de Cast3M).

III.3.1. Hypothèse de modélisation

Mécaniquement, les deux hypothèses de calcul, qui peuvent être utilisées en deux dimensions (2D), tenant compte du comportement d'une section, sont :

- L'hypothèse de déformation plane, qui traduit que la section est empêchée de se déplacer transversalement.
- L'hypothèse de contrainte plane, qui autorise par contre un déplacement transversal.

La modélisation en deux dimensions (2D) n'est donc pas tout à fait exacte mais très suffisante pour notre étude car la mise en œuvre d'une modélisation en trois dimensions (3D) serait beaucoup trop lente.

III.3.2. Géométrie

La géométrie d'une poutre est récupérée directement de la modélisation mécanique 2D. La **Figure 3.3** montre une poutre (à section rectangulaire) de longueur 2m et de hauteur 0.3m ainsi définie et maillé. Il est à signaler que la troisième dimension (largeur de la poutre) est prise en compte dans notre programme et elle est égale à 0.2m. Le maillage est réalisé avec des éléments triangulaires à 3 nœuds.



Figure 3.3: Maillage de la poutre.

III.3.3. Conditions aux limites

Les conditions de blocage des déplacements au niveau des appuis sont appliquées, où la poutre est simplement appuyée.

III.3.4. Chargement

Le chargement est défini par un vecteur de force sous forme de déplacements appliqués à mi-portée de la poutre (**Figure 3.4**).

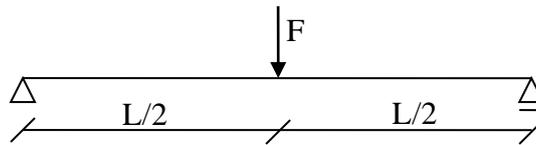


Figure 3.4: Chargement de la poutre.

III.3.5. Caractéristiques des matériaux

a-Béton

- Résistance à la compression : 34MPa
- Résistance à la traction : 2.64MPa
- Coefficient de poisson : 0.20
- Masse volumique : 2200 Kg/m³
- Module d'élasticité : 3.15MPa

b-Acier

- Limite élastique : 400MPa
- Module d'Young : 210 000 MPa
- Coefficient de Poisson : 0.30
- Masse volumique : 7800 Kg/m³

c- Plaques en PRFC

- Limite élastique : entre 20et 400GPa
- Module d'élasticité : 210 000MPa
- Epaisseur : entre 0.1 et 10 mm

III.4. Validation du programme

Le tableau 3.1 présente des poutres en béton armé avec et sans plaque écrasées par Hashemi et al (2008).

Tableau 3.1: Détails des poutres.

Poutre	N°	f'_c (MPa)	L (mm)	$-b$ $-h$ (mm)	ρ	ρ'	f_y (MPa)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (GPa)	e_{frp} (mm)
AH0	1	77.00	3000	150 250	2Φ16	2Φ10	412.5	-	-	-
AH1	2	77.00	3000	150 250	2Φ16	2Φ10	412.5	3850	230	0.045
AH4	3	77.00	3000	150 250	2Φ16	2Φ10	412.5	3850	230	0.18

Les **Tableaux 3.2-4** présentent les résultats des flèches et des forces obtenus expérimentalement par Hashemi et al (2008) et l'autre obtenus par la modélisation numérique. D'après les résultats des tableaux, les conclusions suivantes peuvent être retirées :

- Les résultats du tableau 3.2 montrent la bonne prédiction du modèle numérique à l'état élastique, où le rapport entre la flèche numérique et expérimentale ($\Delta_{y,Num} / \Delta_{y,Exp}$) varie entre 0.86 et 1.15, avec une moyenne de 1.01 et un écart type qui égale à 0.15.
- Le tableau 3.3 montre que le modèle numérique a fourni des flèches ultimes très proches de l'expérimentation, où le rapport ($\Delta_{u, Num} / \Delta_{u, Exp}$) varie entre 0.88 et 1.09, avec une moyenne de 0.98 et un écart type qui égale à 0.11.
- Le tableau 3.4 montre que le modèle numérique a bien prédit la forces maximum appliquée, où le rapport ($F_{u,Num} / F_{u,Exp}$) varie entre 0.90 et 1.10, avec une moyenne de 1.02 et un écart type qui égale à 0.11.

En générale, la comparaison entre les résultats numériques et expérimentales a montré la bonne performance du modèle numérique à l'état élastique et ultime.

Tableau 3.2 : Flèches élastiques expérimentales et numériques.

N°	$\Delta_{y,Exp}$ (mm)	$\Delta_{y,Num}$ (mm)	$\frac{\Delta_{y,Num}}{\Delta_{y,Exp}}$
1	21.00	18.00	0.86
2	13.00	15.00	1.15
3	9.83	10.00	1.02
MOY			1.01
ET			0.15

Tableau 3.3 : Flèches ultimes expérimentales et numériques.

N°	$\Delta_{u,Exp}$ (mm)	$\Delta_{u,Num}$ (mm)	$\frac{\Delta_{u,Num}}{\Delta_{u,Exp}}$
1	102.00	98.00	0.96
2	50.42	55.00	1.09
3	32.85	29.00	0.88
MOY			0.98
ET			0.11

Tableau 3.4 : Forces maximales expérimentales et numériques.

N°	$F_{u,Exp}$ (kN)	$F_{u,Num}$ (kN)	$\frac{F_{u,Num}}{F_{u,Exp}}$
1	81.25	85.30	1.05
2	89.90	99.00	1.10
3	117.30	105.10	0.90
MOY			1.02
ET			0.11

III.5. Conclusion

Le modèle numérique construit dans ce chapitre sera utilisé dans le chapitre suivant pour mener une étude paramétrique sur le comportement des poutres en béton armé renforcées avec des plaques en PRFC. Le modèle est basé sur la méthode des éléments finis.

CHAPITRE IV

Etude paramétrique

IV.1. Introduction

Le présent chapitre fait l'objet de l'étude paramétrique de cette recherche. Premièrement, la géométrie de la poutre étudiée ainsi que ses détails seront présentées. Ensuite, l'effet des différentes propriétés des plaques en FRP sur le comportement des poutres sera discuté. L'étude sera incluse d'une part, les flèches élastique et ultime, et d'autre part, les forces correspondantes. Dans ce contexte, le module d'élasticité sera varié de 20 à 400GPa et l'épaisseur de la plaque sera variée de 0.1 à 10mm, et enfin, la limite élastique des plaques sera variée entre 800 et 4000MPa.

IV.2. Détails des poutres

La **Figure 4.1** présente la géométrie de la poutre étudiée. Cette poutre est de 20x30cm² de section avec une longueur de 2m, la poutre est simplement appuyée, soumise à une force à mi-portée. Quatre armatures de diamètre $\phi = 8\text{mm}$ sont adoptées, deux comme armatures tendues et deux comme armatures comprimées ayant une limite élastique égale à 400MPa. La résistance de béton est égale à 34MPa. Dans la présente étude, l'effet des cadres transversaux est négligé, alors, le béton est considéré comme non confiné.

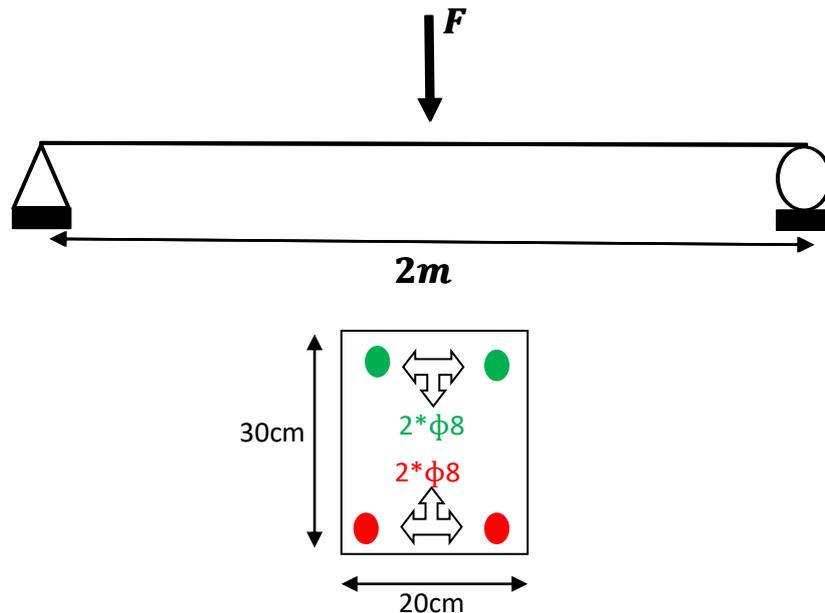
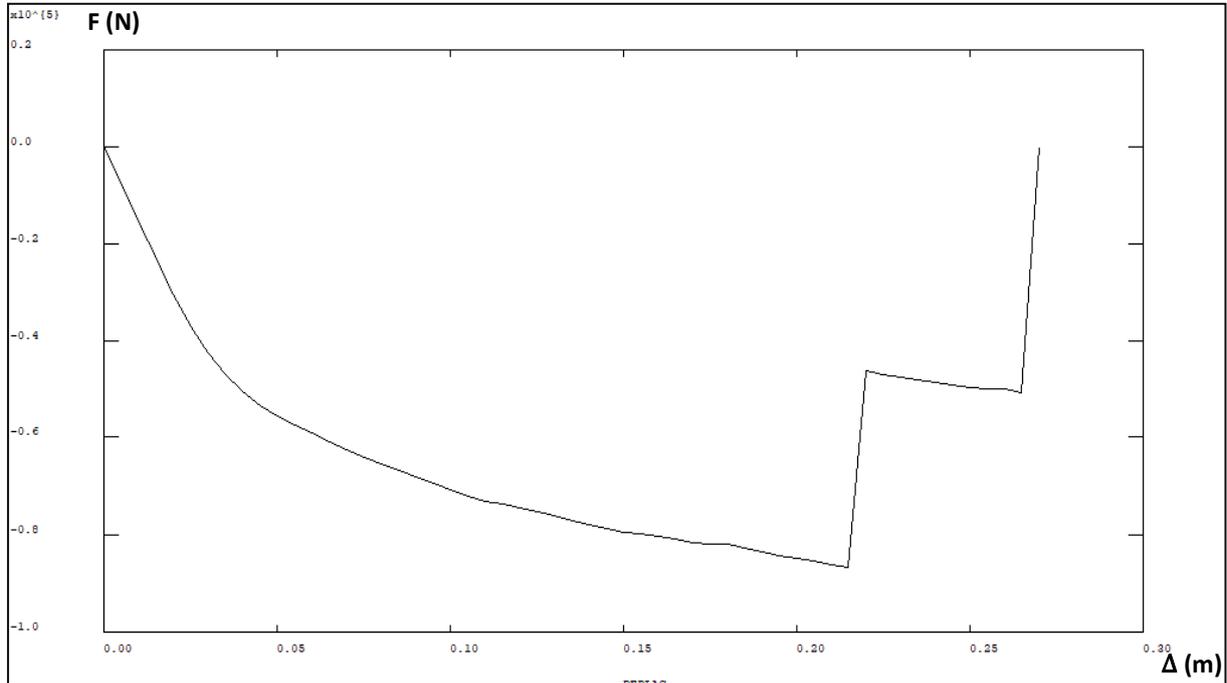


Figure 4.1: Détails de la poutre étudiée.

