

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلكايد –
تلمسان –

Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie civil

Spécialité : Réhabilitation intelligente des bâtiments

Par : MECHKOUR Fatima

Thème

Étude De Renforcement Des Poutres En Béton Armé Par Des Matériaux Composites CFRP & GFRP

Devant le jury :

Mme. BENADLA Zahira

Professeure

Présidente

M. TABET DERRAZ Moulay Idriss

Maitre de conférences B

Encadrant

M. BOUMECHRA Nadir

Professeur

Examineur

2025-2026

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à ma petite famille, qui est la source de mon bonheur et de ma force.

Je veux exprimer ma gratitude à mon mari, qui m'a apporté son amour, sa patience, son soutien constant et ses encouragements tout au long de ce parcours.

Mes enfants sont également très importants pour moi, car ils illuminent ma vie et me donnent chaque jour la motivation d'aller de l'avant. J'espère que ce travail pourra leur servir d'exemple de persévérance et de détermination.

Je suis également reconnaissante envers ma mère, pour les sacrifices qu'elle a faits, pour ses prières et pour son affection inestimable. Son soutien a toujours été une source de courage pour moi dans les moments difficiles.

Je tiens également à remercier mes frères et sœurs, pour leur présence, leur aide et leurs encouragements constants.

Je veux également rendre hommage à la mémoire de mon père, qui nous a quittés. J'espère que Dieu lui accordera Sa miséricorde et l'accueillera dans Son vaste paradis. La mémoire de mon père reste gravée dans mon cœur et ses valeurs continuent de guider chacun de mes pas.

Je suis reconnaissante envers toute ma grande famille, qui m'a entourée d'affection et de soutien durant la réalisation de ce travail.

Je vous exprime à tous ma profonde gratitude et mon immense reconnaissance pour votre amour et votre soutien.

Avec tout mon amour et mon respect.

.

Fatima MECHKOUR

REMERCIEMENT

Je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la santé et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadreur, **Dr. TABET-DERRAZ Moulay Idriss**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et ses orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son expertise et son soutien ont été d'une grande importance pour l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants de la deuxième année Master Génie Civil pour la qualité de leur enseignement, leurs conseils et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre formation universitaire.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude aux honorables membres du jury **Pr. BENADLA Zahira** et **Pr. BOUMECHRA Nadir** qui ont accepté d'évaluer ce travail. Je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire ainsi que pour leurs remarques et suggestions qui contribueront à son amélioration.

Je remercie également l'ensemble du personnel du département de Génie Civil pour les conditions favorables offertes durant mon cursus universitaire.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille, mes proches et toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À tous, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements

Fatima MECHKOUR

RÉSUMÉ

Le présent mémoire porte sur l'étude du comportement mécanique des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites de type CFRP (polymères renforcés de fibres de carbone) et GFRP (polymères renforcés de fibres de verre). L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le comportement global de poutres en béton armé à travers deux approches distinctes. La première consiste à étudier l'influence du remplacement total des armatures longitudinales inférieures en acier par des barres composites (CFRP et GFRP). La seconde approche vise à analyser l'effet de l'adjonction d'une armature composite additionnelle (en carbone ou en fibre de verre) positionnée au milieu, en maintenant les barres d'acier inférieures d'origine.

Dans un premier temps, une poutre de référence en béton armé a été modélisée numériquement sous le logiciel Abaqus afin de reproduire son comportement mécanique sous chargement statique. Ensuite, plusieurs configurations de renforcement ont été étudiées, notamment le remplacement des armatures inférieures par des barres en CFRP puis en GFRP, ainsi qu'une configuration hybride associant les armatures traditionnelles en acier à une barre composite supplémentaire placée au centre de la zone tendue.

La modélisation numérique a été réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis en utilisant le modèle « Concrete Damaged Plasticity » (CDP) pour représenter le comportement non linéaire du béton. Les résultats obtenus ont permis d'analyser l'évolution de la charge ultime, des déplacements, des contraintes ainsi que des mécanismes d'endommagement du béton à travers les variables DAMAGET, DAMAGEC et SDEG.

Les résultats montrent que les armatures en CFRP améliorent significativement la rigidité et la capacité portante des poutres, tandis que les armatures en GFRP offrent une meilleure capacité de déformation mais une rigidité plus faible. Les configurations hybrides acier/composite présentent les meilleures performances globales en combinant résistance mécanique, stabilité structurale et ductilité.

Mots-clés : béton armé, CFRP, GFRP, matériaux composites, renforcement structural, éléments finis, Abaqus, comportement mécanique, poutres renforcées.

ABSTRACT

The present thesis focuses on the study of the mechanical behavior of reinforced concrete beams strengthened with composite materials, specifically CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) and GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers). The main objective of this study is to evaluate the overall behavior of reinforced concrete beams through two distinct approaches. The first approach consists in investigating the influence of the total replacement of the bottom steel longitudinal reinforcements with composite bars (CFRP and GFRP). The second approach aims to analyze the effect of adding an additional composite reinforcement (carbon or glass fiber) positioned in the middle, while maintaining the original bottom steel bars.

First, a reference reinforced concrete beam was numerically modeled using Abaqus software in order to reproduce its mechanical behavior under static loading. Then, several strengthening configurations were studied, including the replacement of the lower steel bars with CFRP and GFRP bars, as well as a hybrid configuration combining conventional steel reinforcement with an additional composite bar placed at the center of the tensile zone.

The numerical modeling was carried out using the finite element method and the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model to represent the nonlinear behavior of concrete. The obtained results made it possible to analyze the evolution of ultimate load, displacement, stresses, and concrete damage mechanisms through the variables DAMAGET, DAMAGEC, and SDEG.

The results showed that CFRP reinforcement significantly improves the stiffness and load-carrying capacity of the beams, while GFRP reinforcement provides greater deformation capacity but lower stiffness. Moreover, the hybrid steel/composite configurations exhibited the best overall performance by combining high mechanical resistance, structural stability, and ductility.

Keywords: reinforced concrete, CFRP, GFRP, composite materials, structural strengthening, finite element method, Abaqus, mechanical behavior, strengthened beams.

الملخص

تتمحور هذه المذكرة حول دراسة السلوك الميكانيكي للقمامير (الروافد) المصنوعة من الخرسانة المسلحة والمقواة بالمواد المركبة من نوع CFRP (البوليمرات المقواة بألياف الكربون) و GFRP (البوليمرات المقواة بألياف الزجاج). يكمن الهدف الرئيسي لهذه الدراسة في تقييم السلوك الإجمالي لقمامير الخرسانة المسلحة من خلال نهجين متميزين. يركز النهج الأول على دراسة تأثير الاستبدال الكلي لحديد التسليح الطولي السفلي بقضبان مركبة (CFRP و GFRP). بينما يهدف النهج الثاني إلى تحليل تأثير إضافة تسليح مركب إضافي (من الكربون أو ألياف الزجاج) يتم وضعه في المنتصف، مع الإبقاء على قضبان الحديد السفلية الأصلية.

في المرحلة الأولى، تم إنشاء نموذج عددي لكمرة خرسانية مسلحة مرجعية باستخدام برنامج Abaqus لمحاكاة سلوكها الميكانيكي تحت تأثير حمل ساكن. بعد ذلك، تمت دراسة عدة حالات تدعيم، تمثلت في استبدال القضبان السفلية بقضبان من ألياف الكربون CFRP ثم بألياف الزجاج GFRP، بالإضافة إلى دراسة حالة هجينة تجمع بين التسليح الفولاذي التقليدي وقضيب مركب إضافي في وسط منطقة الشد.

اعتمدت النمذجة العددية على طريقة العناصر المحددة مع استخدام نموذج Concrete Damaged Plasticity (CDP) لتمثيل السلوك غير الخطي للخرسانة. وقد سمحت النتائج المتحصل عليها بتحليل تطور الحمولة القصوى، والإزاحات، والإجهادات، إضافة إلى دراسة تطور الضرر في الخرسانة باستعمال المتغيرات DAMAGEC و SDEG.

أظهرت النتائج أن استخدام قضبان CFRP يؤدي إلى تحسين كبير في صلابة الكمرة وقدرتها التحميلية، بينما توفر قضبان GFRP قدرة أكبر على التشوه مع صلابة أقل نسبيًا. كما بينت الدراسة أن النظم الهجينة (فولاذ/مركبات) تحقق أفضل أداء من حيث المقاومة والاستقرار البنيوي والمطيلية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة، CFRP، GFRP، المواد المركبة، التدعيم الإنشائي، العناصر المحددة، Abaqus، السلوك الميكانيكي، الكمرات المدعمة.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	3
CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES FRP	
1. Introduction.....	3
2. Définition d'un matériau composite.....	3
2.1 Constituants d'un matériau composite.....	4
2.2 Types et classification des matériaux composites.....	5
3. Types de fibres utilisées dans les FRP.....	8
4. Propriétés mécaniques des matériaux composites.....	10
5. Formes d'application des FRP.....	11
6. Modes de rupture des matériaux composites.....	12
7. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	13
7.1 Avantages.....	13
7.2 Inconvénients.....	13
8. Applications des composites dans le génie civil.....	14
9. Comportement des poutres en béton armé.....	14
9.1 Rappel sur le béton armé.....	15
9.2 Modes de rupture des poutres en BA.....	16
9.3 Pathologies et causes de renforcement.....	17
Conclusion.....	17
CHAPITRE 2 : MODÉLISATION NUMÉRIQUE SOUS Abaqus	
1. Introduction.....	18
2. Simulation numérique avec Abaqus.....	18
2.1 Présentation du logiciel.....	18
2.2 Le module Abaqus/CAE.....	19
3. Définition du modèle étudié.....	20
3.1 Caractéristiques géométriques de la poutre.....	21
3.2 Ferrailage et armatures composites.....	21
4. Étapes de la modélisation numérique.....	21
4.1 Création de la géométrie.....	22
4.2 Définition des propriétés des matériaux.....	23
4.3 Assemblage du modèle.....	24
4.4 Définition des étapes de calcul.....	24
4.5 Définition des interactions.....	25
4.6 Conditions aux limites et chargement.....	26
4.7 Génération du maillage.....	27

4.8 Création du Job.....	29
4.9 Visualisation des résultats.....	31
5. Modélisation du comportement des matériaux.....	32
5.1 Modèle du béton (CDP).....	34
5.2 Modélisation de l'acier.....	34
5.3 Modélisation des composites CFRP/GFRP.....	35
6. Présentation des matériaux composites utilisés.....	35
6.1 Produits Mapperod.....	36
6.2 Comparaison Mapperod C / Mapperod G.....	37
Conclusion.....	38
CHAPITRE 3 : ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS	
1. Introduction.....	40
2. Validation du modèle numérique.....	40
3. Analyse du comportement de la poutre de référence.....	41
3.1 Rigidité.....	41
3.2 Résistance maximale.....	41
3.3 Ductilité et capacité de déformation.....	41
3.4 Limites du modèle numérique.....	41
4. Analyse de l'endommagement du béton.....	42
4.1 Variable DAMAGET.....	42
4.2 Variable DAMAGEC.....	42
4.3 Variable SDEG.....	43
5. Analyse des poutres renforcées par composites.....	44
5.1 Renforcement par barres CFRP.....	45
5.2 Renforcement par barres GFRP.....	46
6. Analyse des configurations hybrides.....	47
6.1 Configuration hybride Acier/CFRP.....	47
6.2 Configuration hybride Acier/GFRP.....	50
7. Tableau comparatif des performances structurales.....	52
8. Discussion scientifique des résultats.....	53
Conclusion.....	55
Conclusion Générale	57
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	58
ANN2XES.....	61

Liste des figures

- Figure 1 : Éléments constituant d'un matériau composite
- Figure 2 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort
- Figure 3 : Différentes formes des matériaux composites
- Figure 4 : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice
- Figure 5 : Carbone Fiber
- Figure 6 : Formes de fibres de verre
- Figure 7 : Application majeure des fibres aramides
- Figure 8 : Différentes formes de FRP
- Figure 9 : Renforcement des dalles en béton par des bandes en CFRP
- Figure 10 : Béton armé, illustration de poutre armée
- Figure 11 : Comportement en traction du béton armé
- Figure 12 : Loi de comportement de l'acier
- Figure 13 : Loi de comportement du composite
- Figure 14 : Des formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS
- Figure 15 : la Présentation de l'interface ABAQUS
- Figure 16 : Ferrailage et dimensions de la poutre expérimentée
- Figure 17 : Création de la poutre en béton armé
- Figure 18 : Création des armatures
- Figure 19 : Création des propriétés des matériaux
- Figure 20 : Assemblage du modèle
- Figure 21 : Création du Step
- Figure 22 : Création des interactions
- Figure 23 : Chargement de la poutre en béton armé
- Figure 24 : Présentation du maillage de la poutre
- Figure 25 : Création du Job
- Figure 26 : Présentation du Job
- Figure 27 : Visualisation des résultats
- Figure 28 : Réponse du modèle en traction et compression simple
- Figure 29 : Validation du modèle non renforcé
- Figure 30 : Représentation des dommages dus à la traction de la poutre en béton armé
- Figure 31 : Représentation des dommages dus à la compression de la poutre en béton armé
- Figure 32 : Représentation des dommages globaux de la poutre en béton armé
- Figure 33 : Validation du modèle renforcé par des barres inférieures en fibre de carbone
- Figure 34 : Dommages dus à la traction de la poutre renforcée par CFRP
- Figure 35 : Dommages dus à la compression de la poutre renforcée par CFRP
- Figure 36 : Représentation des dommages globaux de la poutre renforcée par CFRP
- Figure 37 : Validation du modèle renforcé par des barres inférieures en fibre de verre (GFRP) Bas du formulaire

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Différentes propriétés des fibres

Tableau 1.2 : Comparaison des propriétés mécaniques CFRP/GFRP

Tableau 1.3 : Synthèse des modes de rupture

Tableau 1.4 : Comparaison Acier vs Composite (FRP)

Tableau 2.1 : Système d'unités utilisé sous ABAQUS

Tableau 2.2 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton

Tableau 2.3 : Paramètres utilisés pour le comportement des bandes CFRP/GFRP

Tableau 2.4 : Comparatif des performances des barres Mapperod C et Mapperod G

Tableau 3.1 : Comparaison des performances structurales des différentes poutres

PRINCIPALES NOTATIONS

f_{cj}	La résistance a la compression du béton à j jours.
f_{c28}	La résistance a la compression du béton à 28 jours.
F_{tj}	La résistance caractéristique du béton à la traction a j jours.
E	Module de Young instantané du béton.
Ψ	Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
d_t	Variables d'endommagement de traction.
D_n	la mesure de mécanique de l'endommagement.
d_c	Variables d'endommagement en compression.
σ_t	Contrainte du traction.
σ_c	Contrainte du compression.
σ_{ij}	Composantes de la matrice de contraintes.
S_t et S_c	Des fonctions de l'état de contrainte.
ν	Coefficients de Poisson .
f_s et f_v	composantes des forces de surface et volume.
d_s et d_v	respectivement élément de surface et volume.
f_{cm}	valeur moyenne de la résistance à la compression.
γ_c	Coefficient de sécurité qui tient compte d'éventuels défauts localisés.
P	force total appliqué sur la poutre.
G_c et G_a	Module de cisaillement du béton .
ϵ_0	Déformation initial dans le tissu (volume virtuelle).
ϵ_c	Déformation actuelle des fibres extrémités du béton comprimé.
K_I	facteur d'intensité des contraintes.
A	facteur dépendant de l'ongle θ .
W_t et W_c	Paramètres de contrôle la récupération de la rigidité traction et à la compression.
PRF	Fibber reinforced polymer (Polymère renforcé de fibres).
CFRP	Carbon Fibber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de carbone).
GFRP	Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre).
CFRP/A	Carbon Fibber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de carbone)/Acier
GFRP/A	Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre/ Acier
BA	Béton armé sain.