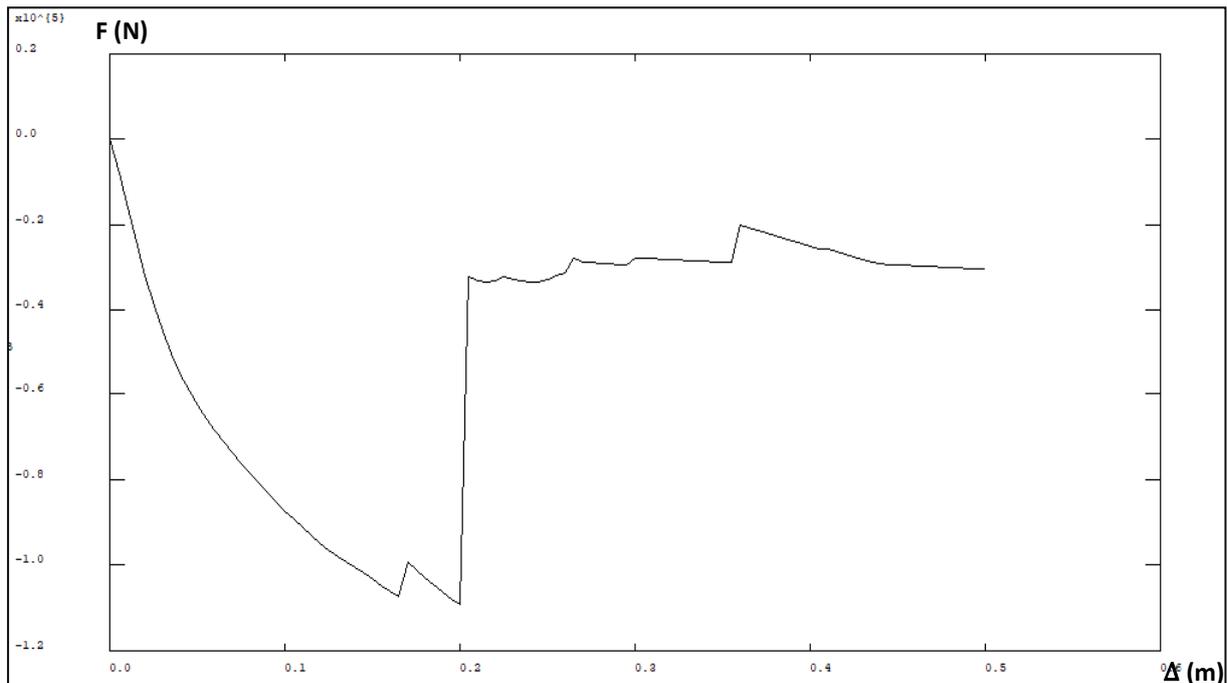
IV.3. Etude paramétrique

IV.3.1. Effet du module d'élasticité des plaques (E_{frp})

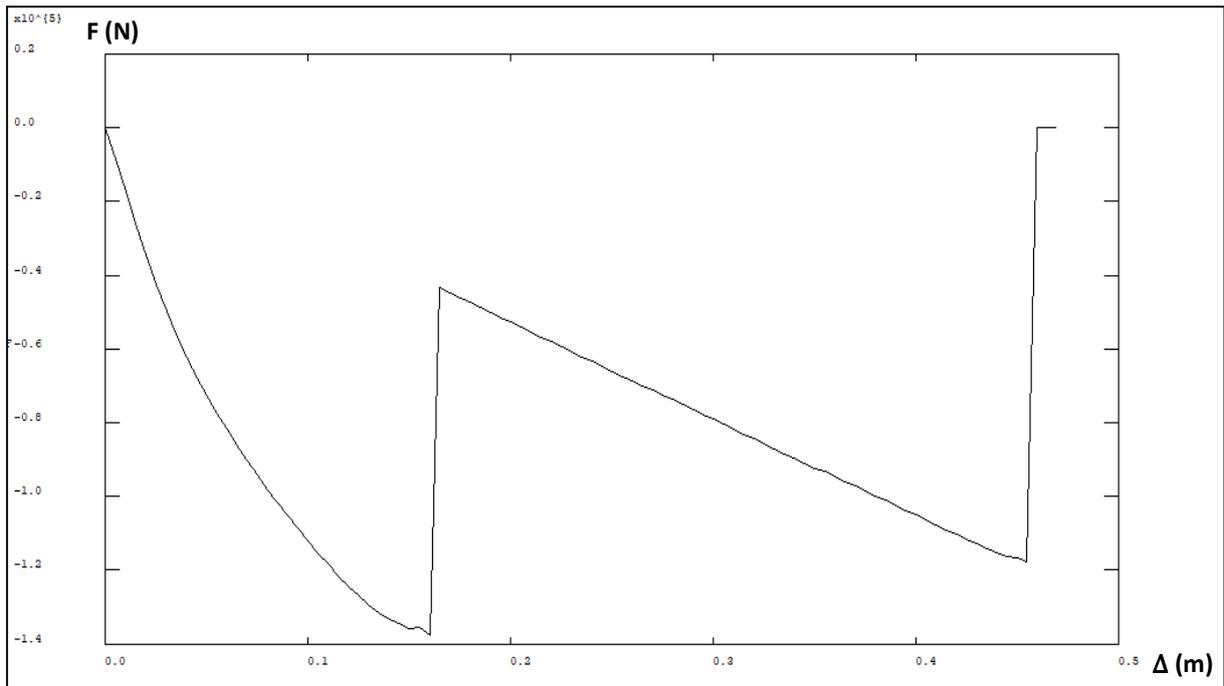
Les diagrammes force-déplacement obtenus sont présentés dans les **Figures 4.2a-f** correspondants aux modules d'élasticité 20, 40, 80, 160, 320 et 400GPa respectivement.



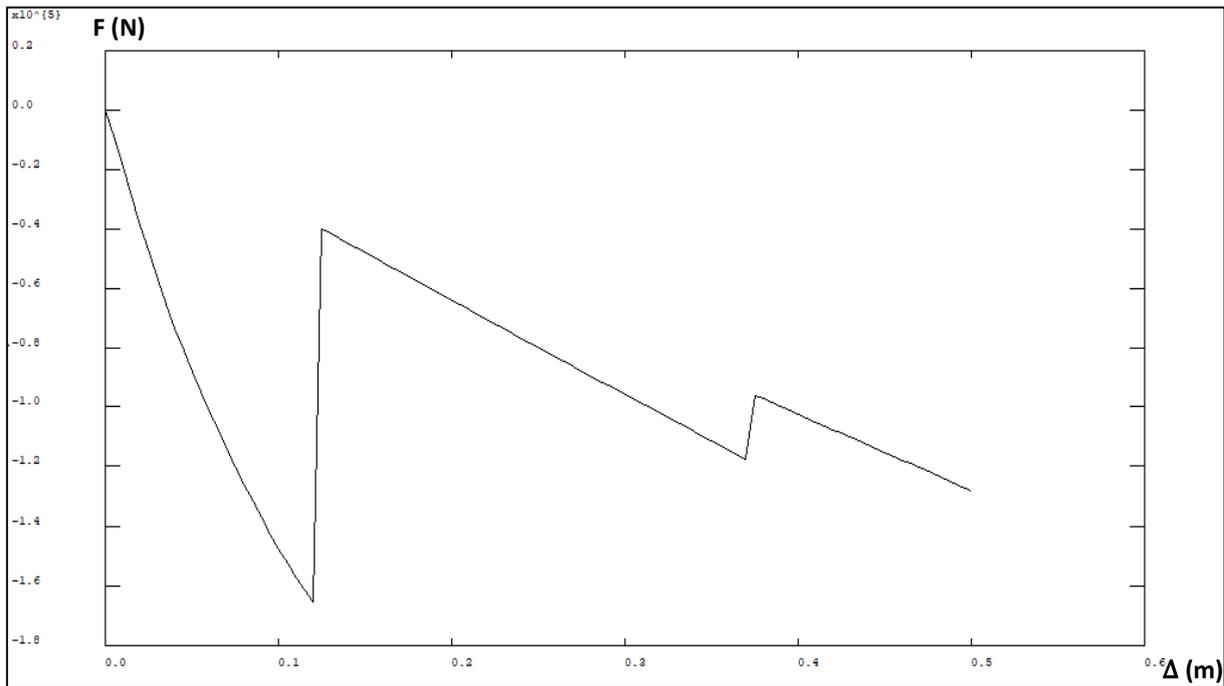
-a-



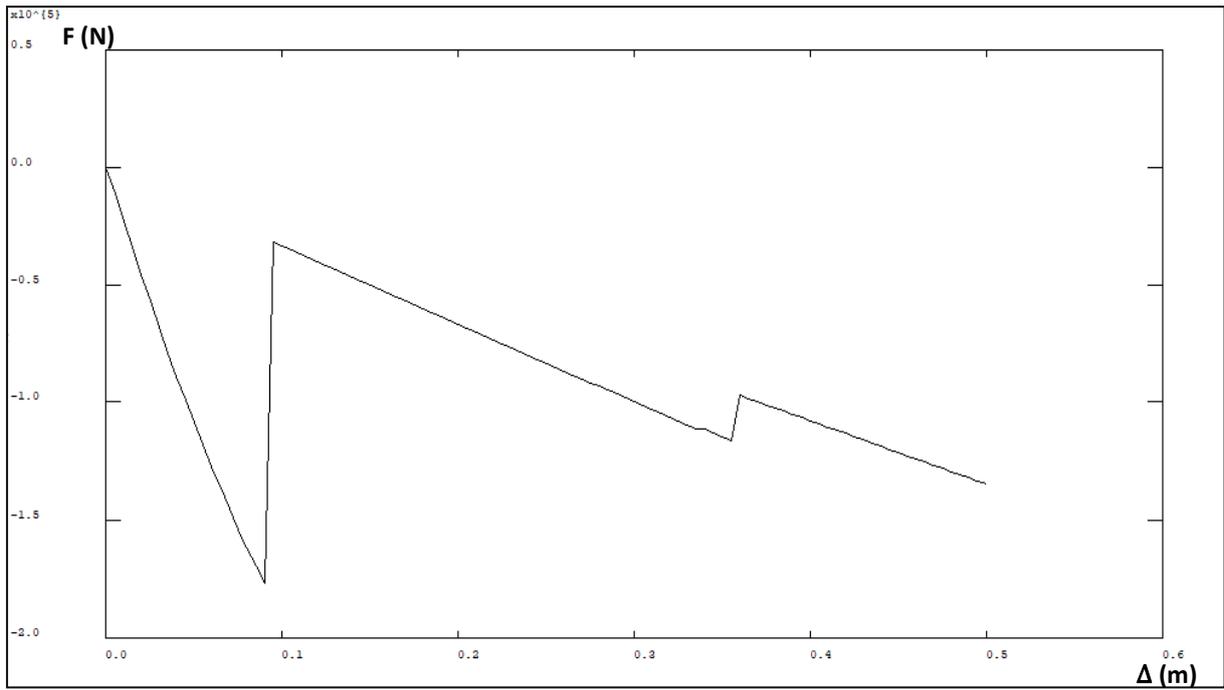
-b-



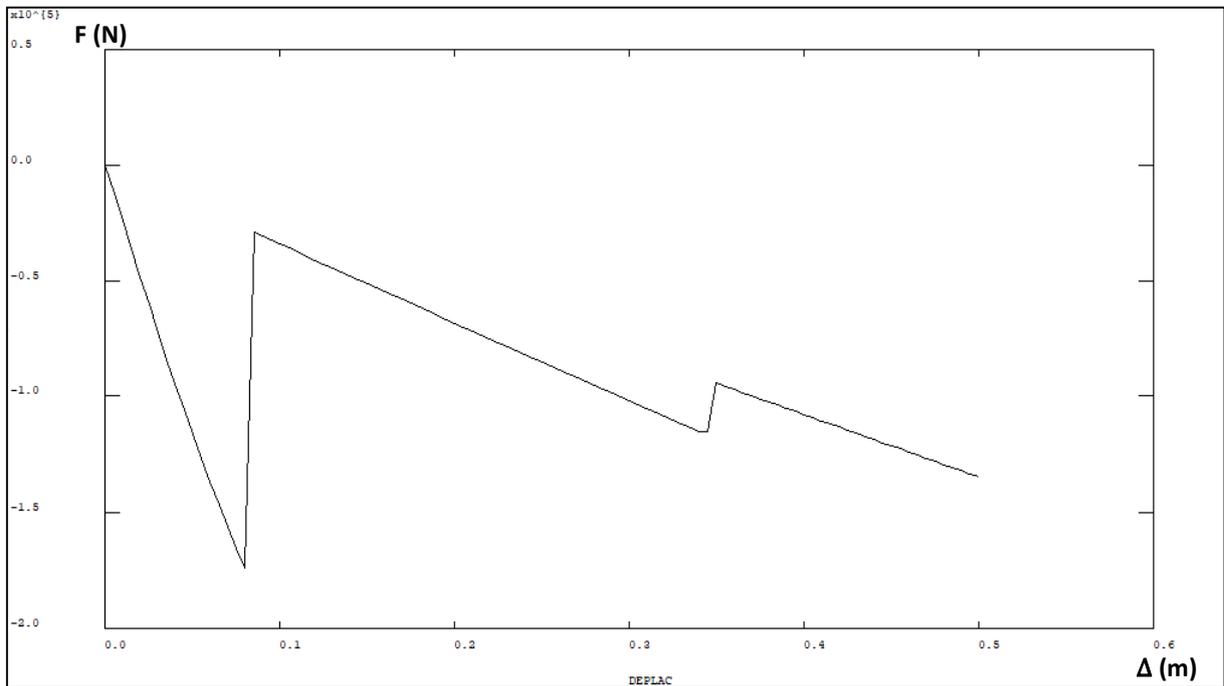
-c-



-d-



-e-



-f-

Figure 4.2: Diagrammes F- Δ en fonction de l'effet du module d'élasticité.

Le **Tableau 4.1** présente les résultats obtenus depuis l'analyse numérique de l'effet du module d'élasticité des plaques « E_{frp} » sur le comportement des poutres. L' E_{frp} est varié de 20 à 400GPa.

Tableau 4.1: Résultats de l'effet du module d'élasticité des plaques (E_{frp})

E_{frp} (GPa)	Δ_y (mm)	F_y (kn)	F_{max} (kN)	Δ_u (mm)	μ_Δ
20	80.00	65.03	86.71	215	2.70
40	77.50	81.78	109.04	200	2.58
80	75.00	103.14	137.53	160	2.13
160	70.00	124.08	165.44	120	1.71
320	60.00	132.61	176.81	90	1.50
400	57.00	132.74	176.90	80	1.40

La **Figure 4.3** présente la variation de la flèche élastique (Δ_y) en fonction du module élastique (E_{frp}). Cette figure montre que le module (E_{frp}) a une influence négative sur la flèche (Δ_y), où l'augmentation du module (E_{frp}) de 20 à 400GPa peut diminuer la flèche (Δ_y) de 80 à 57mm, c.-à-d., d'environ 29%.

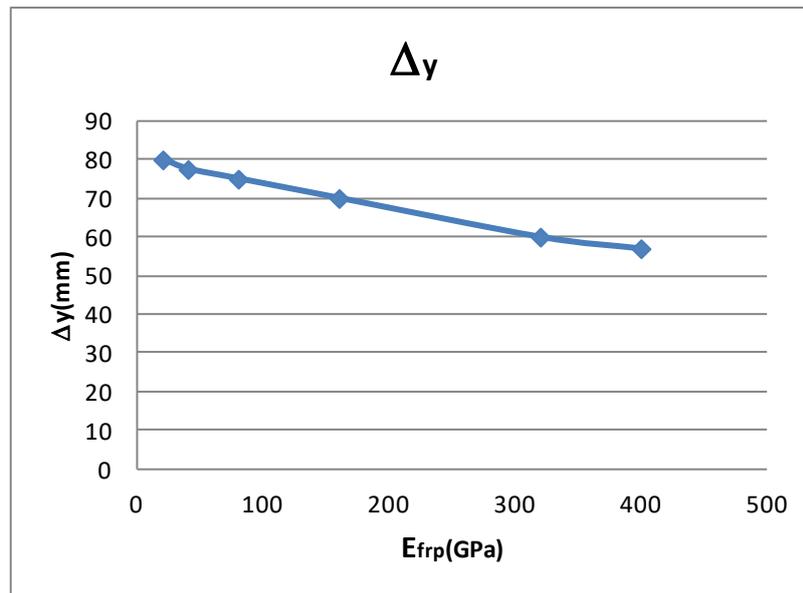


Figure 4.3: Effet d' E_{frp} sur Δ_y .

D'autre part, la **Figure 4.4** présente la variation de la force correspondante à la limite élastique des poutres (F_y). La figure montre que cette force augmente avec l'augmentation du module (E_{frp}), où la courbe prend une forme croissante. Après une certaine valeur d' E_{frp} , la force (F_y) atteint son maximum, et elle devient presque constante. L'augmentation du module (E_{frp}) de 20 à 400GPa a augmenté (F_y) de 65 à 132kN, c.-à-d., de plus de 100%.

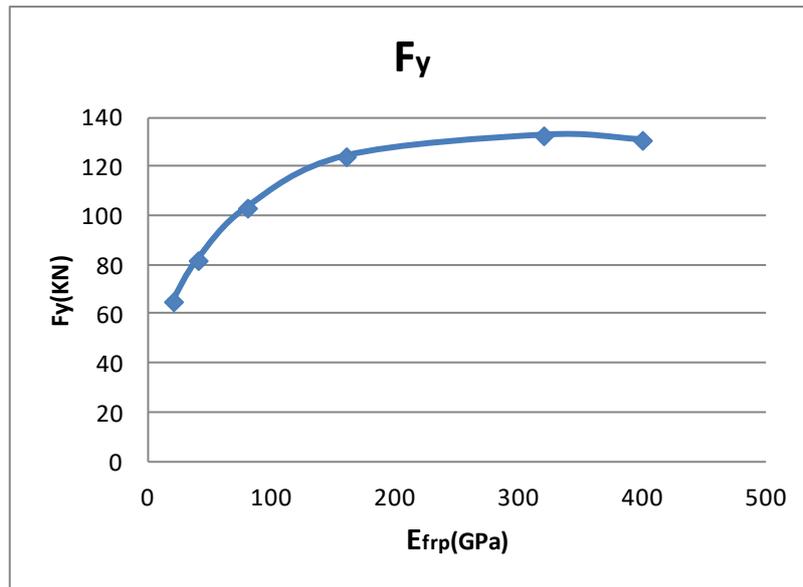


Figure 4.4: Effet d' E_{frp} sur F_y .

Concernant la force maximale appliquée, la **Figure 4.5** illustre le développement de la force maximale obtenue en fonction de la variation du module (E_{frp}). La figure élucide que le module (E_{frp}) influe positivement la force (F_y) jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale, où elle devient presque constante. L'accroissement du module (E_{frp}) de 20 à 400GPa a augmenté (F_{max}) de 86 à 176kN, c.-à-d., de plus de 100%.

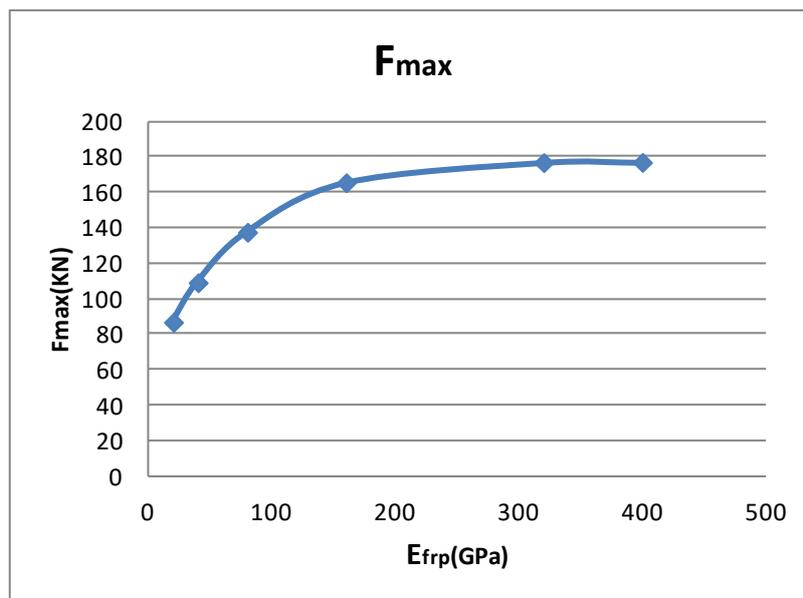


Figure 4.5: Effet d' E_{frp} sur F_{max} .

Toujours dans la phase plastique. La **Figure 4.6** présente la flèche ultime Δ_u (maximale) obtenue en fonction de la variation du module ($E_{f_{rp}}$). Cette figure montre que le module ($E_{f_{rp}}$) a une influence négative sur la flèche (Δ_u). L'accroissement du module ($E_{f_{rp}}$) de 20 à 400GPa a diminué cette flèche de 215 à 80mm, c.-à-d., d'environ 63%.

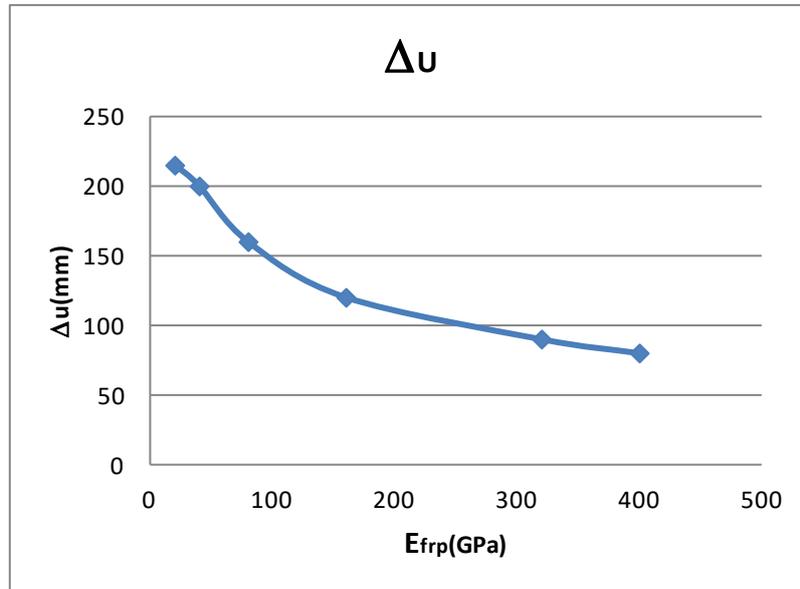


Figure 4.6: Effet d' $E_{f_{rp}}$ sur Δ_u .

S'agissant la **Figure 4.7** qui représente la courbe de la variation du facteur de la ductilité de déplacement (μ_{Δ}) en fonction du module ($E_{f_{rp}}$). Cette courbe indique que le module ($E_{f_{rp}}$) influe négativement la ductilité de déplacement. L'augmentation du module ($E_{f_{rp}}$) de 20 à 400 GPa a diminué le facteur (μ_{Δ}) de 2.70 à 1.40, c.-à-d., de plus de 48%.

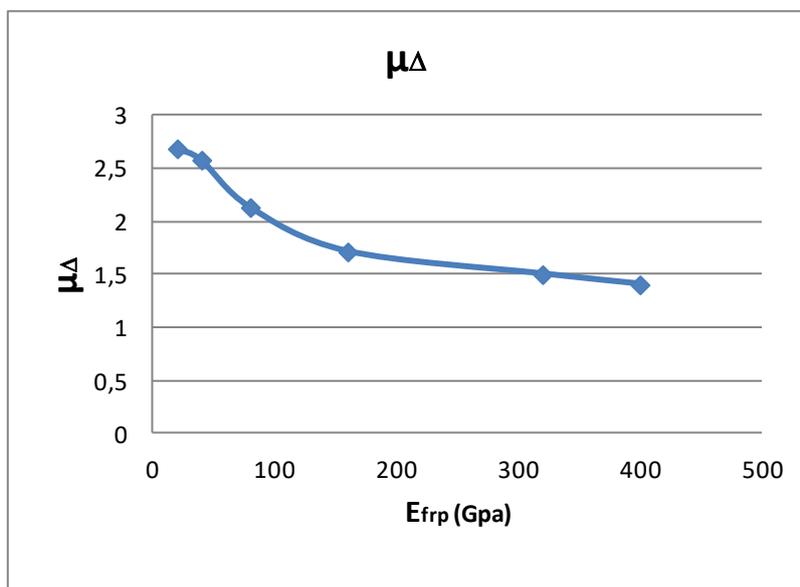
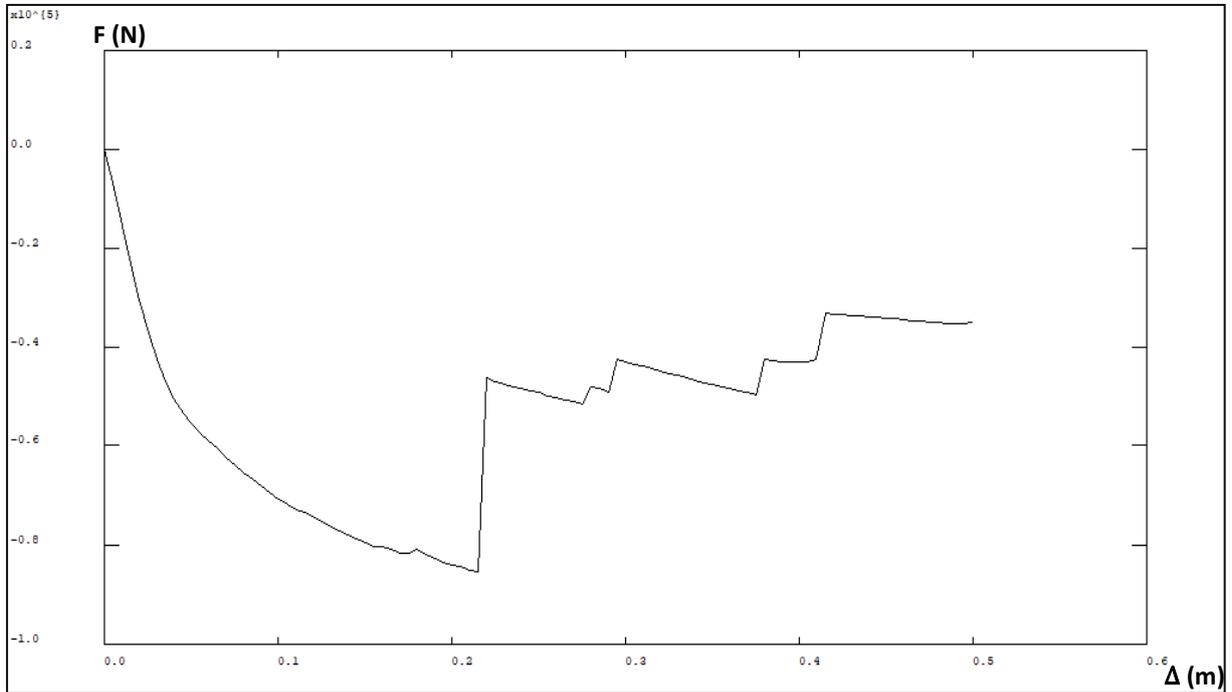