INTRODUCTION

GENERALE

1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le vieillissement des infrastructures en béton armé (BA) est une préoccupation majeure du génie civil moderne. De nombreuses structures subissent des dégradations dues à des phénomènes tels que la **corrosion des armatures en acier**, le manque d'entretien, ou l'utilisation intensive au-delà de leur durée de vie initialement prévue. Par ailleurs, l'évolution des codes de calcul et l'**augmentation des charges de service** (trafic plus lourd, nouvelles normes sismiques) rendent certaines structures existantes obsolètes ou insuffisantes en termes de capacité portante[1].

Les besoins en réparation et en renforcement des structures sont aujourd'hui de plus en plus importants. Parmi les techniques les plus utilisées pour la réhabilitation des poutres en béton armé présentant une diminution de leur capacité portante, le renforcement par des matériaux composites constitue une solution efficace. Cette méthode consiste à appliquer des composites au niveau des zones critiques les plus exposées à la rupture afin d'améliorer le comportement structural de l'élément.

Plusieurs recherches tel que celle faite par Liang Huang et ses collaborateurs [2] sur le renforcement des poutres en béton armé à l'aide de composites à base de fibres de verre (GFRP) et de fibres de carbone (CFRP) ont démontré leurs efficacité sur le renforcement des poutre en béton armé.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier le comportement mécanique d'une poutre en béton armé à l'aide d'une modélisation numérique réalisée sous le logiciel Abaqus. Dans un premier temps, une poutre de référence en béton armé a été simulée afin d'obtenir un modèle numérique présentant des propriétés mécaniques et un comportement proches des résultats de référence.

Par la suite, une étude comparative a été menée en remplaçant les deux armatures longitudinales inférieures en acier par des barres en fibres de carbone (CFRP) puis en fibres de verre (GFRP), tout en conservant les autres armatures en acier. Une autre configuration a également été étudiée en ajoutant une troisième barre longitudinale placée au milieu des armatures inférieures en CFRP/GFRP afin d'évaluer son influence sur le comportement global de la poutre.

Cette étude vise principalement à :

- analyser l'effet du remplacement des armatures inférieures en acier par des armatures composites CFRP/GFRP .
- comparer les performances mécaniques des différentes configurations étudiées ;
- évaluer l'influence de l'ajout d'une troisième barre inférieure sur la résistance et la déformation de la poutre .
- valider un modèle numérique capable de reproduire avec précision le comportement des poutres renforcées.

Pour atteindre ces objectifs, notre démarche se divise en trois phases :

1. **Recherche bibliographique** : Étude des propriétés des matériaux et des théories du béton armé et des composites
2. **Modélisation numérique** : Création d'un modèle 3D sous Abaqus utilisant le modèle de plasticité endommagée du béton (CDP)
3. **Analyse comparative** : Confrontation des résultats simulés avec des données expérimentales pour valider l'efficacité du renfort.

Le présent projet est organisé en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre : **Généralités sur les matériaux FRP et les poutres en béton armé** : Ce chapitre présente les matériaux composites FRP, notamment le CFRP et le GFRP, ainsi que leurs propriétés mécaniques principales. Il décrit également le comportement des poutres en béton armé sous chargement. Les différents modes de rupture tels que la fissuration, la flexion et le cisaillement y sont étudiés. Enfin, une synthèse des travaux antérieurs sur le renforcement par composites est présentée.
- ✓ Le deuxième chapitre s'appelle « **Modélisation numérique** ». Ce chapitre parle de la simulation que l'on peut faire avec ordinateur. On utilise la méthode des éléments finis et le logiciel ABAQUS pour cela. On y voit les choix que l'on a faits pour les modèles de matériaux et comment on a procédé pour créer la modélisation. Cela commence par la création de la forme de l'objet et se termine par le calcul. On trouve aussi les étapes principales de la simulation et les différentes façons dont on a étudié le problème.
- ✓ Le dernier chapitre, intitulé « **Présentation des résultats et discussion** », est consacré à l'analyse des résultats de la simulation numérique.

Ces résultats, qui incluent des cartographies et des courbes de capacité, montrent clairement comment se comportent les poutres renforcées et non renforcées.

Ils ont permis d'évaluer et de quantifier les avantages des différents procédés de renforcement.

Enfin, Ce travail se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

CHAPITRE 1

GENERALITE SUR LES

MATERIAUX COMPOSITES FRP

1. Introduction

Au cours de la dernière décennie, l'utilisation des matériaux composites a connu une croissance remarquable, notamment dans les domaines de l'industrie mécanique, de l'aéronautique, et plus particulièrement dans le secteur du génie civil. Cette évolution s'explique par les performances élevées de ces matériaux, qui offrent une alternative prometteuse aux matériaux traditionnels tels que l'acier.

En effet, les matériaux composites présentent plusieurs avantages significatifs, notamment une résistance mécanique élevée, une faible masse volumique ainsi qu'une excellente résistance à la corrosion. Grâce à ces propriétés, ils constituent une solution efficace pour le renforcement et la réhabilitation des structures en béton armé.

Par ailleurs, malgré leur coût initial relativement élevé, les matériaux composites peuvent s'avérer économiquement avantageux sur le long terme. Leur mise en œuvre, généralement réalisée par moulage au contact ou par stratification directe sur les structures existantes, permet de limiter les interventions lourdes. Cela contribue à réduire le poids propre des structures, les coûts de manutention ainsi que les perturbations liées à l'exploitation, telles que les interruptions de trafic.

Dans ce travail, cette section vise à présenter les principes fondamentaux des matériaux composites, leurs différents types ainsi que leur comportement mécanique, en mettant l'accent sur leur utilisation dans le domaine du génie civil

2. Définition d'un matériau composite

Le matériau composite est défini comme l'association de deux ou plusieurs matériaux distincts, non miscibles entre eux, dont la combinaison permet d'obtenir des propriétés globales supérieures à celles de chacun des constituants pris séparément[3].

De manière générale, un matériau composite est constitué de deux éléments principaux :

- **Le renfort (ou armature)** : il constitue l'ossature du matériau composite et assure l'essentiel des performances mécaniques, notamment en termes de résistance et de rigidité. Selon la nature et l'orientation des fibres, le comportement du composite peut être isotrope, anisotrope ou orthotrope.
- **La matrice** : elle entoure et protège le renfort, tout en assurant la transmission des efforts entre les fibres. La matrice peut être de nature polymère (thermodurcissable ou thermoplastique), métallique ou céramique

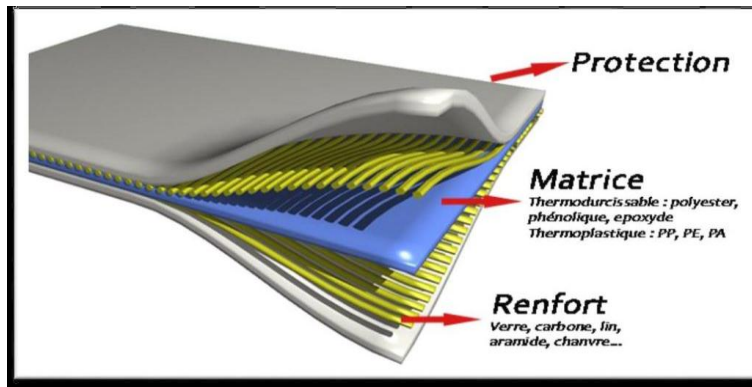


Figure 1 : Éléments Constituants d'un Matériau Composite

2.1 Types et classification des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés en deux grandes catégories selon leurs performances et leur coût :

- **Les composites de grande diffusion** : ils se caractérisent par des propriétés mécaniques relativement modestes, mais présentent l'avantage d'un coût réduit, ce qui les rend adaptés à une production à grande échelle.
- **Les composites à hautes performances** : ces matériaux possèdent des caractéristiques mécaniques élevées, notamment en termes de résistance spécifique et de rigidité. En revanche, leur coût unitaire est plus important. Ils sont principalement utilisés dans des domaines exigeants tels que l'aéronautique et le spatial.

Par ailleurs, les matériaux composites sont généralement classés en trois grandes familles en fonction de la nature de la matrice :

- **Les composites à matrice organique (CMO)** : ce sont les plus largement utilisés à l'échelle industrielle, notamment en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leur coût relativement maîtrisé.
- **Les composites à matrice céramique (CMC)** : ces matériaux sont destinés à des applications de haute technicité nécessitant une excellente tenue à haute température, comme dans les secteurs spatial, nucléaire, militaire ou encore dans les systèmes de freinage (exemple : freins carbone).
- **Les composites à matrice métallique (CMM)** : ils offrent de bonnes performances mécaniques et thermiques, et sont utilisés dans des environnements spécifiques nécessitant une résistance accrue [4].

L'un des principaux atouts des matériaux composites réside dans leur grande flexibilité de conception. En effet, il est possible d'adapter leurs propriétés en fonction des besoins, notamment en jouant sur l'orientation des fibres, ce qui permet d'obtenir des matériaux fortement anisotropes. Cette capacité permet d'optimiser le comportement mécanique des structures en fonction des sollicitations auxquelles elles sont soumises [5].

En outre, les matériaux composites présentent une faible masse volumique, ce qui contribue à l'allègement des structures, un avantage particulièrement recherché dans les domaines de l'aéronautique et du spatial

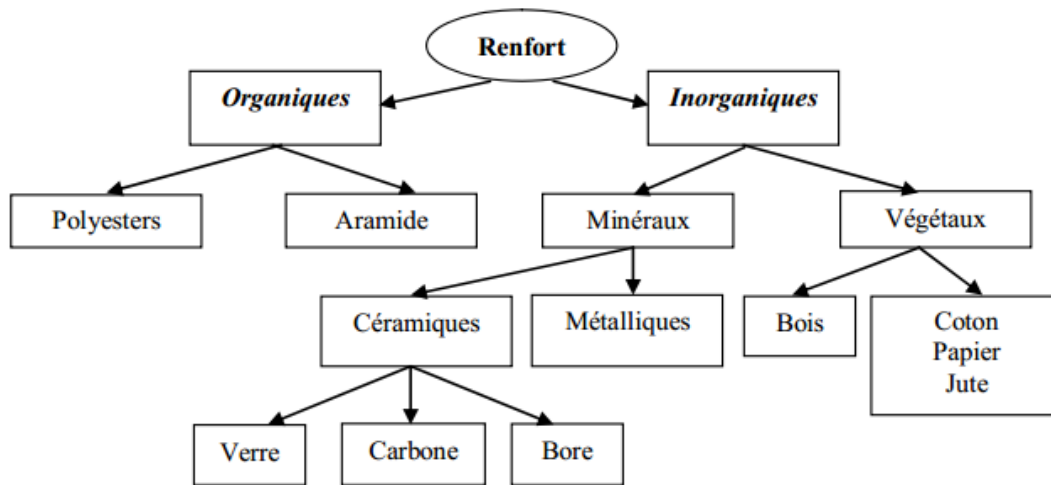


Figure 2 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort

2.2 Éléments Constituants D'un Matériau Composite

Les matériaux composites, couramment appelés **FRP** (*Fiber Reinforced Polymers*), sont des matériaux hétérogènes constitués de deux phases complémentaires :

Les fibres :

Les fibres constituent l'élément principal du renforcement dans les matériaux composites. Elles sont formées d'un ensemble de filaments élémentaires dont le diamètre varie généralement entre 5 et 25 μm , en fonction de la nature de la fibre utilisée.

Ces fibres jouent un rôle fondamental dans le comportement mécanique du composite. En effet, elles assurent l'essentiel de la résistance et de la rigidité du matériau en supportant la majorité des efforts appliqués.[6] Leur contribution est particulièrement importante en traction, domaine dans lequel elles présentent des performances élevées. Les fibres sont généralement utilisées sous différentes formes selon les besoins de l'application :

- **Formes linéiques : fils ou mèches**
- **Formes surfaciques : tissus ou mats**
- **Formes tridimensionnelles : tissus 3D**

Le choix du type de fibre dépend à la fois des performances mécaniques recherchées et des contraintes économiques liées au projet. En effet, chaque type de fibre présente un compromis entre coût, résistance et durabilité.

Ainsi, les fibres constituent l'élément clé des matériaux composites, assurant la transmission des efforts et conférant au matériau ses propriétés mécaniques spécifiques.