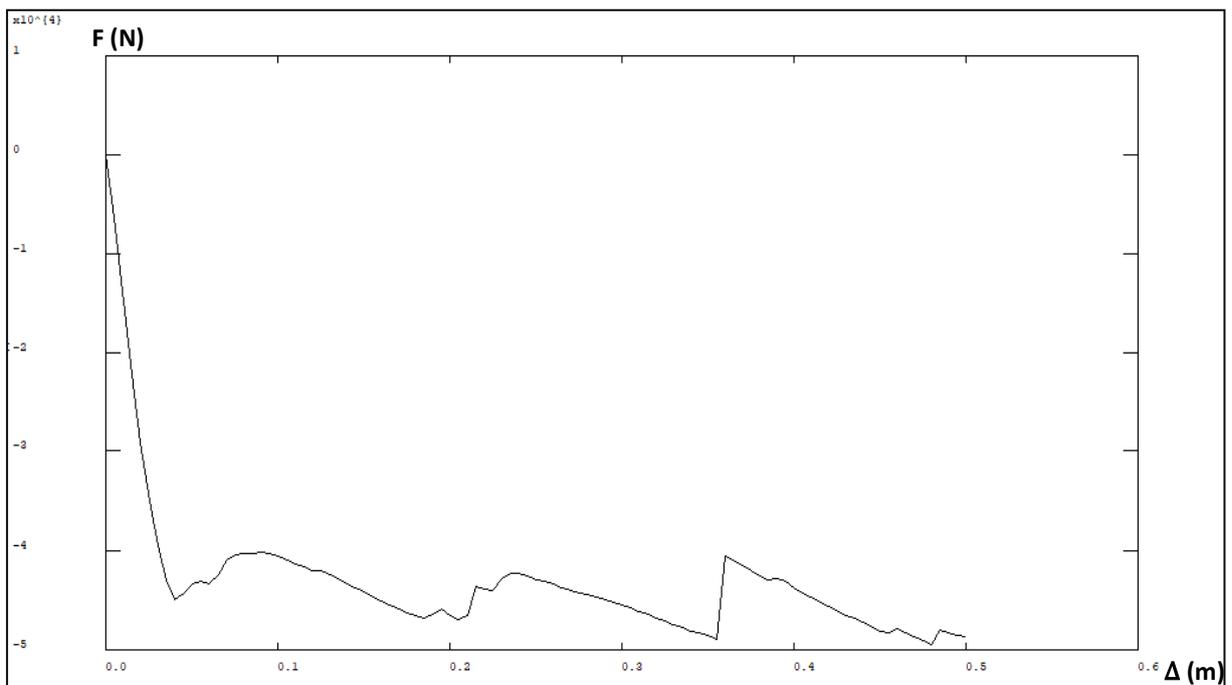
Figure 4.7: Effet d' $E_{f_{rp}}$ sur μ_{Δ} .

IV.3.2. Effet de l'épaisseur des plaques (ep_{fp})

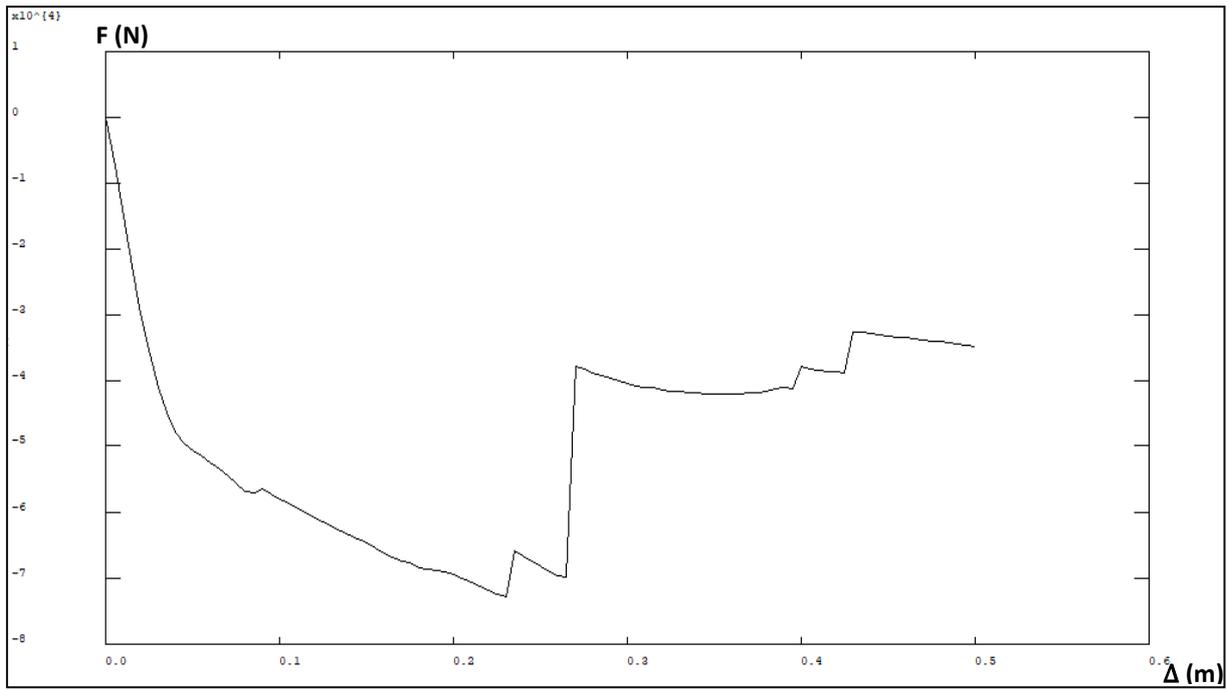
Les diagrammes force-déplacement obtenus sont présentés dans les **Figures 4.8a-h** correspondants aux épaisseurs des plaques (ep_{fp}) 0.1 ; 0.2 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 et 10 mm respectivement.