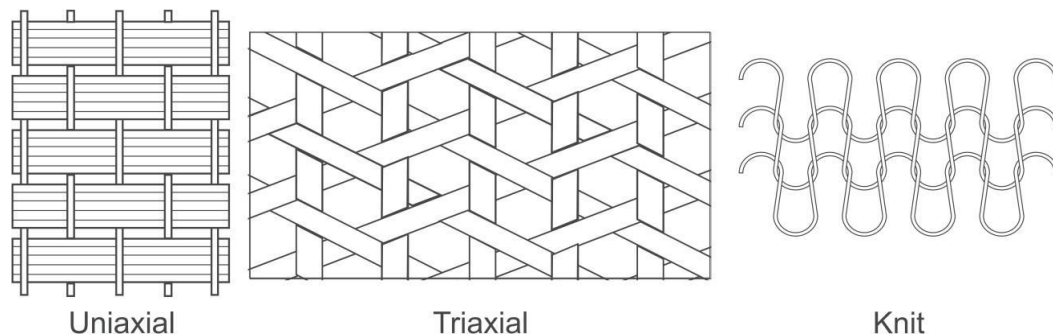


Figure 3 : Différents formes des matériaux composites

La matrice (résine) :

La matrice constitue la phase continue du matériau composite. Généralement considérée comme un matériau isotrope, elle joue un rôle essentiel dans la cohésion et le bon fonctionnement du composite.

Sa fonction principale est d'assurer la liaison entre les fibres de renforcement, en les maintenant en position et en garantissant la transmission des efforts mécaniques entre celles-ci. Elle permet ainsi une répartition homogène des contraintes au sein du matériau[7].

En outre, la matrice contribue de manière significative à la résistance du composite vis-à-vis des sollicitations transversales, notamment les efforts de cisaillement, les contraintes perpendiculaires aux fibres ainsi que les efforts de compression, pour lesquels les fibres sont moins efficaces.

Par ailleurs, la matrice joue un rôle protecteur en isolant les fibres des agressions extérieures telles que l'humidité, l'oxydation et les agents chimiques, ce qui améliore la durabilité du matériau composite.

Dans la majorité des applications, notamment en génie civil, la matrice est constituée d'une résine polymère. Les matrices les plus couramment utilisées sont les résines thermodurcissables, telles que :

- le polyester
- le vinylester
- l'époxy
- les résines phénoliques

On distingue ainsi deux grandes familles de matrices polymères :

- **Les résines thermodurcissables**, largement utilisées pour leurs bonnes performances mécaniques et leur stabilité chimique.
- **Les résines thermoplastiques**, caractérisées par leur capacité à être ramollies et remodelées sous l'effet de la température.

Dans le domaine du renforcement des structures en béton armé, la résine époxy est la plus utilisée. Elle assure à la fois le collage du matériau composite sur le support en béton et le transfert efficace des charges entre les fibres et la structure existante[8].

Elle sert de liant (généralement une résine époxy en génie civil) et a pour rôles principaux d'assurer le transfert des charges entre les fibres, de les protéger contre les agressions environnementales et d'assurer la liaison avec le support en béton

Bien que les fibres supportent la majeure partie de la charge, la résine joue plusieurs rôles critiques :

L'efficacité du système repose sur l'**interface fibre/matrice**, qui doit permettre une transmission parfaite des efforts pour que le composite travaille de manière monolithique

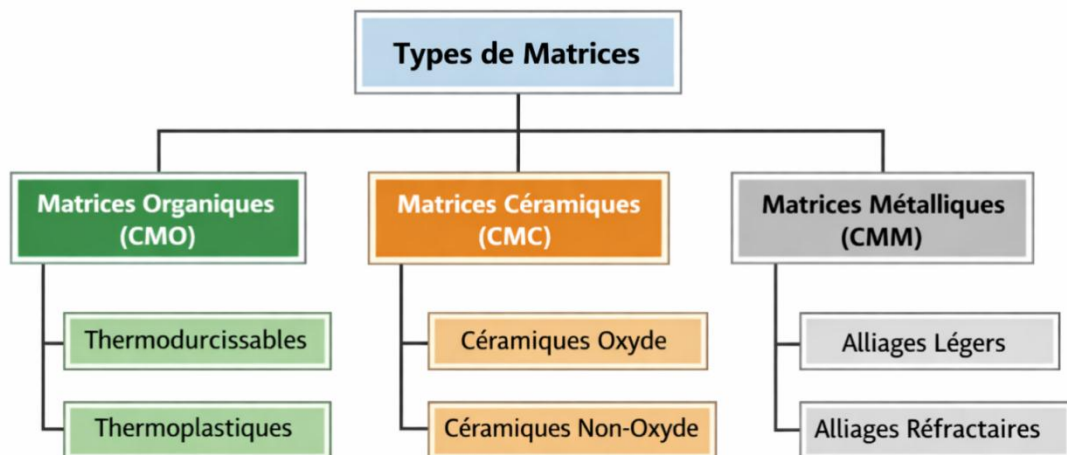


Figure 4 : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice

3 Types de fibres

Il existe plusieurs types de fibres synthétiques utilisées pour le renforcement des structures

- **CFRP (Carbone)** : Le carbone est très utilisé pour renforcer les structures, car il est très résistant à la traction et très durable face à la corrosion. Les fibres de carbone ont des propriétés mécaniques élevées et sont fabriquées à partir d'un polymère de base appelé précurseur. La qualité de ce précurseur est essentielle pour obtenir de bonnes performances finales des fibres de carbone. Le brai, qui est un résidu du raffinage du pétrole, est l'une des matières premières utilisées pour fabriquer les fibres de carbone[9].

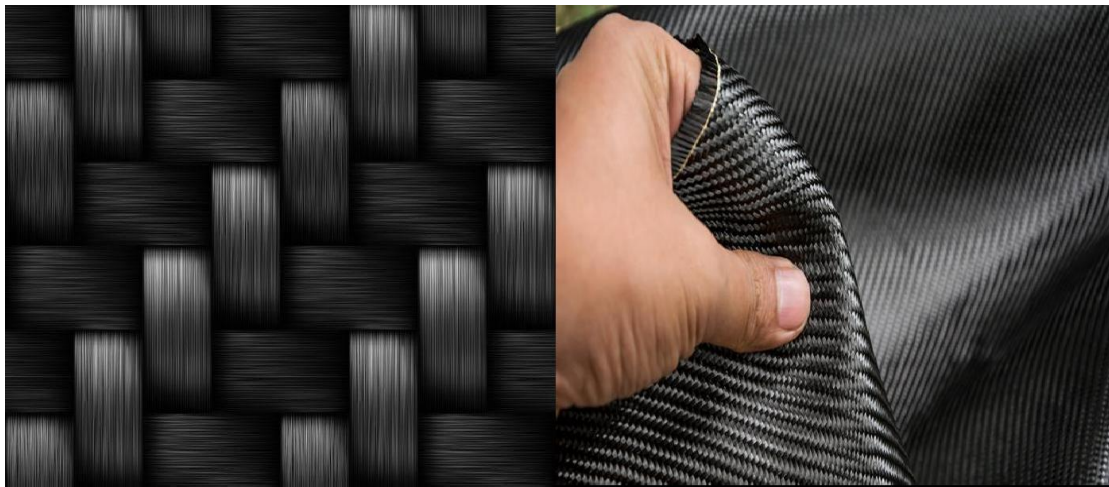


Figure 5 : Carbon Fiber

- **GFRP (Verre)** : Les fibres de verre sont moins coûteuses, mais elles ont un module d'élasticité plus faible. Elles sont également sensibles aux environnements alcalins. Cependant, les fibres de verre offrent un excellent rapport performance/prix, ce qui les rend très populaires pour la réalisation de structures composites. Les fibres de verre ont un module d'élasticité relativement faible, mais elles résistent bien à la traction. Elles sont constituées de silicate et ont un diamètre d'environ 10 μm . Les fibres de verre sont considérées comme des matériaux orthotropes[10].



Figure 6 : Formes de fibres de verre

AFRP (Aramide) et BFRP (Basalte) : les matériaux AFRP et BFRP. L'AFRP est fait de fibres d'aramide. Le BFRP est fait de fibres de basalte. Ces deux matériaux sont utilisés pour des applications spécifiques. Ils doivent résister aux impacts ou rester stables.

Les fibres d'aramide ont des propriétés mécaniques élevées en traction. Elles sont comparables à celles des fibres de carbone. Le Kevlar est un exemple connu de fibres d'aramide. Cependant, les fibres d'aramide ont une faible résistance à la compression. Cela est dû à une adhérence insuffisante entre les fibres et la matrice polymère utilisé[11].



Figure 7 : Application majeure des fibres aramides

3.1 Comportement des fibres CFRP/GFRP

Le **CFRP** (Plastique Renforcé de Fibres de Carbone) et le **GFRP** (Plastique Renforcé de Fibres de Verre) sont deux matériaux composites couramment utilisés, chacun offrant des

Critères	Fibres de carbone	Fibre d'aramide	Fibres de verre
Résistance a la traction	Très bonne	T. bonne	T. bonne
Résistance a la compression	T. bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	T.bon	Bon	Adéquat
Comportement a long terme	T. bon	Bon	Adéquat
Comportement a la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquat
Résistance alcaline	T. bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bonne

Tableau 1.1 : propriétés mécaniques distinctes adaptées à différentes applications.

Comparaison des Propriétés Mécaniques :

- **Résistance et Rigidité :** Le CFRP est nettement supérieur au GFRP. Il possède une résistance à la traction et un module d'élasticité (rigidité) beaucoup plus élevés, ce qui le rend idéal pour les structures légères mais nécessitant une grande résistance. Le GFRP, bien que solide, est plus flexible et moins rigide.

- **Poids et Densité** : Le CFRP offre un rapport résistance/poids exceptionnel, supérieur à celui du GFRP.
- **Comportement aux chocs** : Le GFRP est souvent supérieur au CFRP pour l'absorption d'énergie lors d'impacts, car il est plus ductile.
- **Comportement en fatigue** : Le CFRP est supérieur au GFRP, montrant une meilleure résistance à la fatigue sur de longs cycles.
- **Propriétés thermiques et électriques** : Le GFRP est un excellent isolant électrique et est très stable thermiquement, tandis que le CFRP est conducteur électrique.
- **Coût** : Le GFRP est nettement moins cher que le CFRP, ce qui en fait un meilleur choix pour les applications à budget limité[12].

Comparaison : Le **GFRP** (polymère renforcé de fibres de verre) est moins coûteux mais présente une résistance mécanique et un module d'élasticité inférieurs à ceux du **CFRP** (fibres de carbone). Le **CFRP** offre une très haute résistance, une grande rigidité et une meilleure durabilité, notamment face à la corrosion et aux environnements agressifs. En revanche, le GFRP reste plus économique et suffisant pour des applications moins exigeantes.

Les fibres de carbone se distinguent par une densité cinq fois inférieure à celle de l'acier pour une contrainte de rupture bien plus élevée.

4 Propriétés mécaniques des CFRP/GFRP

Les propriétés des composites FRP varient selon la nature des fibres et le mode de fabrication

- **Résistance à la traction** : Pour le CFRP, elle peut varier de **2000 à 4800 MPa** selon la qualité des fibres
- **Module d'élasticité** : Il se situe généralement entre **105 et 250 GPa** pour les systèmes courants
- **Fragilité** : C'est le principal inconvénient ; le matériau ne prévient pas avant la rupture ce qui nécessite des coefficients de sécurité appropriés

Propriété	CFRP	GFRP
Module E	Élevé	Moyen
Résistance	Très élevée	Élevée
Densité	Faible	Faible
Coût	Élevé	Économique

Tableau 1.2 : compareront CFRP/GFRP

5 Formes d'application des CFRP/GFRP

Les renforts FRP se présentent principalement sous trois formes dans le commerce :

1. **Sheets (Tissus/Nappes)** : Des fibres souples livrées en rouleaux et imprégnées sur site par une résine liquide (**stratification au contact**). Cette méthode s'adapte aux formes complexes comme les angles de poutres[13].
2. **Plates (Lamelles/Plats consolidés)** : Des plaques rigides préfabriquées en usine par pultrusion, collées directement sur la surface du béton. Elles sont idéales pour le renforcement en sous-face de poutres[14].
3. **Barres et Joncs** : Utilisés soit comme armatures internes en remplacement de l'acier, soit insérés dans des engravures à la surface du béton (méthode NSM)[15].

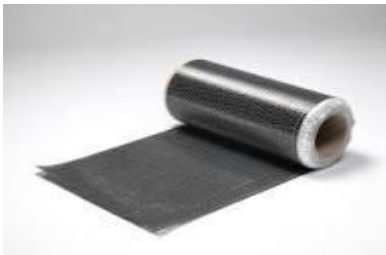


Figure 8 : Différentes forme de FRP

6 Modes de rupture

L'analyse des modes de rupture est une étape cruciale dans le dimensionnement du renforcement par composites. Lorsqu'on renforce une structure en béton armé avec des polymères renforcés de fibres (FRP), l'interaction entre le support, l'adhésif et le renfort crée plusieurs scénarios de défaillance possibles :

- **Rupture du FRP (Tension Failure)**

Ce mode de rupture se produit lorsque la contrainte de traction dans le matériau composite atteint sa **résistance ultime**.

- **Caractéristique** : C'est une rupture fragile et soudaine.
- **Contexte** : Elle arrive généralement si la section de FRP est sous-dimensionnée par rapport aux charges appliquées. Le matériau "casse" net.

- **Décollement (Debonding)**

Il s'agit de la perte d'adhérence entre le FRP et le support en béton. C'est l'un des modes de rupture les plus fréquents et les plus complexes à gérer.

- **Décollement à l'extrémité** : Commence aux extrémités de la nappe de renfort à cause des fortes concentrations de contraintes de cisaillement.
- **Décollement par fissures intermédiaires (IC Debonding)** : Provoqué par l'ouverture de fissures de flexion ou de cisaillement dans le béton qui "poussent" le composite à se détacher localement[16].

- **Rupture du béton (Concrete Crushing)**

Ce mode survient avant que le FRP n'atteigne sa limite de capacité.

- **Flexion** : Le béton en zone comprimée s'écrase parce qu'il a atteint sa déformation limite (environ 0,3% ou 0,35%).
- **Arrachement du béton (Concrete Cover De la mination)** : Une couche de béton (l'enrobage) reste collée au FRP et une partie se détache du reste de la poutre au niveau des armatures longitudinales existantes.

- **Rupture par Cisaillement**

Le renforcement en flexion peut augmenter la capacité d'une poutre au point que le mode de rupture critique devienne le cisaillement.

- **Risque** : Si l'effort tranchant n'est pas vérifié ou renforcé (par exemple avec des "U-wraps" en FRP), la poutre peut rompre de manière diagonale avant de mobiliser toute la capacité du renfort de flexion[17].

3. Synthèse des modes de rupture

Mode de rupture	Cause principale	Type de comportement
Rupture FRP	Épuisement de la capacité de traction	Très fragile / Soudain
Décollement	Faiblesse de l'interface ou du béton de surface	Fragile / Prématuré
Écrasement Béton	Zone comprimée saturée	Ductilité limitée
Cisaillement	Effort tranchant excessif	Fragile / Diagonal

Tableau 1.3 :les modes de rupture

7.1 Avantages des matériaux composites :

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Ce matériau présente une grande résistance à la fatigue.
- Il est très résistant au vieillissement causé par la corrosion.
- Il est également insensible à certains produits chimiques, comme les graisses, les huiles, les liquides hydrauliques, les peintures, les solvants et le pétrole.

- **7.2 Inconvénients des matériaux composites :**

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui peuvent endommager les résines époxydes.
- La résistance à l'impact est moyenne comparée aux matériaux métalliques.
- Ces matériaux ont une meilleure résistance au feu que les alliages, mais certaines matrices peuvent émettre des fumées toxiques.
- Coûts parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries

8. les Application des composites en génie civil :

La technique de renforcement, de réparation et de confinement des éléments structuraux à l'aide de polymères renforcés de fibres est vraiment prometteuse pour améliorer la résistance, la rigidité et la ductilité des structures. C'est relativement simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas beaucoup de main-d'œuvre. Les fibres et leur matrice sont non corrosives et résistent bien aux agents chimiques. C'est pour cela qu'elles offrent une durabilité supérieure à celle des matériaux classiques comme l'acier. Les matériaux composites présentent de nombreux avantages pour protéger, réparer et renforcer les structures en béton armé. On les utilise pour les poutres, les poteaux, les dalles et les ouvrages d'art. Cette partie parle des principales applications des matériaux composites dans le domaine du génie civil[18].

- **Réparation des fissures**
- **Renforcement des poutres par collage de plaques**
- **Renforcement des dalles**



Figure 9 : Renforcement des dalles en béton par des bandes en CFRP

9.1 Comportement des poutres en béton armé

- Le béton armé est un matériau composite constitué de béton et d'acier, combinant les avantages mécaniques de chacun de ses composants. Le béton assure principalement la reprise des efforts de compression, tandis que l'acier compense sa faible résistance à la traction. Cette complémentarité permet d'obtenir un matériau performant largement utilisé dans les structures de génie civil[19].
- Le comportement du béton armé peut être affecté par plusieurs mécanismes physico-chimiques responsables de sa dégradation. Ces phénomènes, liés à l'environnement ou aux conditions d'exploitation, conduisent progressivement à des pathologies pouvant compromettre la durabilité et la sécurité des ouvrages.
- À l'échelle mondiale, la consommation moyenne de béton est estimée à environ 1 m³ par habitant et par an, ce qui témoigne de son importance dans le secteur de la construction. Ce succès s'explique par son faible coût, sa facilité de mise en œuvre à l'état frais (matériaux moulables) [20] et ses excellentes performances en compression.
- Cependant, le béton présente certaines limites, notamment sa faible résistance à la traction et son comportement fragile. En effet, sa rupture se produit généralement sans déformation préalable significative, ce qui constitue un risque pour les usagers. Cette absence de signes visibles avant rupture rend difficile la détection précoce des défaillances, accentuant ainsi la nécessité d'un contrôle rigoureux et de techniques de surveillance adaptées[21].



Figure10 : Béton armé, illustration de poutre armée

➤ **Diagramme contrainte-déformation du béton :**

Le béton présente un comportement quasi-fragile. En compression, il possède une résistance élevée (3,5 % MPa), mais sa rupture se produit sans déformation importante une fois la capacité maximale atteinte. Dans les modélisations numériques avancées, on utilise souvent le modèle **Concrete Damaged Plasticity (CDP)** pour capturer la perte de rigidité due à la fissuration[22].

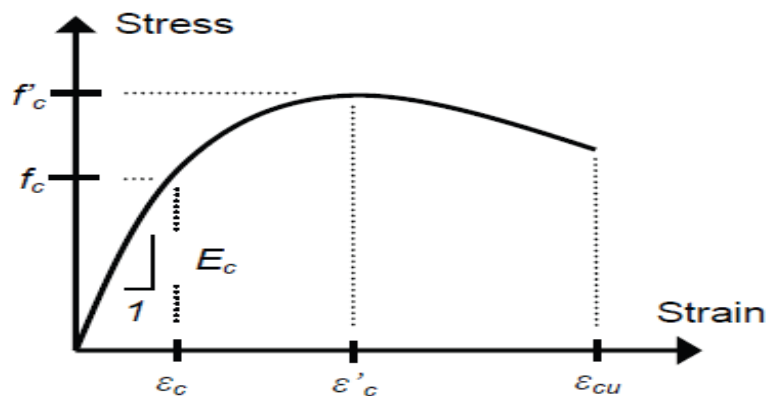


Figure11 : Comportement du béton en compression

➤ **Diagramme de l'acier :**

L'acier est modélisé par une loi **bilinéaire élasto-plastique**. Il se comporte de manière élastique jusqu'à sa limite d'élasticité (ex: 500 MPa), suivie d'une phase plastique avec écrouissage jusqu'à la rupture.

Pour bien entamer l'étude du renforcement, il est essentiel de stabiliser les bases du comportement du béton armé classique (BA). Voici un rappel synthétique des principes fondamentaux qui régissent le calcul aux États Limites (ELU).

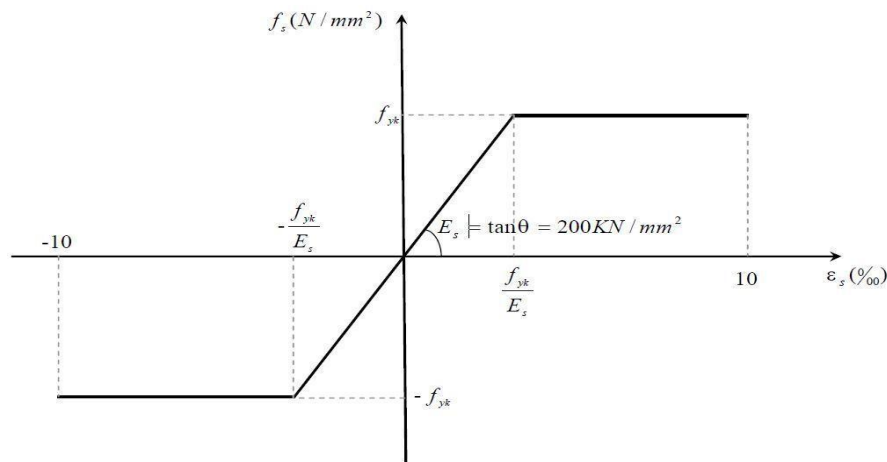


Figure 12 : loi de comportement de l'acier

➤ **Le matériaux composites :**

Les produits composites employés doivent présenter un allongement à rupture en traction supérieur ou égal à 8.5 /mille

Pour les matériaux composites unidirectionnels, la loi de comportement en traction est modélisée comme suit :

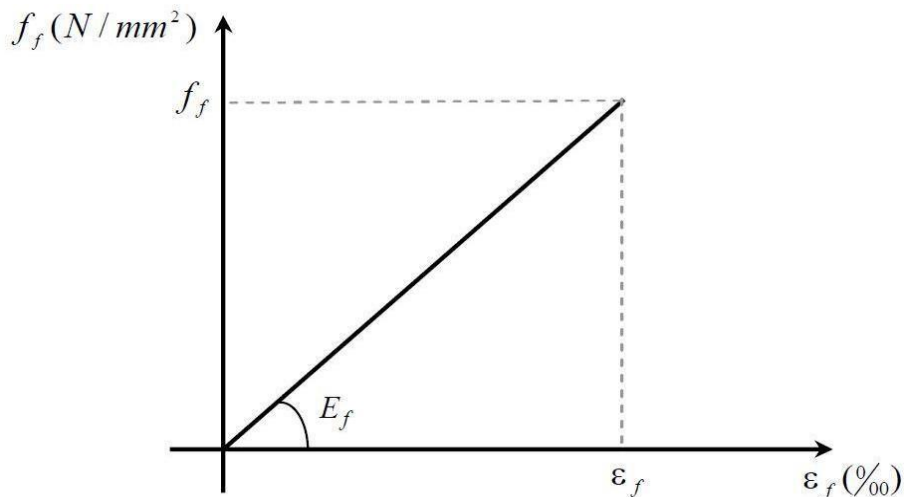


Figure 13 : Loi de comportement du composite CFRP

Cette loi se décrit par les deux paramètres :

- f_f : résistance garantie à la rupture en traction
- E_f : module de Young

Synthèse : Comparaison Acier vs Composite (FRP)

Comportement σ - ϵ : Contrairement à l'acier qui possède un palier plastique, les FRP présentent un comportement **élastique linéaire** parfait jusqu'à la rupture.

Propriété	Acier de construction	Matériau Composite (FRP)
Comportement	Élasto-plastique (Ductile)	Élastique fragile (Linéaire jusqu'à rupture)
Résistance	Modérée (~400-500 MPa)	Très élevée (> 1500 MPa pour le Carbone)
Corrosion	Sensible	Insensible

Tableau 1.4 : compareront acier /matériaux composites

9.2 Modes de rupture

Les sources identifient trois principaux modes de défaillance pour les poutres en BA :

- **Rupture par flexion** : C'est le mode le plus recherché car il est **ductile**. La rupture est précédée par la plastification des armatures tendues, suivie de l'écrasement du béton comprimé.
- **Rupture par cisaillement (effort tranchant)** : Ce mode est particulièrement dangereux car il est **soudain et fragile**, sans redistribution préalable des forces internes. Il se manifeste par des fissures inclinées à environ 45°. Le renforcement par CFRP/GFRP vise souvent à transformer cette rupture fragile en une rupture ductile par flexion.
- **Rupture par compression** : Elle survient par écrasement du béton, souvent dans les zones fortement sollicitées ou en cas de confinement insuffisant[23].

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales relatives aux matériaux composites FRP et à leur utilisation dans le domaine du renforcement des structures en béton armé. Les propriétés mécaniques des composites CFRP et GFRP ainsi que leurs avantages et limites ont été étudiés. Une attention particulière a également été portée au comportement des poutres en béton armé et aux principaux modes de rupture observés. Ces éléments constituent une base théorique essentielle pour la modélisation numérique et l'analyse du comportement des poutres renforcées qui seront développées dans les chapitres suivants

CHAPITRE 2

MODALISATION NUMERIQUE

1. Introduction

La simulation numérique et l'analyse par éléments finis occupent aujourd'hui une place essentielle dans l'étude du comportement des structures de génie civil à l'échelle réelle, en raison de leur influence significative sur la qualité des résultats ainsi que sur la réduction du temps d'analyse. Elles constituent une alternative efficace aux études expérimentales, permettant de limiter les coûts tout en optimisant le nombre d'essais nécessaires.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter le logiciel ABAQUS et expliquer son principe de fonctionnement. Ensuite, nous décrirons les étapes pour modéliser une poutre en béton armé renforcée avec des barres en fibres de carbone et en fibres de verre. Nous élaborerons le modèle géométrique et choisirons les éléments finis pour le maillage dans un environnement tridimensionnel, en considérant le comportement expérimental des matériaux utilisés. Enfin, nous présenterons l'interaction entre les différents composants du modèle, les étapes d'assemblage et la manière d'appliquer le chargement sur la poutre renforcée [24].

2 Simulation avec le logiciel ABAQUS

Avant d'utiliser un code de calcul de manière opérationnelle, il est indispensable d'examiner ses capacités ainsi que ses limites à travers les différents tutoriels et exemples de validation mis à disposition. ABAQUS est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis[25], conçu pour analyser et reproduire divers phénomènes physiques et mécaniques. La modélisation de ces phénomènes permet de représenter avec précision le comportement expérimental des matériaux et d'étudier l'influence de différents paramètres, tels que la géométrie ou les propriétés rhéologiques, dans le but d'optimiser la conception des structures.

2.1 Présentation du logiciel

ABAQUS est un logiciel de calcul fondé sur la méthode des éléments finis (MEF), développé en 1978 par l'entreprise Hibbitt, Karlsson & Sorensen. Il est reconnu pour sa performance, sa fiabilité ainsi que la qualité de ses outils de simulation. Ce logiciel propose des solutions adaptées à l'analyse de problèmes linéaires et non linéaires, ainsi qu'aux simulations dynamiques et explicites[26].