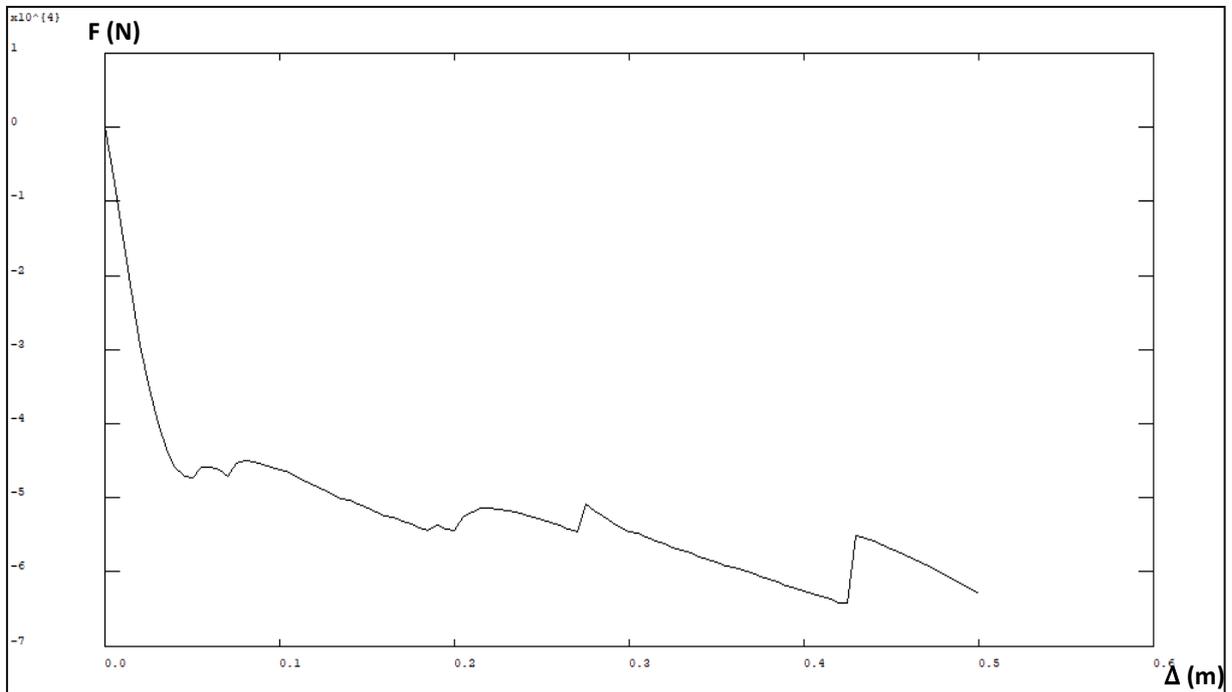
-a-



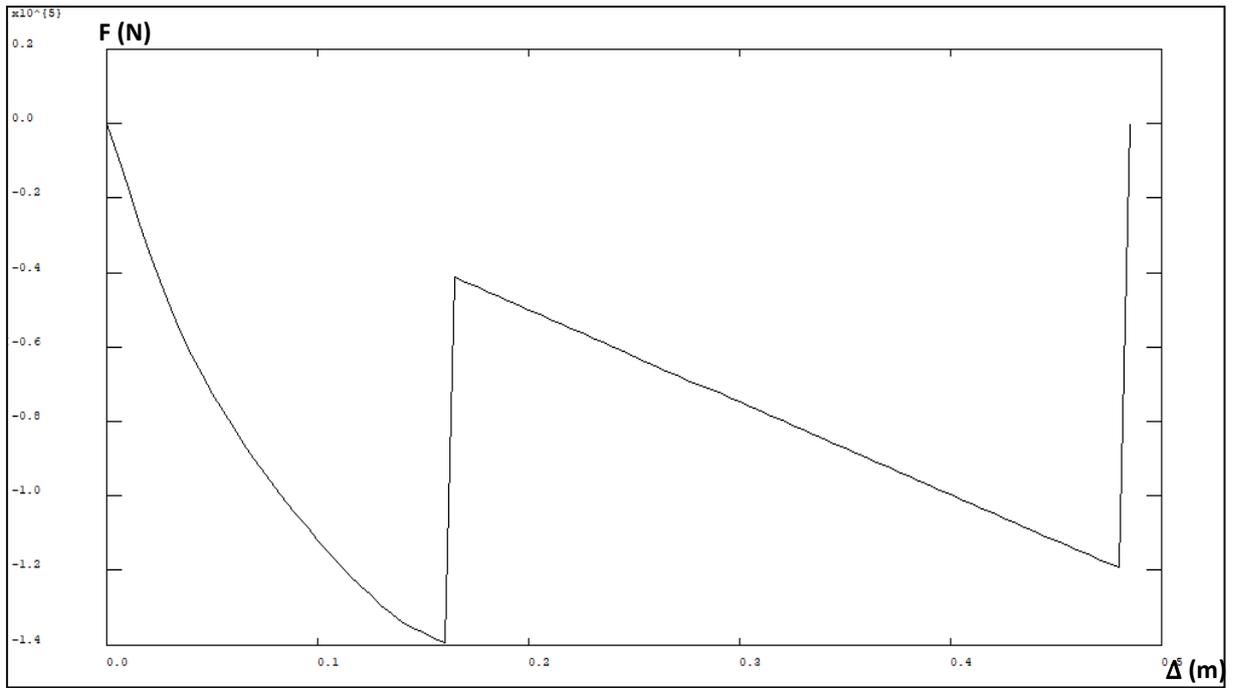
-b-



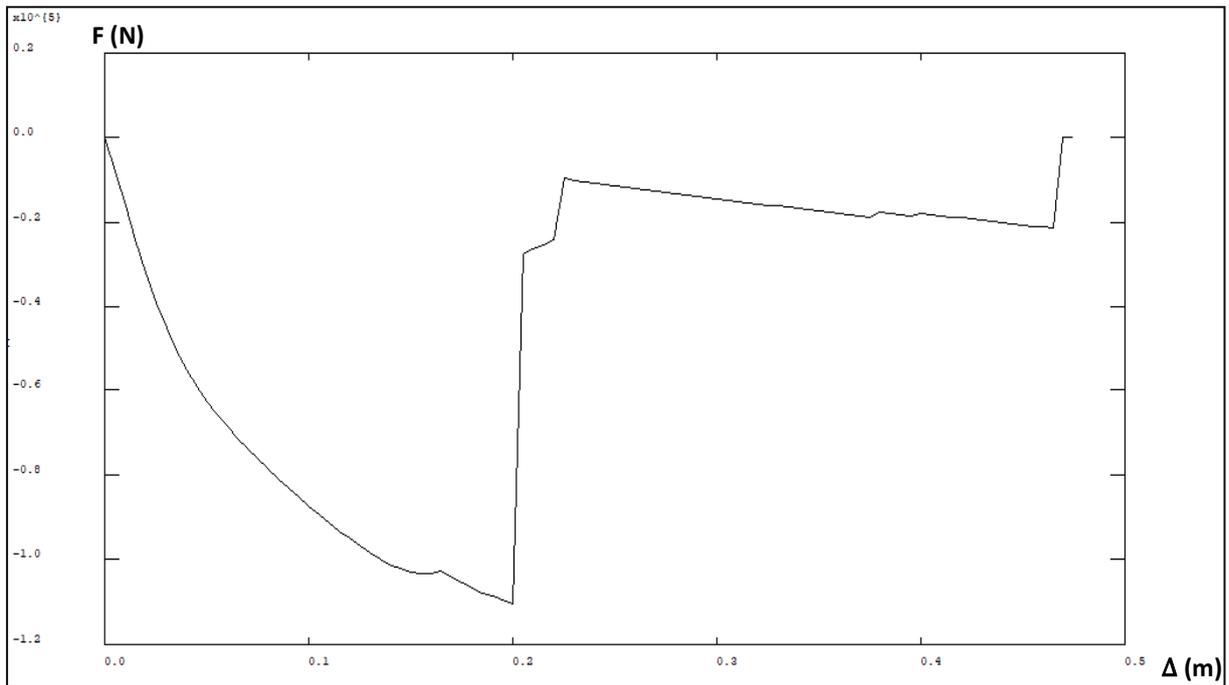
-c-



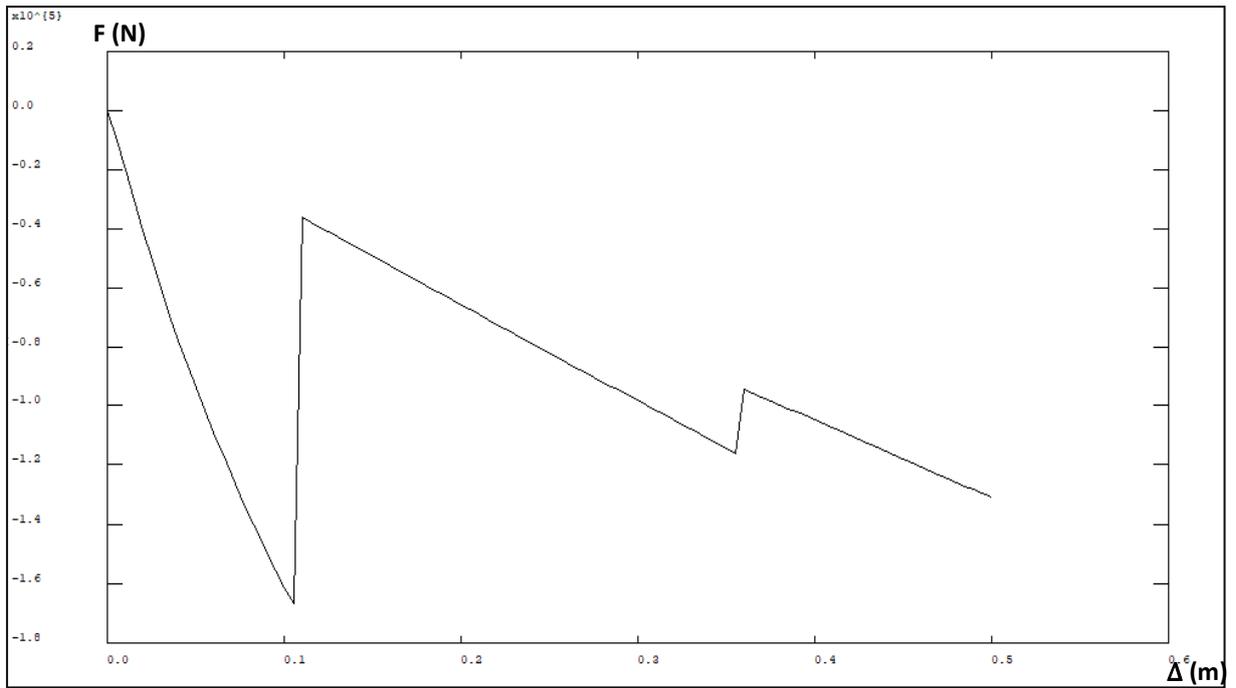
-d-



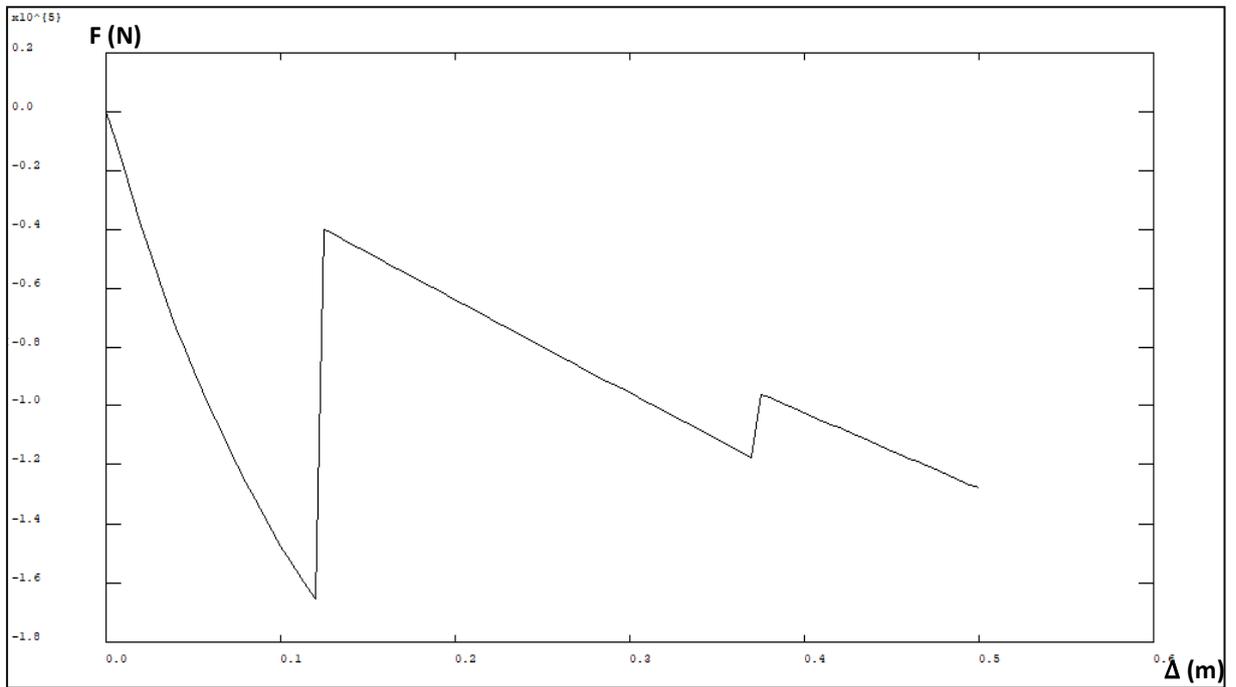
-e-



-f-



-g-



-h-

Figure 4.8: Diagrammes $F-\Delta$ en fonction de l'effet de l'épaisseur.

L'analyse de l'effet de l'épaisseur des plaques de renforcement (ep_{frp}) permet de construire le **Tableau 4.2**. L'épaisseur des plaques est variée de 0.1 à 10mm.

Tableau 4.2: Effet d'épaisseur des plaques (ep_{frp}).

ep_{frp} (mm)	Δ_y (mm)	F_y (kN)	F_{max} (kN)	Δ_u (mm)	μ_Δ
0.1	25	35.84	47.78	450	18.00
0.2	30	48.15	64.20	425	14.17
0.5	60	52.37	69.83	270	4.50
1	75	64.15	85.53	215	2.87
2	90	82.94	110.58	200	2.22
4	90	104.63	139.51	160	1.78
8	90	124.00	165.33	120	1.33
10	90	124.95	166.60	105	1.17

La **Figure 4.9** présente la variation de la flèche élastique (Δ_y) en fonction de l'épaisseur des plaques (ep_{frp}). Cette figure indique que l'accroissement de l'épaisseur augmente la flèche élastique (Δ_y) jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale, puis, elle devient presque constante. Le développement de l'épaisseur (ep_{frp}) de 0.1 à 10mm a augmenté (Δ_y) de 25 à 90 mm, c.-à-d., de plus de 250%.

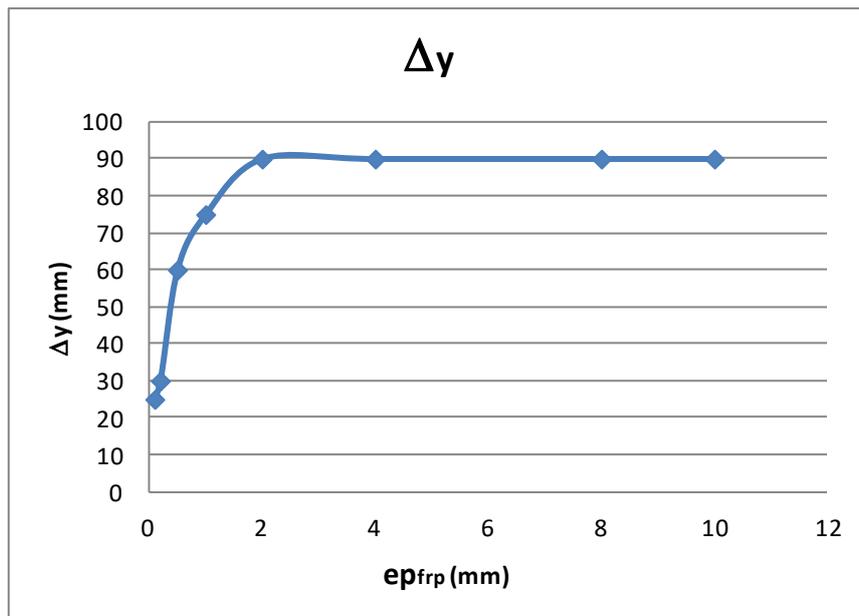


Figure 4.9 : Variation du Δ_y en fonction d' ep_{frp} .

D'autre part, la **Figure 4.10** illustre le développement de la force correspondante à la limite élastique (F_y) en fonction de l'épaisseur de la plaque (ep_{frp}). Cette figure montre que (F_y) augmente de 35.83 à 124.95kN quand l'épaisseur de la plaque (ep_{frp}) augmente de 0.1 à 10 mm. La courbe de cette figure prend une forme parabolique croissante et construit un pic qui représente le maximum de cette force. L'accroissement d' ep_{frp} de 0.1 à 10mm augmente la force (F_y) de plus de 240%.