Grâce à son environnement de simulation évolutif et intégré, ABAQUS permet de modéliser différents types de structures et de géométries, telles que les poutres, les plaques,

les coques ainsi que des éléments particuliers comme les ressorts ou les masses, aussi bien en deux dimensions (2D) qu'en trois dimensions (3D), comme illustré dans la figure (14)

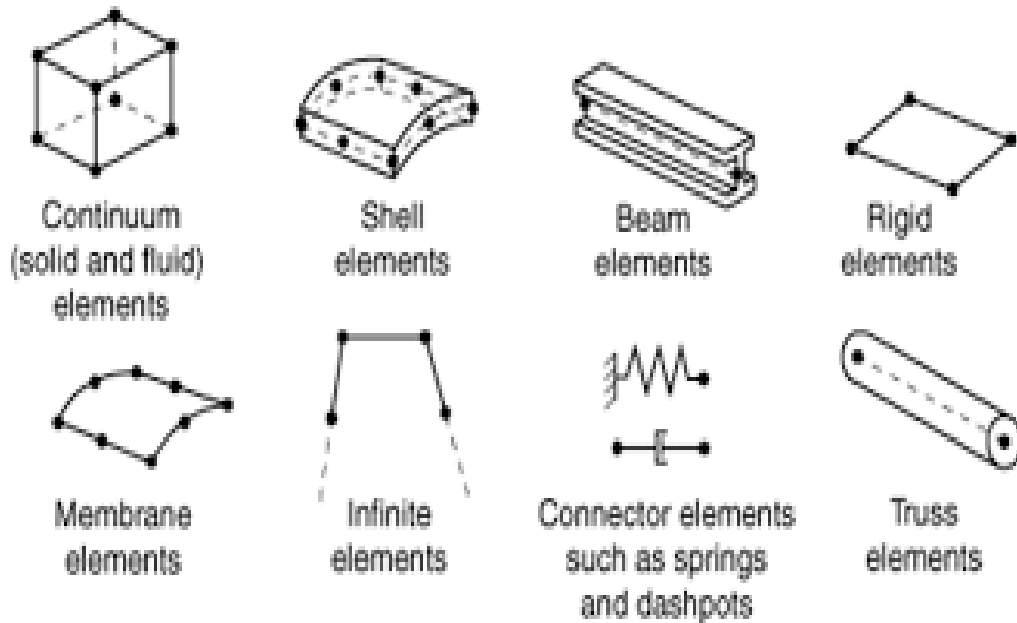


Figure 14 : Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS

Il est important de noter que ABAQUS ne gère pas automatiquement les unités. Par conséquent, l'utilisateur doit définir et respecter un système d'unités cohérent tout au long de la modélisation afin de garantir la fiabilité et la précision des résultats obtenus.[27]

Quantity	SI	SI(mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	Kg	Tonne (10^3 kg)	slug	Lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ(10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	Kg/m ³	Tonne /mm ³	slug /ft ³	lbf s ² /in ⁴

Tableau 2.1 :Les unités correspondant à ABAQUS.

2.2 Le CAE (complète ABAQUS environnement)

Le module CAE (Complete Abaqus CAE Environment) constitue une interface complète dédiée à la modélisation, à la gestion et au post-traitement des modèles numériques. Il permet à l'utilisateur de réaliser l'ensemble des étapes de mise en données, depuis la création ou l'importation de la géométrie des pièces, en passant par le maillage, jusqu'à l'exploitation avancée des résultats. Cette interface offre également la possibilité de définir les propriétés mécaniques des matériaux, de sélectionner les types d'éléments, de choisir la méthode

d'intégration de la matrice de rigidité ainsi que le mode de résolution adapté au problème étudié[28]

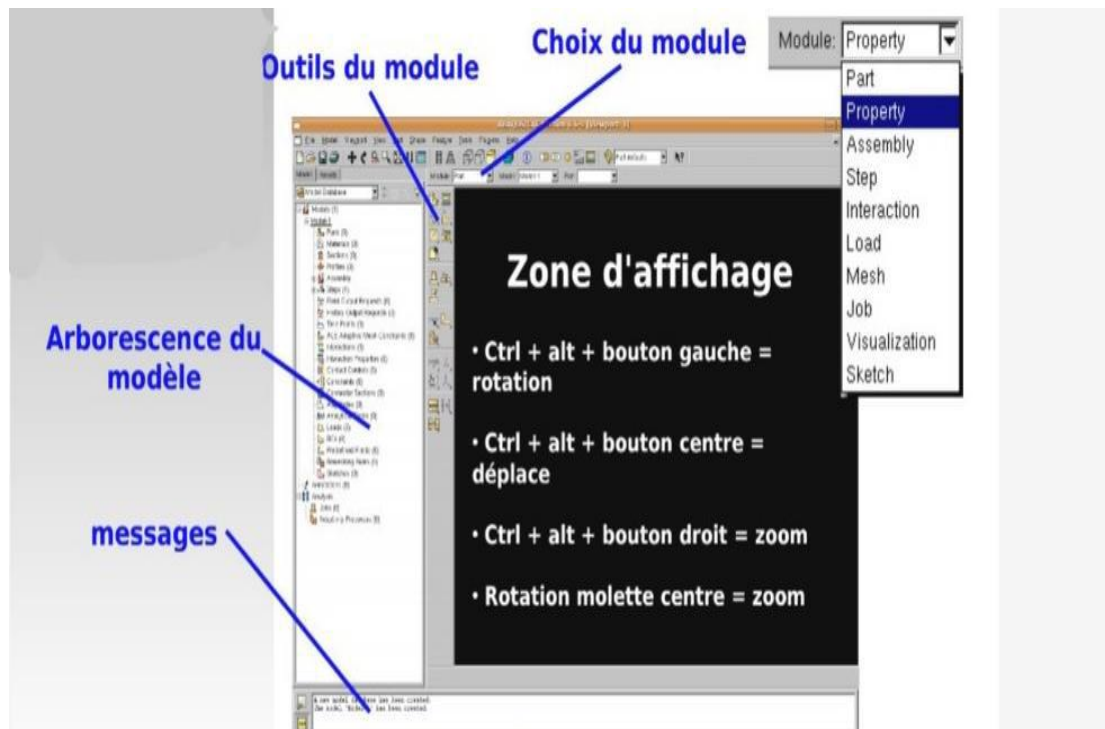


Figure 15 : Présentation de l'interface ABAQUS.

3 Définition du modèle à simuler

Ce travail concerne l'étude des performances et du comportement d'une poutre en béton armé renforcée par des matériaux composites, tels que le CFRP et le GFRP, sous charge statique. L'objectif principal est de comprendre comment les dommages causés au béton et à l'armature en acier affectent les propriétés mécaniques et la capacité de charge des poutres en béton armé déjà endommagées.

Dans ce cadre, un modèle numérique de poutre en béton armé, basé sur les données géométriques et expérimentales proposées par Liang Huang [29] et ses collaborateurs, a été développé. Ce modèle comporte un armement en acier classique, renforcé en flexion par des barres de CFRP puis par des barres en GFRP.

3.1 Caractéristiques des poutres.

Des poutres rectangulaires ont une section de 100x160 mm² et une longueur de 1500mm, elle est armée de deux barres de HA10 inférieures et de deux barres HA8 supérieures, 13

cadres HA6 espacés de 12cm ont été utilisés pour le renforcement à l'effort tranchant et pour éviter une rupture prématurée à l'effort tranchant « Figure.16 ».

3.2 Ferrailage et armature

Dimension	Ferrailage	Armement
La longueur : 1500mm	Barre supérieure HA8	barre en carbone
La largeur : 100 mm	Barre Inferieure HA10	barre en verre
La hauteur : 160 mm	13 cadres de Ø6 at 120 mm	

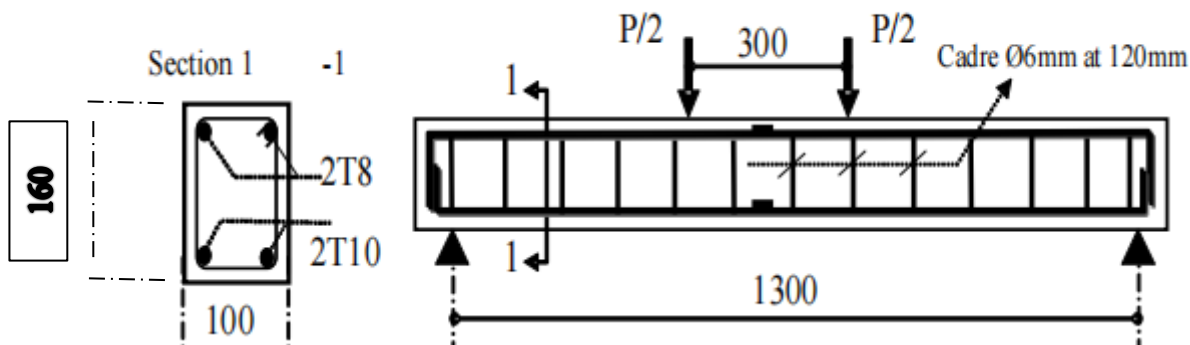


Figure 16 : Ferrailage et dimension de la poutre expérimentée [30]

4. Présentation des étapes suivies dans la simulation

Le logiciel est divisé en plusieurs modules qui fonctionnent de manière indépendante et complémentaire. Les principales étapes de la simulation sont effectuées grâce aux modules suivants : Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job et Visualization. Chacun de ces modules a une fonction bien précise dans le processus de modélisation et d'analyse numérique. Chacun de ces modules est essentiel pour réaliser une simulation complète et précise.

4.1 La géométrie des éléments (module part)

Dans cette première étape, tous les éléments constituant le modèle de la poutre sont créés à l'aide des outils du module « Part » de Abaqus CAE. La géométrie de la poutre a été définie initialement en deux dimensions à partir des coordonnées des points, puis la troisième dimension a été générée par extrusion afin d'obtenir un solide déformable tridimensionnel (3D). Les armatures longitudinales ont été modélisées sous forme d'éléments filaires « Wire » en tant que corps déformables 3D. Par la suite, les lignes ont été tracées à l'aide de l'outil

« Create Lines » puis dimensionnées conformément aux caractéristiques géométriques du modèle[31].

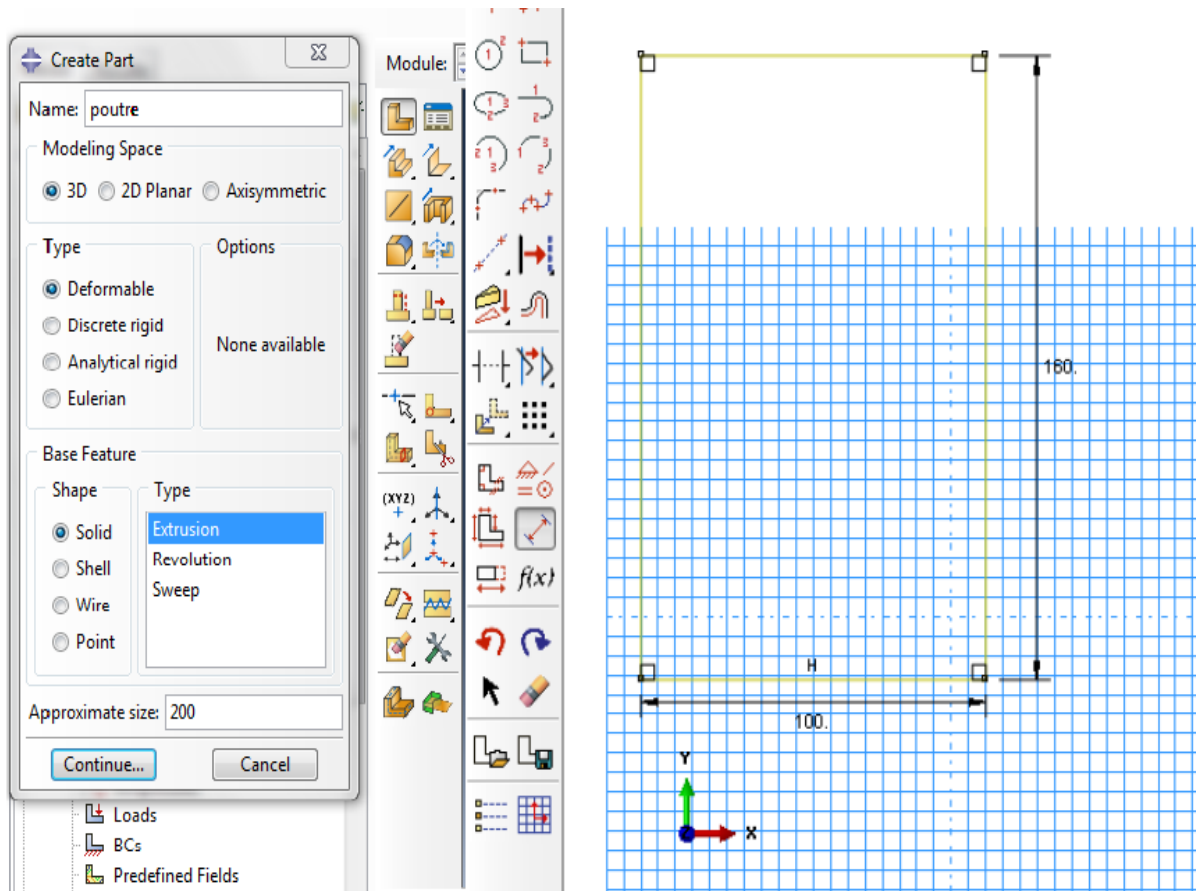


Figure 17 : la Création de poutre en béton armé dans Abaqus.

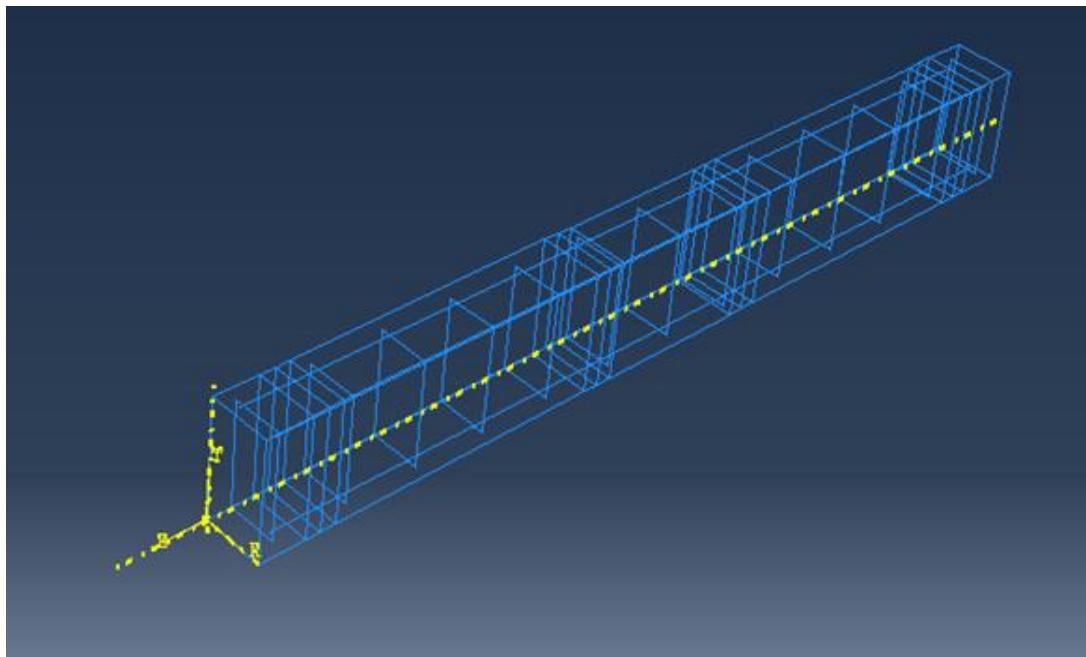


Figure 18 : la création des armatures dans Abaqus.

4.2 Propriétés des matériaux (Module Property)

Ce module occupe une place essentielle dans la modélisation numérique, car il permet de définir l'ensemble des propriétés intrinsèques de chaque matériau utilisé dans le modèle[32]. Dans le cadre de cette étude, trois modèles de comportement intégrés dans Abaqus CAE ont été adoptés pour représenter le béton, l'acier et les matériaux composites :

- Le béton : modélisé par un comportement élasto-plastique avec endommagement
- L'acier : représenté par un comportement élasto-plastique avec écrouissage isotrope et cinématique ;
- Les composites : définis par un comportement élastique orthotrope.

Pour l'analyse en régime élastique, il est nécessaire d'introduire les paramètres mécaniques fondamentaux, notamment le module de Young et le coefficient de Poisson.

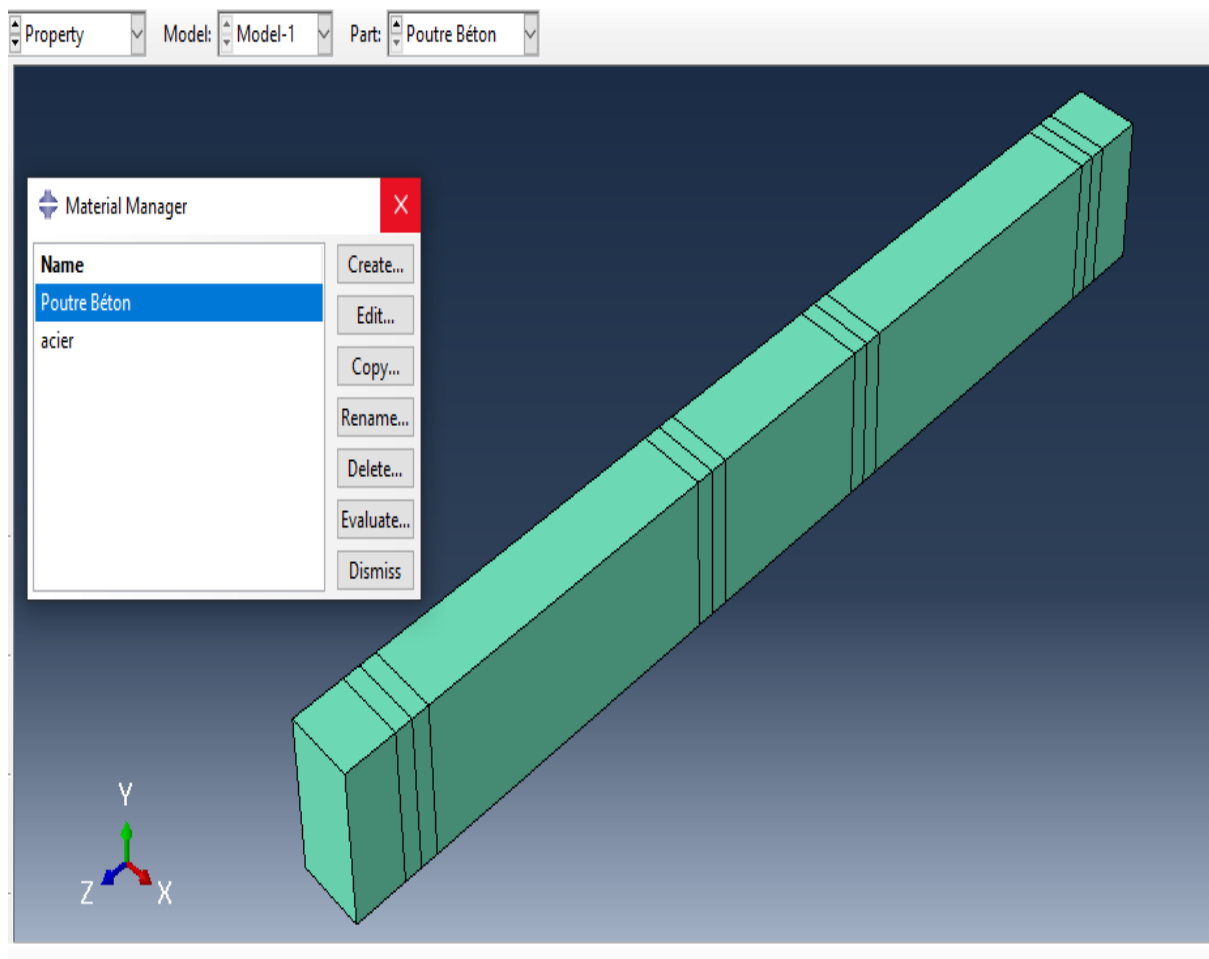


Figure 19 :la Création des propriétés des matériaux (béton, acier et composites).

4.3 Assemblage du modèle (Module Assembly)

Dans cette étape, l'ensemble des différentes pièces du modèle est assemblé à l'aide de l'outil « Create Instance » du module Abaqus CAE. Cette fonctionnalité permet de reproduire chaque pièce créée autant de fois que nécessaire et d'appliquer des opérations de translation ou de rotation afin d'obtenir la configuration géométrique complète du modèle[33].

L'assemblage débute par l'intégration de la poutre en béton avec ses armatures, comprenant les barres longitudinales de diamètre 12 mm, les barres de diamètre 8 mm ainsi que les cadres (étriers).

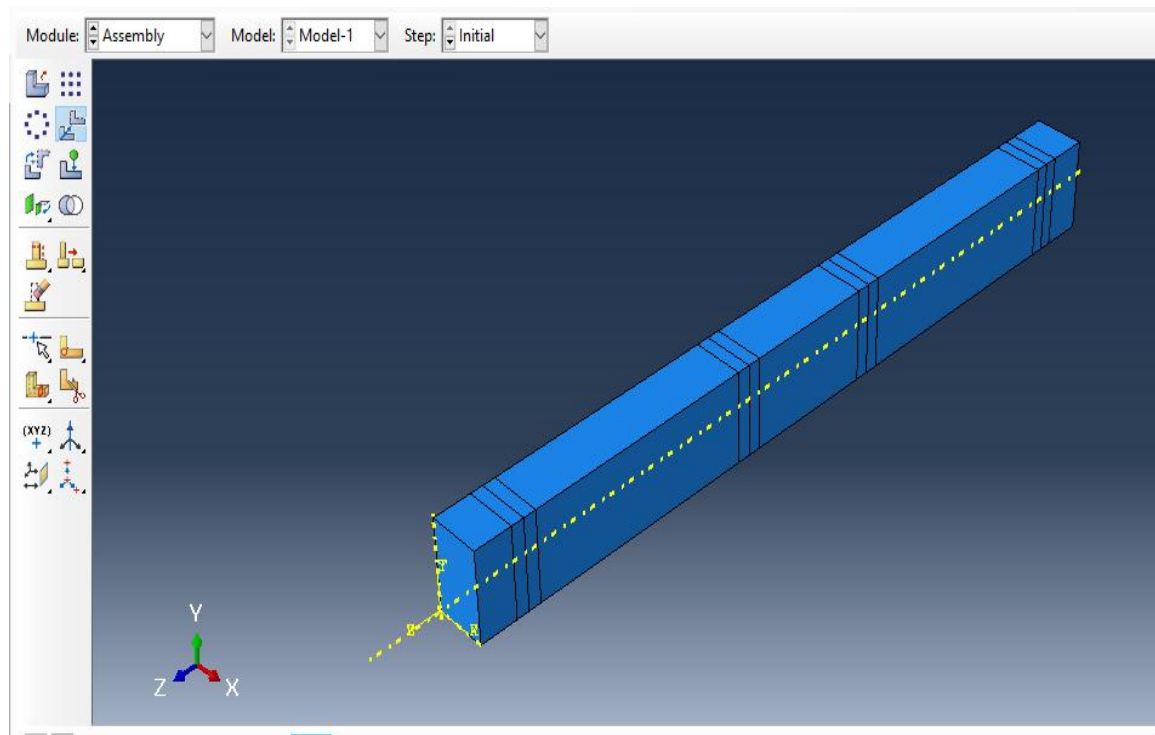


Figure 20 : Assemblage du modèle.

4.4 Définition des étapes de calcul (Module Steps)

Pour cette simulation, le choix s'est porté sur une analyse en dynamique explicite dans Abaqus CAE, en raison de son efficacité et de sa rapidité de calcul, notamment pour les problèmes non linéaires complexes. Une période d'analyse de 1 seconde a été adoptée[34], cette valeur ayant été déterminée sur la base de la vérification du critère énergétique afin de garantir la représentation d'un chargement quasi-statique.

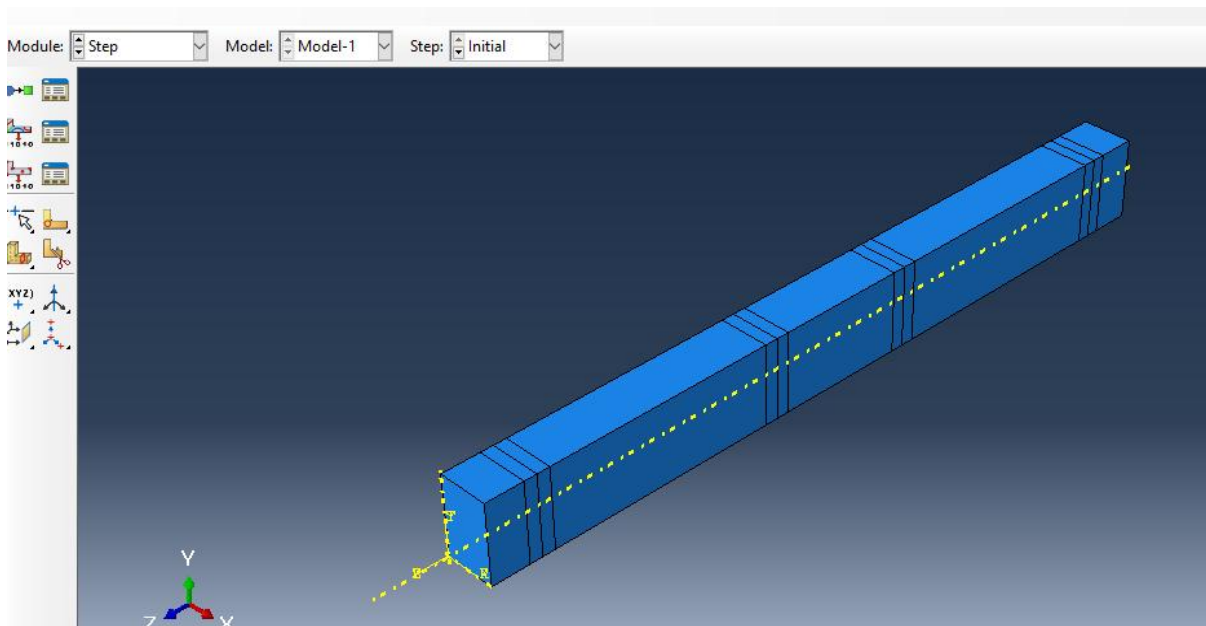


Figure 21 : Création du Step

4.5 Mise en place des contacts (Module Interaction)

Ce module permet de définir les interactions entre les différentes pièces du modèle et d'introduire les hypothèses initiales relatives aux contacts, aux liaisons ainsi qu'aux conditions d'interaction mécanique[35].

Dans cette simulation réalisée sous Abaqus CAE, un contact parfait entre l'acier et le béton a été considéré. Cette interaction a été modélisée à l'aide de l'option « Embedded Region », qui permet d'intégrer les armatures à l'intérieur du volume de béton, assurant ainsi une parfaite adhérence et un transfert continu des efforts entre les deux matériaux[36]

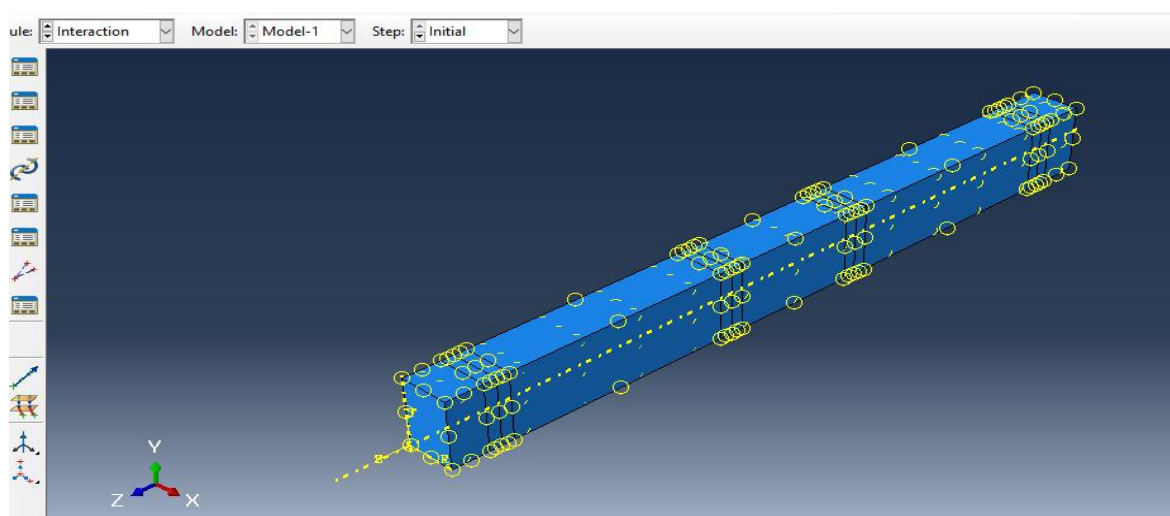


Figure 22 : Création des interactions

4.5.1 Définition des contacts (Module Interaction matériaux composite)

Les armatures en GFRP et CFRP utilisées dans ce modèle sont des matériaux composites constitués de fibres de renforcement (verre ou carbone) immergées dans une matrice de résine polymère. Dans la modélisation numérique, une interaction de type « *Tie* » est adoptée entre le béton et ces armatures afin de supposer une liaison parfaite, assurant ainsi la continuité des déplacements et la transmission directe des efforts.