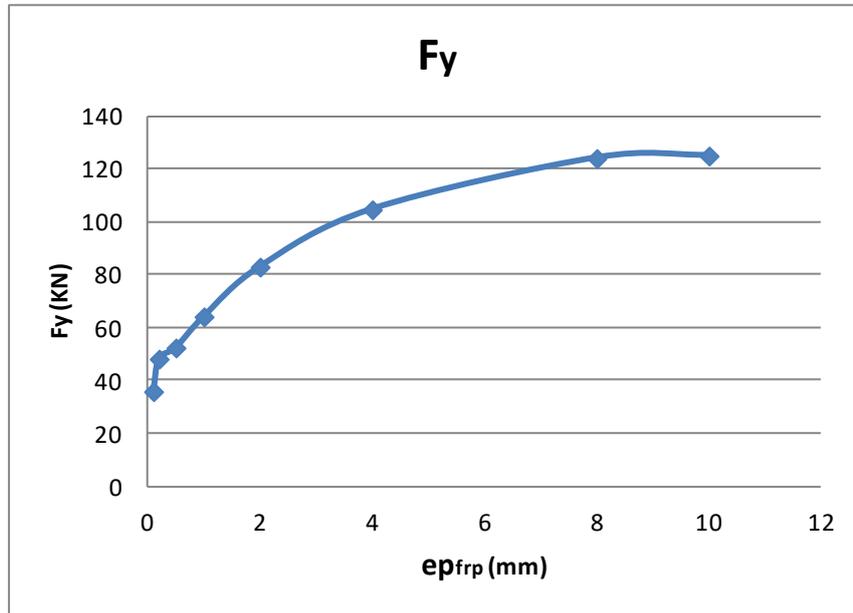


Figure 4.10 : Variation du F_y en fonction d' ep_{frp} .

Selon La **Figure 4.11** qui représente la variation de la force maximale (F_{max}) en fonction de l'épaisseur de la plaque (ep_{frp}), il est clair que cette épaisseur a une influence positive sur la force maximale (F_{max}) qui prend une forme parabolique croissante. Cette parabole est finie par un petit palier qui définit le maximum de la force (F_{max}) que peut supporter la poutre. L'augmentation de l'épaisseur (ep_{frp}) de 0.1 à 10 mm augmente la force maximale (F_{max}) de 47.78 à 166.6 kN, c.-à-d., de plus de 240%.

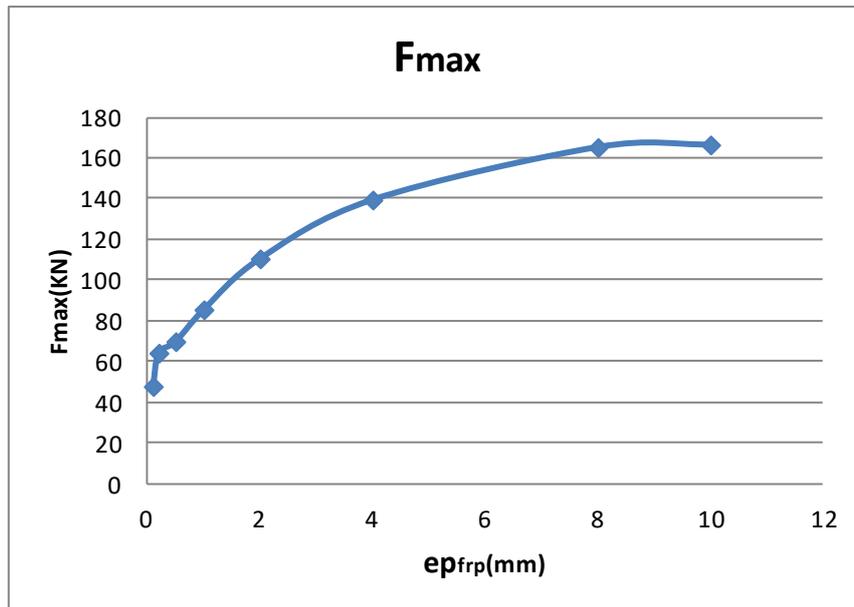


Figure 4.11 : Variation du F_{max} en fonction d'ep_{frp}.

Concernant la flèche ultime (Δ_u) (maximale), la **Figure 4.12** énonce l'accroissement de (Δ_u) obtenue en fonction de la variation de l'épaisseur (ep_{frp}). L'interprétation de cette figure spécifie que l'épaisseur (ep_{frp}) a une influence négative sur la flèche (Δ_u). L'élévation de l'épaisseur (ep_{frp}) de 0.1 à 10mm a diminué cette flèche de 450 à 105mm, c.-à-d., d'environ 76%.

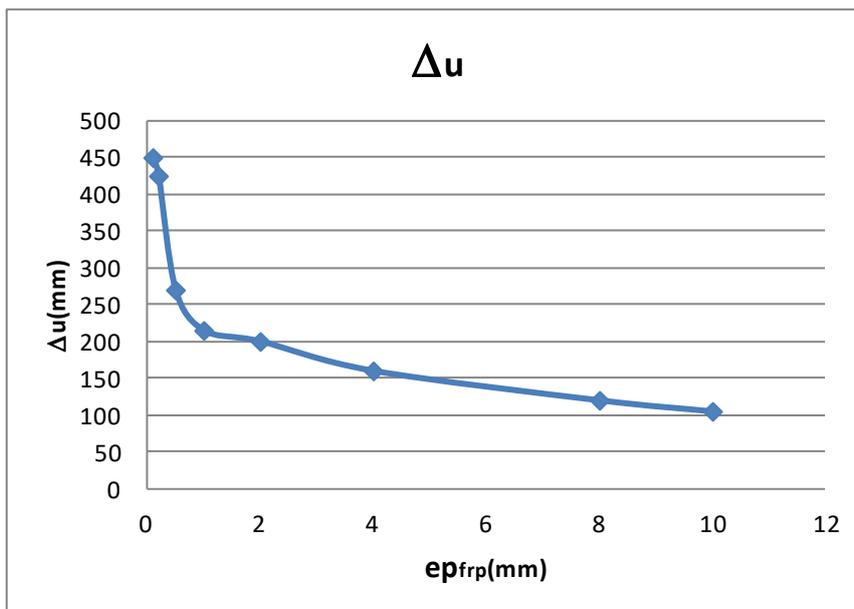


Figure 4.12 : Variation du Δ_u en fonction d'ep_{frp}.

Enfin, la **Figure 4.13**, illustre la variation du facteur de ductilité (μ_{Δ}) en fonction du développement de l'épaisseur (ep_{frp}) de 0.1 à 10mm. La figure a déterminé que l'épaisseur (ep_{frp}) influe négativement le facteur de ductilité (μ_{Δ}), où il s'est diminué de 18 à 1.17, c.-à-d., d'environ 93%.

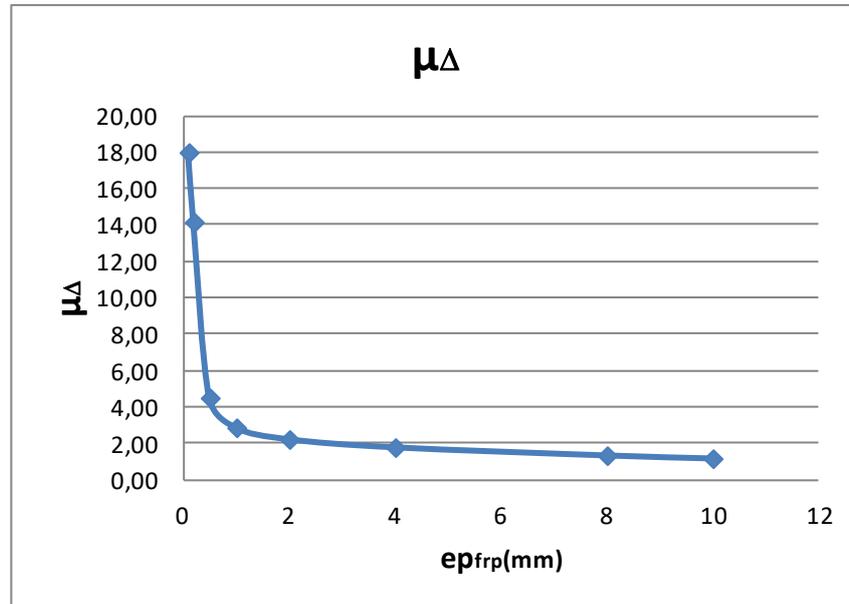
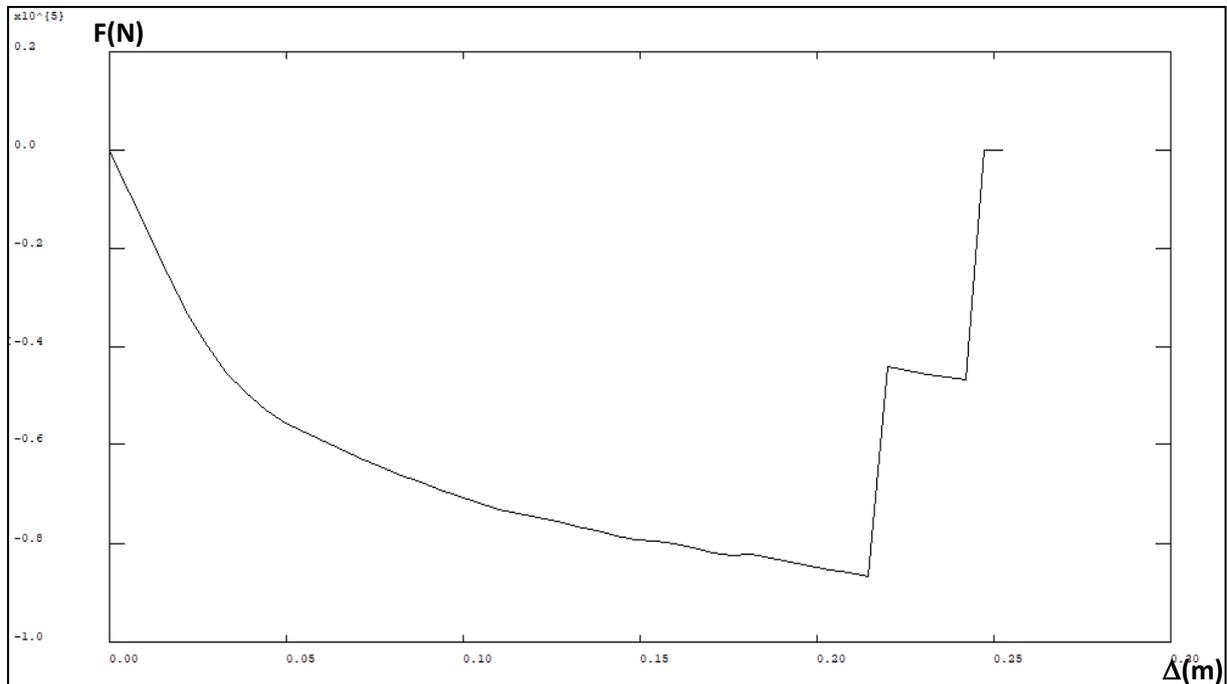


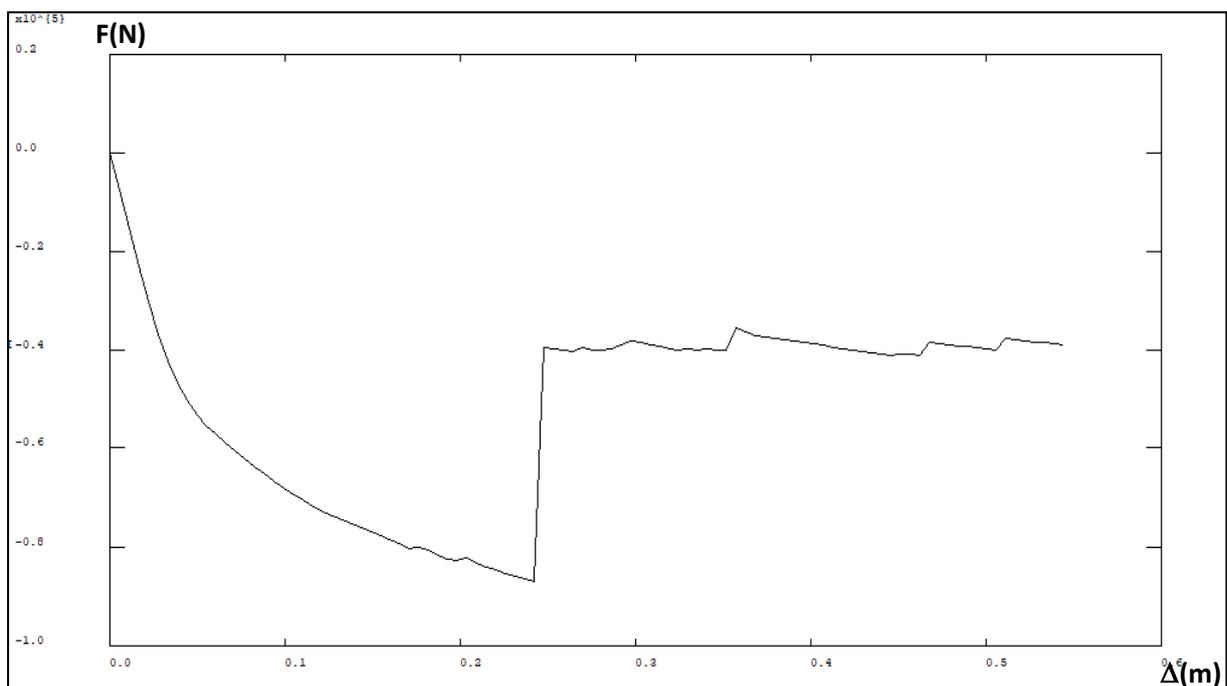
Figure 4.13 : Variation de la ductilité μ_{Δ} en fonction d' ep_{frp} .