4.6 Définition des chargements et des conditions aux limites (Module Load)

Dans cette étape, l'utilisateur définit le système de chargement et les conditions aux limites à l'aide des outils « Create Boundary Condition » et « Create Load » [36] du module Abaqus CAE. Les conditions aux limites appliquées dans cette simulation sont les suivantes :

1. Mise en place d'un système d'appuis doubles pour assurer le maintien de la poutre ;
2. Application d'un chargement statique piloté en déplacement, associé à une fonction d'amplitude préalablement définie, afin de reproduire un chargement quasi-statique
3. Prise en compte du poids propre de la poutre dans l'analyse numérique.

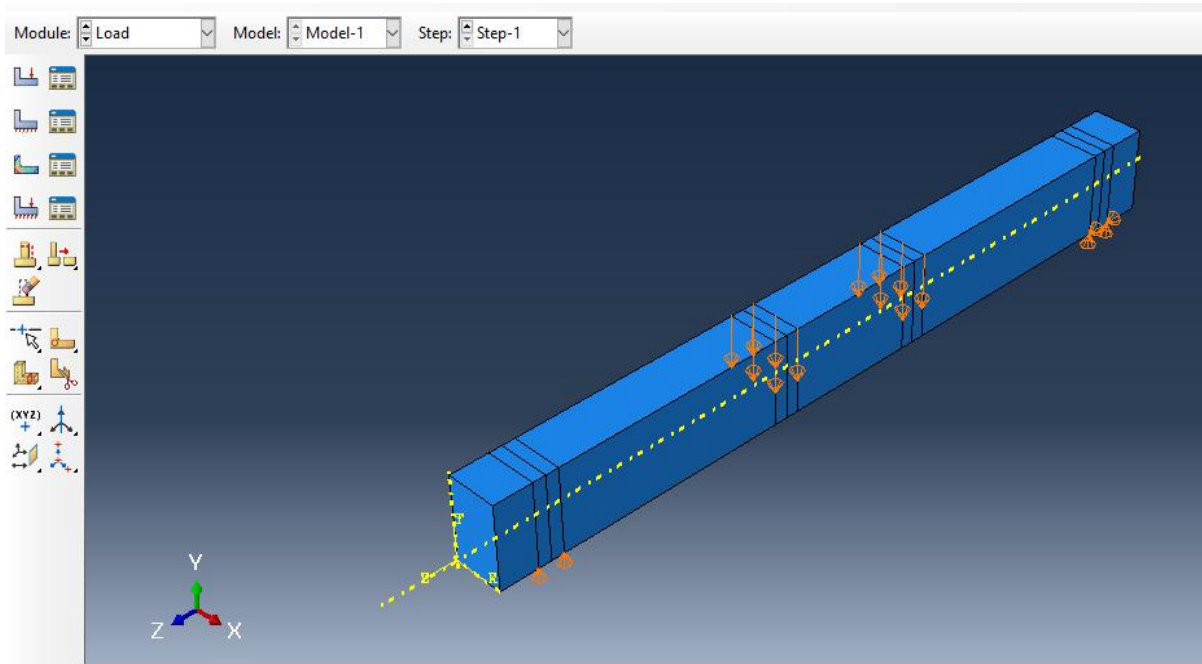


Figure23 : chargement de poutre béton armé.

4.7 Création du maillage dans le module Mesh.

Ce module Mesh de Abaqus CAE regroupe l'ensemble des outils permettant de générer le maillage en éléments finis de l'assemblage étudié. Le maillage constitue une étape essentielle de la modélisation numérique, car il influence directement la précision et la convergence des résultats[37].

La qualité du maillage repose principalement sur deux critères : le choix du type d'éléments (par exemple hexaédriques, cubiques ou tétraédriques) à travers l'option «Mesh Control », ainsi que la complexité topologique de chaque pièce. En effet, plus la géométrie présente une complexité importante, plus la génération du maillage devient délicate[38]. Abaqus CAE propose une représentation visuelle de cette difficulté, où les zones proches du rouge indiquent une complexité élevée, tandis que les zones en vert traduisent une facilité de maillage. Il est également possible d'adapter localement le maillage d'une même pièce afin d'améliorer la précision dans les zones soumises à de fortes déformations.

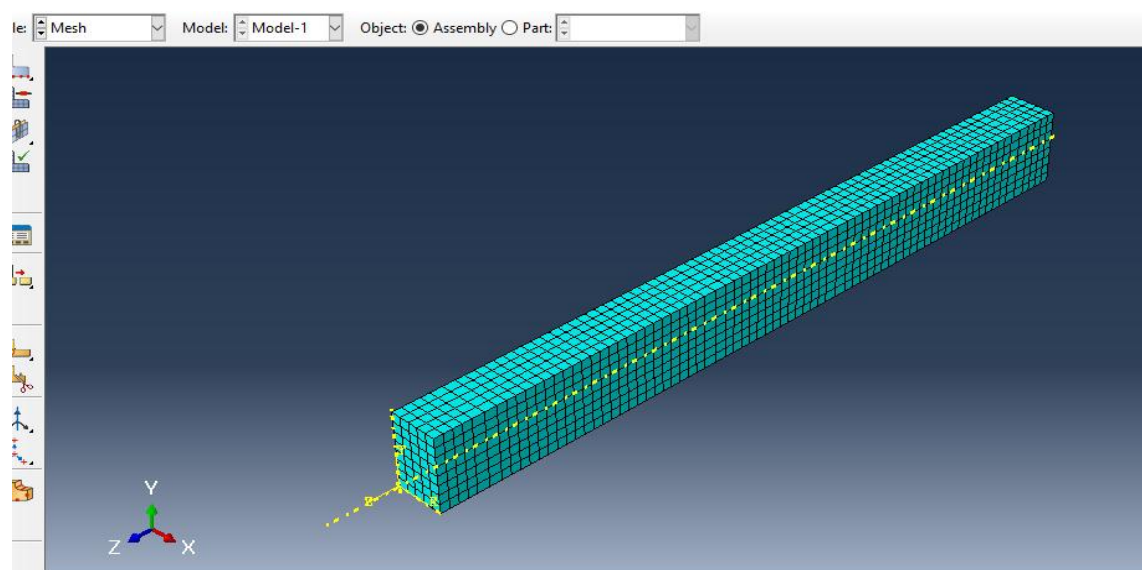


Figure 24 : Maillage de la poutre

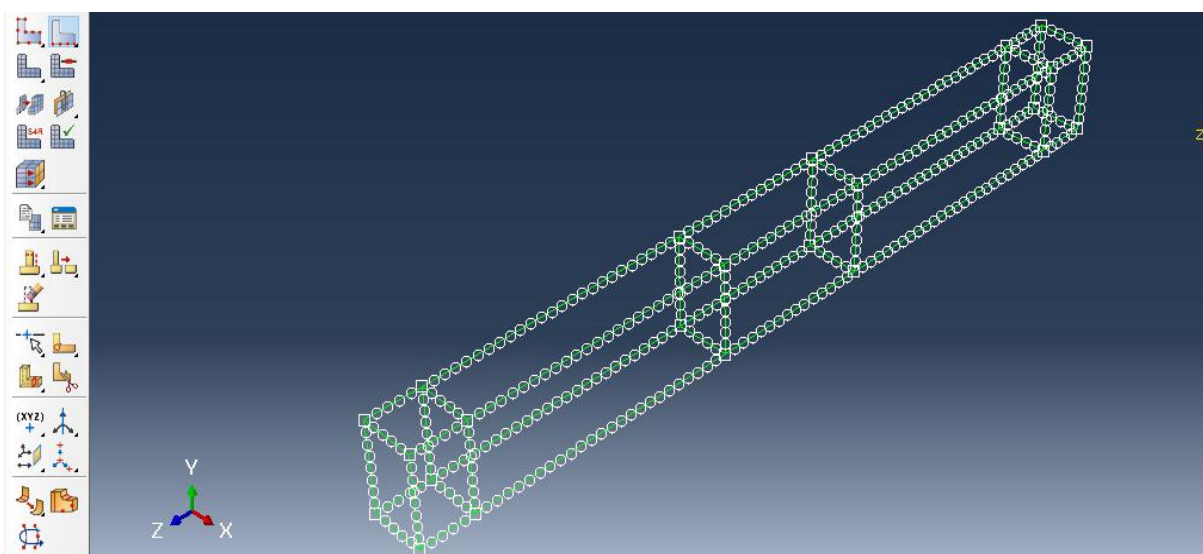


Figure 24 : Maillage de la poutre

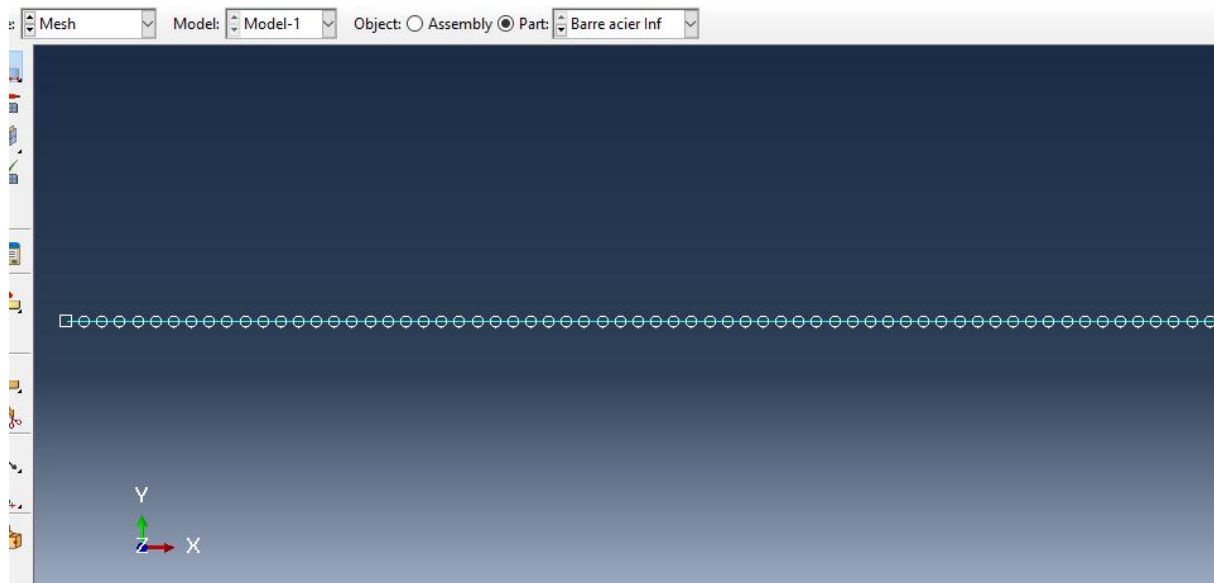


Figure 24 : Présentation du maillage de la barre

4.8 Création du fichier résultats (Module Job)

Le module « Job » de Abaqus CAE permet de regrouper et d'exécuter l'ensemble des paramètres de calcul définis précédemment dans le module « Step ». Après avoir établi l'intégralité du modèle à simuler, incluant la géométrie, les propriétés des matériaux, les lois de comportement ainsi que les conditions de chargement et les conditions aux limites, le lancement de l'analyse numérique s'effectue par la création d'un « Job » puis son exécution à l'aide de l'option « Submit »[39].