IV.3.3. Effet de la limite élastique des plaques (F_{fp})

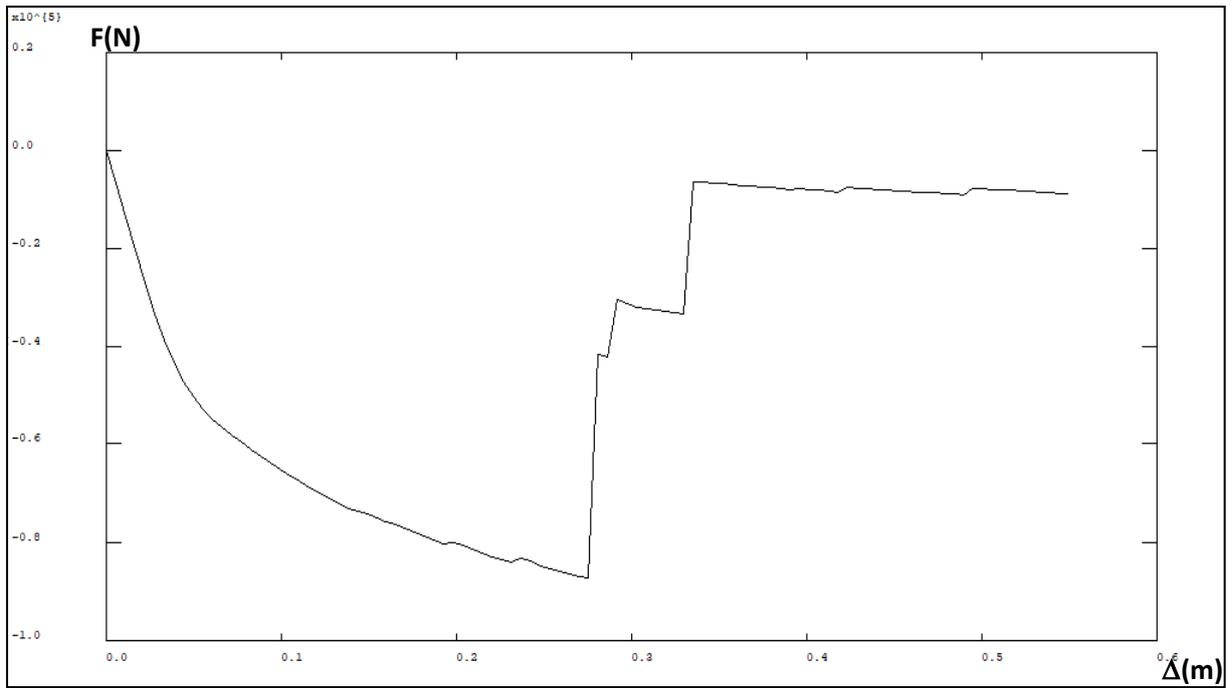
Les diagrammes force-déplacement obtenus sont présentés dans les **Figures 4.14a-d** correspondants aux limites élastiques des plaques (F_{fp}) 800, 1600, 3200 et 4000MPa respectivement.



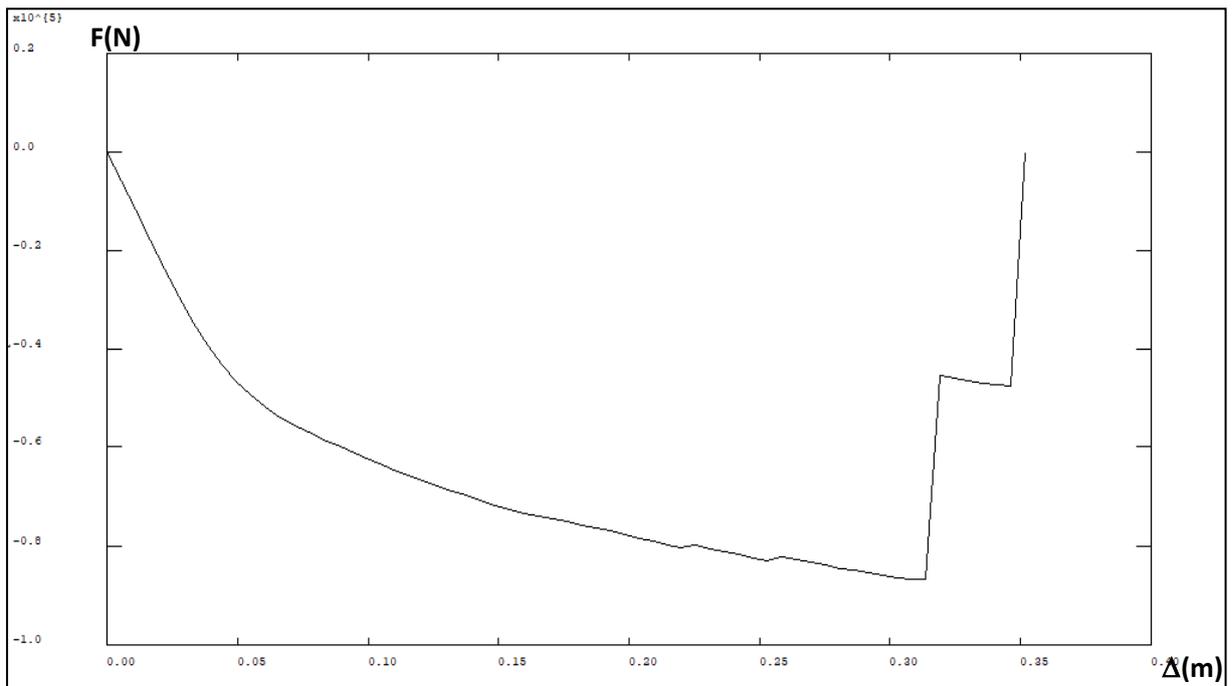
-a-



-b-



-c-



-d-

Figures 4.14: Diagrammes $F-\Delta$ en fonction de l'effet de la limite élastique.

Tableau 4.3: Effet de la limite élastique des plaques (F_{frp}).

F_{frp}	Δ_y (mm)	F_y (kN)	F_{max} (kN)	Δ_u (mm)	μ_Δ
800	77	65.02	86.69	214	2.78
1600	88	65.25	87	242	2.78
3200	99	65.44	87.25	275	2.78
4000	112	65.51	87.34	313	2.79

Les résultats obtenus seront représentés graphiquement dans les figures suivantes de 4.15 à 4.19 ;

La **Figure 4.15** présente la variation de la flèche élastique (Δ_y) en fonction de la limite élastique des plaques (F_{frp}). Cette courbe illustre que l'accroissement de la limite élastique augmente la flèche élastique (Δ_y) jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur 99, où delà de cette valeur elle devient constante. L'augmentation de la limite élastique de 800 à 4000MPa conduit la flèche élastique à se diminuer de 77 à 112mm, c.-à-d., d'environ 47%.

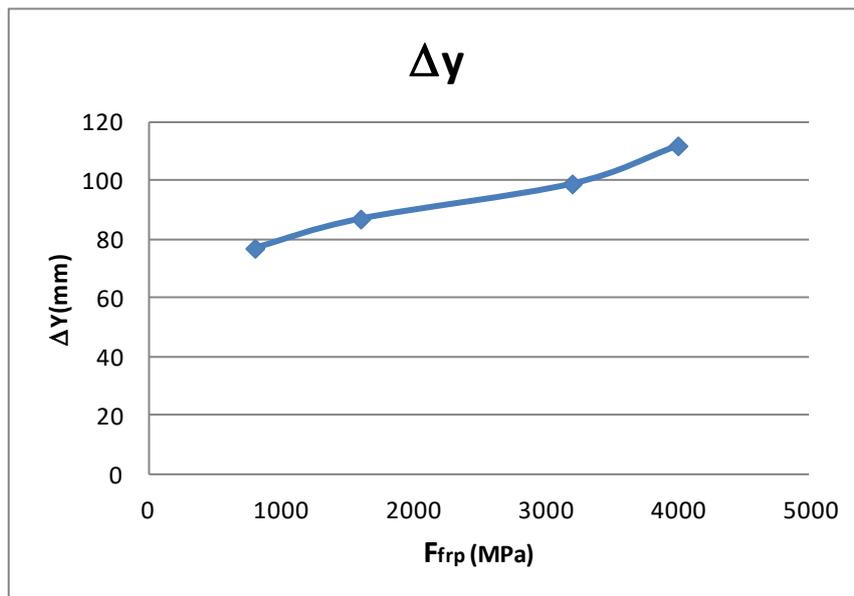


Figure 4.15: Variation du Δ_y en fonction F_{frp} .

La **Figure 4.16** qui représente le développement de la force correspondante à la limite élastique (F_y) en fonction de la limite élastique des plaques (F_{frp}). Cette figure montre que (F_y) augmente de 35.83 à 124.95kN quand la limite élastique (F_y) augmente de 800 à 4000MPa. La figure élucide que le module (F_{frp}) influe positivement la force (F_y) jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale. L'accroissement du module (F_{frp}) a augmenté (F_y) de 65.02 à 65.51kN, c.-à-d., presque de 1%.

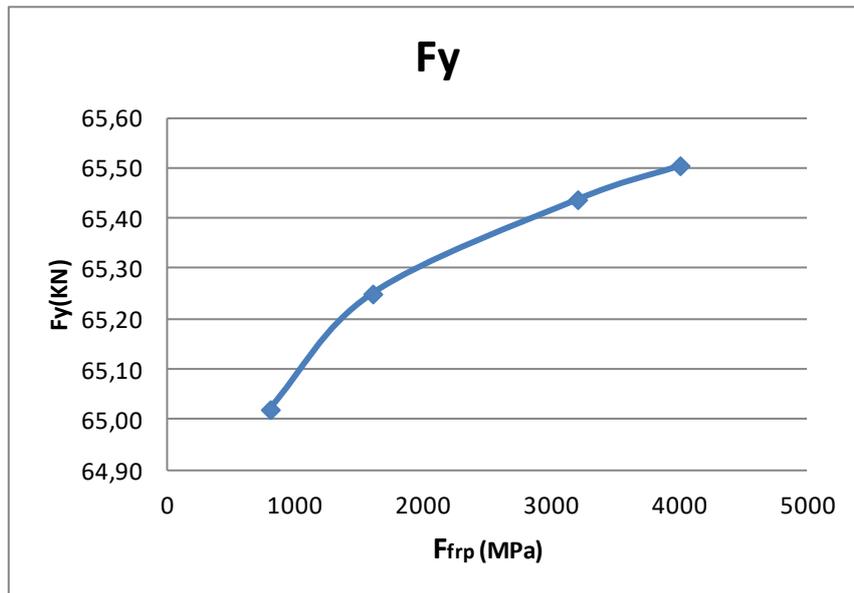


Figure 4.16: Variation du F_y en fonction F_{frp} .

Concernant la force maximale appliquée, la **Figure 4.17** illustre le développement de la force maximale obtenue en fonction de la limite élastique des plaques (F_{frp}). La figure élucide que le module (F_{frp}) influe positivement la force (F_{max}) jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale. L'accroissement du module (F_{frp}) de 800 à 4000MPa a augmenté (F_{max}) de 86.69 à 87.34kN, c.-à-d., moins de 1%.

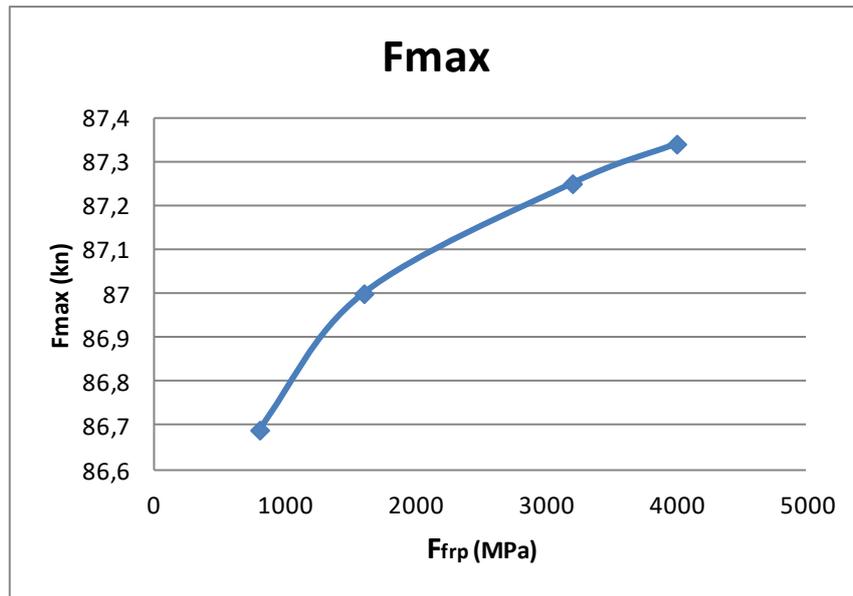


Figure 4.17: Variation du F_{max} en fonction F_{frp} .

La **Figure 4.18** présente la flèche ultime Δ_u (maximale) obtenue en fonction de la variation de la limite élastique des plaques (F_{frp}). Cette figure montre que le module (F_{frp}) a une influence positive sur la flèche (Δ_u). Le développement du module (F_{frp}) de 800 à 4000MPa a augmenté cette flèche de 214 à 313mm, c.-à-d., d'environ 47%.

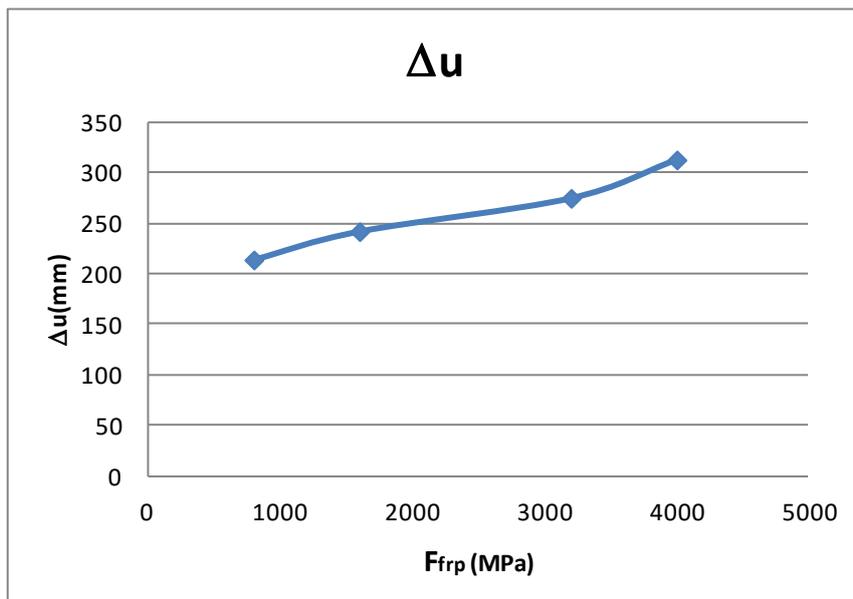


Figure 4.18: Variation du Δ_u en fonction F_{frp} .

Enfin, la **Figure 4.19** illustre la courbe qui éclaire l'effet positif de la limite élastique des plaques sur le facteur de la ductilité. L'accroissement de la limite élastique de 800 à 4000MPa augmente la ductilité de 2.78 à 2.79, c.-à-d., d'environ 0%

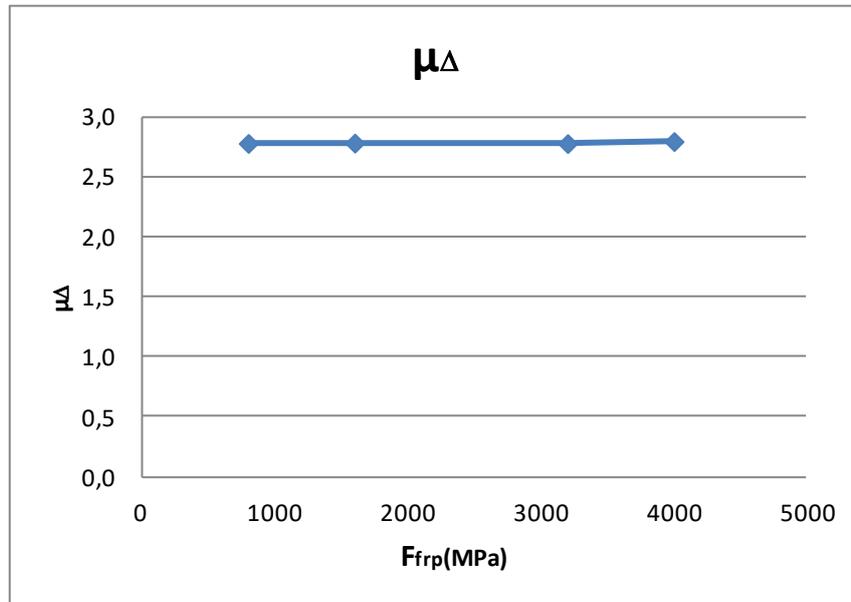


Figure 4.19: Variation du μ_{Δ} en fonction F_{frp} .

IV.4. Conclusion

D'après cette étude paramétrique, les principales conclusions suivantes peuvent être retenir. Le module élastique des plaques améliore la résistance de la poutre, mais il a un effet néfaste sur sa ductilité. D'autre part, L'épaisseur des plaques évolue la résistance de la poutre, mais il a un effet préjudiciable sur sa ductilité. Dans ce contexte, ces résultats ont montré que la plaque joue le rôle des armatures tendues parce qu'elle est collée dans la partie tendue de la poutre.

La limite élastique des plaques a un effet nul sur la résistance et la ductilité de la poutre, ceci dû au mode de rupture de la poutre, où la plaque est décollée pendant l'écrasement.

Conclusion

L'étude numérique présentée dans ce mémoire a permis d'établir des résultats décrivant le comportement des poutres renforcées par des plaques en (PRFC). Ces résultats ont été obtenus en se basant sur la programmation sous le logiciel Castem2000 version 18.

Les flèches et les forces maximales ont été étudiées à l'aide d'un modèle en 2D basé sur la méthode des éléments finis. Le programme est basé sur le modèle d'endommagement de Mazars. D'autre part, le modèle construit est validé face aux résultats expérimentaux collectés de la littérature.

L'étude paramétrique a montré que la plaque collée peut jouer le rôle des armatures tendues, où le module élastique et l'épaisseur des plaques ont un effet positif sur la résistance des poutres, par ailleurs, ils ont un effet négatif sur la ductilité des poutres. L'étude paramétrique a montré aussi que la limite élastique des plaques a un effet négligeable sur la résistance et la ductilité des poutres, ce dernier peut revenir au mode de rupture des poutres.

En perspective, l'étude peut s'élargir vers d'autres éléments en béton armé, en utilisant d'autres matériaux composites. Dans ce contexte, des études suivantes pourront réalisées :

- Sur le renforcement en flexion des dalles, poteaux et voiles béton armé
- Sur des poutres comportant des ouvertures.
- Etude comparative entre le renforcement avec les plaques ou des barres.

Enfin, l'étude de ce projet sera la source de notre avenir, ou bien sera une base et un point de départ pour notre vie professionnelle.

Références Bibliographiques

- ♣ Abdelhamid A, , Pathologie : cours pathologies et réhabilitations des structures), Polycopié de cours, Université Akli Mohand Oulhaj Bouira.
- ♣ Adhikary, S.D., Lia, B. and Fujikake, K. (2012), “Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading”. *Internl J. of Imp Engine.*
- ♣ Alfa-Carbon, 2022, <https://www.amazon.fr/Plaque-carbone-45-300-satin%20C3%A9/dp/B075DHTD85>
- ♣ Anders C, Carbon fiber reinforced polymers for strengthening of structural elements, University of technology Lulea Sweden, 2003.
- ♣ Au FTK, Bai ZZ. Two-dimensional nonlinear finite element analysis of monotonically and non-reversed cyclically loaded RC beams. *Eng Struct* 2007; 29(11):2921–34.
- ♣ Bazan J.L, Victor I. F-D, Evaluation of the experimental curvature ductility of RC beams externally strengthened with CFRP bands, *Structures*, 26, pp. 1010-1020, 2020.
- ♣ Benzaid R, Mesbah H, Chikh N, Contribution à l'Étude des Matériaux Composites dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton, Editions Universitaires Européennes, 2013.
- ♣ Boussoula Abderrafik, Modélisation du comportement thermomécanique des plaques sandwiches FGM en utilisant des théories d'ordre élevé avancé, thèse Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat en Sciences, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2021.
- ♣ Bouzid H, Lardjane S, Etude paramétrique de comportement élastique des poutres métalliques ajourées, Mémoire de master, Université de Tiaret, 2012.
- ♣ Burns NH, Siess CP. Load-deformation characteristics of beam-column connections in reinforced concrete. A report on a research project. University of Illinois, Urbana; 1962: SRS no. 234.
- ♣ CEA, présentation de Castem, Commissariat français à l'Energie Atomique, France, 2022, <http://www-cast3m.cea.fr/index.php>
- ♣ Chayma Chaabani. Composites à fibres de carbone : récupération des fibres par solvolysse hydrothermale. Impact sur la qualité des fibres et valorisation de la phase liquide. Génie des procédés. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2017. Français.
- ♣ Chettah M, et Guerraiche N, Renforcement des poutres en béton armé à l'effort tranchant par matériaux composites-Etude comparative réglementaire-, Université des frères Mentouri Constantine, (2015).

- ♣ Djahmi K, Modélisation par code de calcul castem des glissements de terrain : Cas du glissement de ain senour, Université de Guelma, 2012.
- ♣ Farid Abou Chakra. Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes. Matériaux composites et construction. 2016.
- ♣ Ferrier E, Comportement de l'interface composite-béton sous des sollicitations de fluage thermostimulé et en fatigue oligocyclique. Application au calcul previsionnel de la durabilité de poutres BA renforcées, thèse de doctorat, Université Lyon1, 1999.
- ♣ Finess, Fiche technique, fibre de verre, 2011.
- ♣ Florianne Guichard, Bertrand Mercier. Renforcement des poutres en bois par un tissu de fibres de carbone (CFRP). Sciences de l'ingénieur [physics], 2013.
- ♣ Germain M, Renforcement des structures en bois à l'aide de polymère renforcé de fibres (PRF). Université du Québec Montréal, 2021.
- ♣ Hashemi S.H, Maghsoudi A.A, Rahgozar R, Flexural ductility of reinforced HSC beams strengthened with CFRP sheets, Structural Engineering and Mechanics, 30(4), 403-426, 2008.
- ♣ Manuel Castem Ensta, Présentation et utilisation de CASTEM 200,pdf, 2021.
- ♣ Marc Quiertant, Le renforcement des structures de génie civil par matériaux composites - Principes de fonctionnement, règles de dimensionnement-, Mastère Génie Civil Européen, Module Maintenance, Pathologie et Réparation des Constructions, 2021.
- ♣ Meliani M, Maziri A, Mallil H et Echaabi J, Matériaux composites pour le Gén
- ♣ Nishikant D, Strengthening of reinforced concrete beams using glass fiber reinforced polymer composites, National institute of technology Bourkela India, 2009.
- ♣ Québec, La fibre de carbone, L'atelier, 2007).
- ♣ Recomman dons.Fr, Fibre de verre: caractéristiques et application, 2022. <https://recommandons.fr/wp-content/uploads/2020/08/333-min-scaled.jpg>
- ♣ Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh. Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton. Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp.264, 2010.
- ♣ Sika France SAS, France, 2022.

- ♣ Societe freyssinet, renforcement de structures par collage d'un tissu de fibres de carbone, TFC, France ,2009.
- ♣ Spadea G, Bencardino F, Swamy R.N.,Structural behavior of composite rc beams with externally bonded CFRP, J. Compos. Constr, 2, pp. 132-137, 1998.
- ♣ Taljsten, B, Strengthening of beams by plate bonding, J Mater Civil Eng ASCE, 1997.
- ♣ Touati M, Etude et analyse des differents types de renforcement dans les poutres-ponts, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbés, 2015.
- ♣ Wikibis, Fibre de verre, 2022. <http://www.editions-humanis.com/nouveau.php>
- ♣ Zhan, T., Wang, Z. and Ning, J. (2015), “Failure behaviors of reinforced concrete beams subjected to high impact loading”, *Engine Fail Analy*, 56, 233-243.