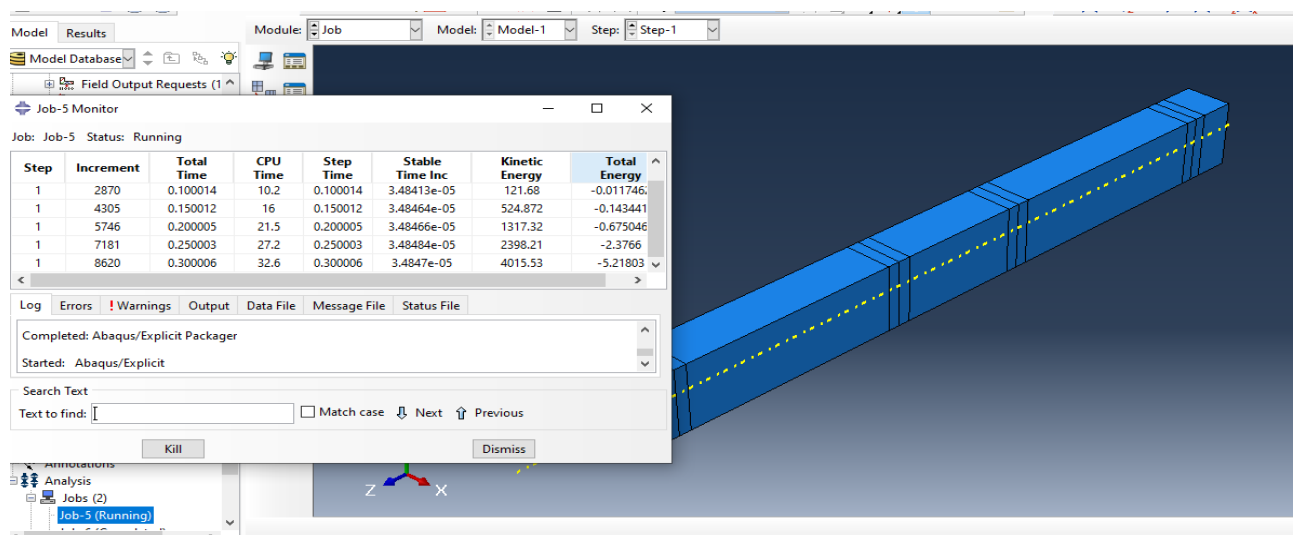


Figure 25 : Création du Job

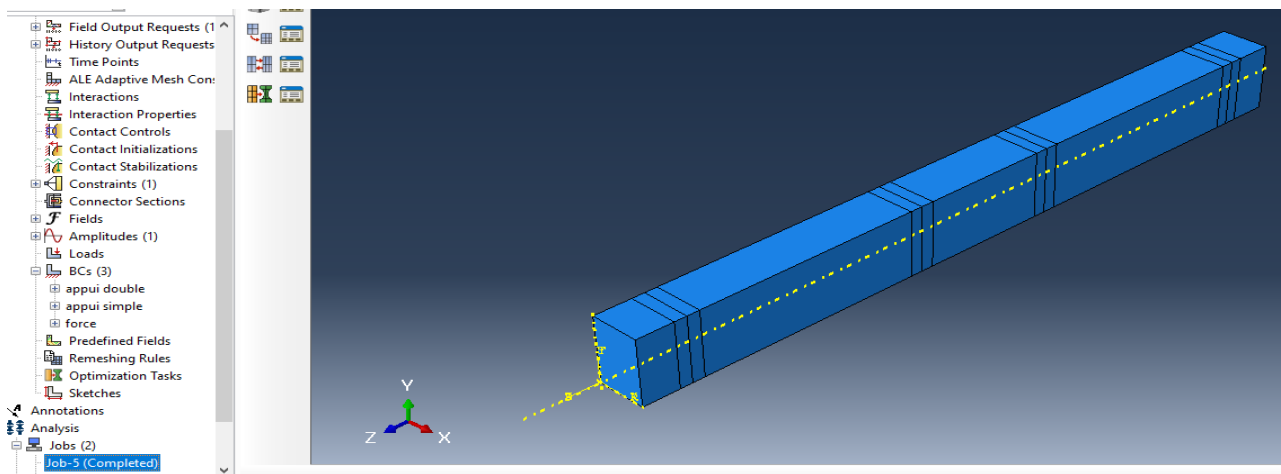


Figure 26: Présentation du Job

4.9 Visualisation des résultats (Module visualization)

Les résultats du calcul numérique sont visualisés dans le module « Results » de Abaqus CAE. Ils peuvent être exploités de deux manières principales.

D'une part, via le « Field Output », qui permet d'observer la distribution des grandeurs dans le modèle, telles que les déformations, les contraintes, les vitesses ou encore les forces.

D'autre part, via le « History Output », qui fournit l'évolution de certaines grandeurs globales sous forme de courbes, notamment l'énergie cinétique, l'énergie totale du système, ainsi que les énergies de dissipation et de déformation

On peut visualiser la forme déformée du modèle, en cliquant sur les outils :  ou .

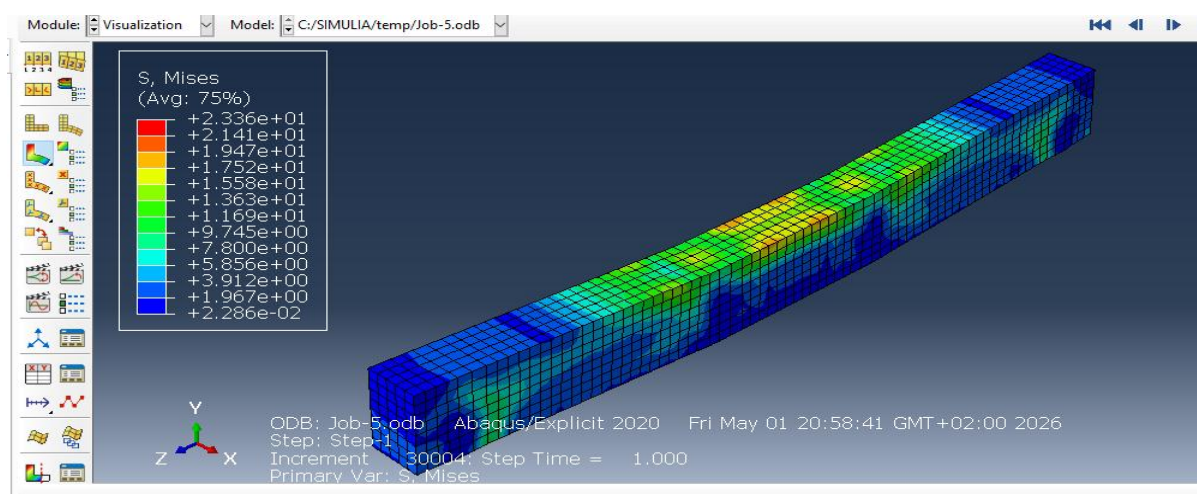


Figure 27 : Visualisation des résultats

5. Modélisation du comportement des matériaux

Pour comprendre comment une structure réagit lorsqu'elle est soumise à des forces externes, il est essentiel d'utiliser un modèle numérique qui puisse prédire son comportement.

On utilise des modèles aux éléments finis pour simuler le comportement du béton du métal et des matériaux composites. Ces modèles sont étudiés individuellement pour voir comment ils réagissent lorsqu'ils sont soumis à différents types de forces[40].

5.1 Modèle non linéaire pour béton

La modélisation du béton est particulièrement complexe, et son comportement mécanique reste difficile à représenter avec précision à l'aide des logiciels basés sur la méthode des éléments finis[41]. Dans cette étude, le modèle numérique utilisé est le modèle « Concrete Damaged Plasticity » intégré dans le code de calcul Abaqus CAE.

Il s'agit d'un modèle couplé associant plasticité et endommagement, basé sur la mécanique de l'endommagement et intégrant les déformations irréversibles. Ce modèle est principalement utilisé pour l'analyse générale du comportement des structures en béton, en particulier dans les situations non linéaires

Loi de comportement en compression et en traction

La théorie de la plasticité sert à montrer que les déformations plastiques sont irréversibles. On peut diviser la déformation totale en deux parties : la déformation élastique et la déformation plastique. La déformation élastique correspond à une énergie qui peut être récupérée lorsque la contrainte est supprimée. En revanche, la déformation plastique entraîne une perte d'énergie qui ne peut pas être récupérée. La déformation totale est donc composée de la déformation élastique et de la déformation plastique.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p$$

Dans le cadre de la théorie des petites déformations, le tenseur des déformations $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ est déterminé à partir du gradient du premier ordre du champ de déplacement. Le champ de déplacement est représenté par u , qui est égal à (u_x, u_y, u_z) . Le tenseur des déformations $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ est calculé de la manière suivante :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = 1/2(u_{ij} + u_{ji})$$

La relation entre les contraintes et les déformations est donnée par:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1+d) \mathbf{e}^l : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) = D \mathbf{e}^l : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p)$$

D'où **D_{0el}** la matrice de rigidité initiale (non endommagée), **Del** la matrice de rigidité élastique endommagée.

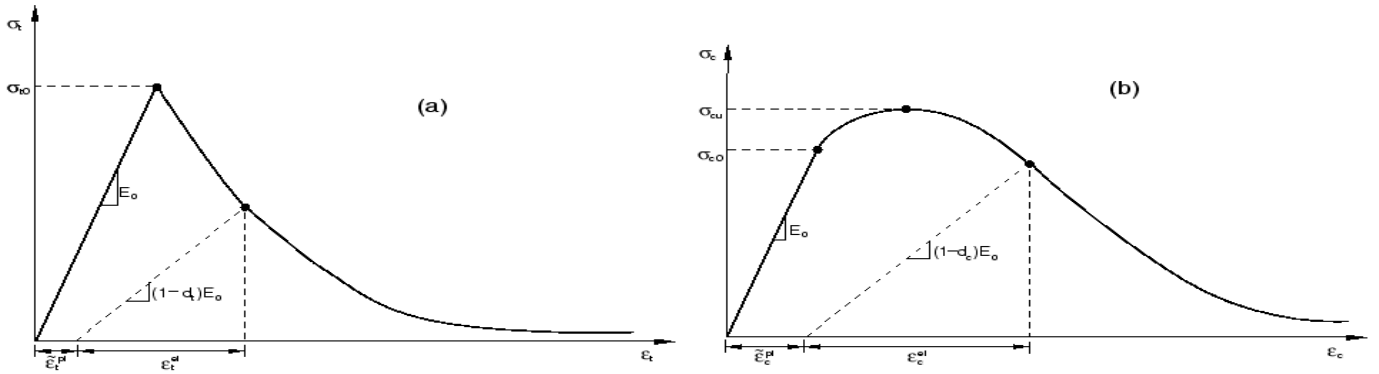
d est la valeur d'endommagement qui peut prendre des valeurs allant de zéros (matériau non endommagé) à un (matériau complètement endommagé) tel que :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t E_c^{-1}}$$

Selon les principes de la mécanique de l'endommagement continu, la contrainte effective est définie par :

$$\sigma = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl})$$



Courbe: Repense du modèle a) à la traction simple. b) à la compression simple.

Les taux de déformation plastique équivalents est déterminés par :

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_{11}^{pl} \quad \text{Uni-axial traction}$$

$$\varepsilon_t^{pl} = - \varepsilon_{11}^{pl} \quad \text{Uni-axial compression}$$

La réponse dégradée du béton est caractérisée par deux variables de dommage uni-axiales indépendantes, qui sont notées d_t et d_c . Ces variables de dommage sont considérées comme étant liées à la déformation plastique du béton.

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i), \quad 0 \leq d_t \leq 1$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i), \quad 0 \leq d_c \leq 1$$

Si E_0 représente la rigidité élastique initiale du matériau, les relations contrainte-déformation en traction et en compression uniaxiales s'écrivent respectivement comme suit :

$$\sigma_t = (1 - \tilde{d}_t) E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$$

$$\sigma_c = (1 - \tilde{d}_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$$

Lors des fissures, la surface disponible pour supporter la charge se réduit, ce qui entraîne une augmentation de la contrainte effective de traction et de compression tel que :

$$\tilde{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$$

$$\tilde{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$$

Les différentes lois utilisées pour ce modèle sont représentées dans le tableau suivant :

Dénotations	Équations
Contraintes effectives en traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

Tableau 2.2 : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton

Identification des paramètres du modèle.

Les paramètres clés à définir avec précision sont la loi contrainte-déformation.

Cette loi permet de déterminer les valeurs d'écrouissage en s'appuyant sur le modèle expérimental

de Liang Huang et al [42]. Les paramètres du modèle numérique du béton utilisés dans cette étude

sont présentés dans les tableaux suivants :

Paramètres		Dénotation
Notations	Valeur	
f_c (MPa)	$f_c=30\text{MPa}$	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.3 f_c$ (MPa)	9MPa	Contrainte élastique en compression
ε_{cl} (‰)	2.0‰	Déformation au pic en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06 f_c$ (MPa)	2.4MPa	Contrainte maximale en traction
$\varepsilon_{\tau\mu}$ (‰)	0.1‰	Déformation correspondante à t_0
$E = 11000(f_c)^{1/3}$ (MPa)	35000MPa	Module de Young instantané
ν	0.3	Coefficient de poisson

Tableau 2.3: Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton

5.2 Modélisation de l'acier

L'acier présente un comportement élasto-plastique avec écrouissage, aussi bien en traction qu'en compression. Dans cette étude numérique, les paramètres mécaniques adoptés pour la modélisation de l'acier sont un module d'Young de 210000 MPa, un coefficient de Poisson de 0,3, ainsi qu'une contrainte limite à la rupture fixée à 500 MPa

5.3 Modélisation des Composites

Les matériaux composites se distinguent par un comportement mécanique spécifique, principalement lié à deux aspects essentiels. Le premier est associé à leur caractère anisotrope au niveau des couches élémentaires, où les propriétés mécaniques varient selon les directions. Le second résulte de leur structure stratifiée, constituée par l'empilement successif de plusieurs couches. Cette section a pour objectif de présenter le comportement élastique des matériaux orthotropes adoptés dans cette étude[43].

Les paramètres du modèle numérique des bandes **GFRP** et **CFRP** utilisé dans notre étude numérique sont représentés dans

	Module de Young GPA	Densité Kg/m³	Coefficient de poisson	Diamètre des barre (mm)
Fibre de carbone	221.7	2.8*10⁻⁶	.31	10
Fibre de verre	79.7	2.3*10⁻⁶	0.31	10

Tableau 2.4 : Paramètres utilisés pour le comportement des barres CFRP, GFRP

"Les valeurs mécaniques utilisées dans la simulation numérique sont issues des données expérimentales de référence et peuvent différer légèrement des données commerciales des produits Maperod."

5.3 Les Différents matériaux composites utilisés dans le domaine du renforcement structural

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres a connu un développement important dans le domaine du génie civil. Cela est dû à leur utilisation pour la réparation, le renforcement et l'amélioration des performances mécaniques des structures en béton armé. Les matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres représentent une solution moderne qui offre une alternative aux méthodes traditionnelles de renforcement. Les matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres possèdent des propriétés mécaniques excellentes, un poids faible et une grande durabilité. Les matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres sont donc très appréciés dans le génie civil[44].

Les matériaux composites FRP sont généralement constitués de deux composants principaux : les fibres de renforcement (fibres de carbone, fibres de verre ou fibres d'aramide) qui assurent la résistance mécanique, et la matrice polymérique (généralement une résine époxy) qui garantit la cohésion entre les fibres et la transmission des efforts. Selon la nature des fibres utilisées, on distingue principalement les composites à fibres de carbone (CFRP), à fibres de verre (GFRP) et à fibres d'aramide (AFRP). Parmi ces types, les composites à fibres de carbone sont les plus performants en termes de rigidité et de résistance mécanique, ce qui explique leur large utilisation dans le renforcement des éléments structuraux sollicités en flexion ou en traction[45].

Face à la demande croissante dans le domaine du renforcement structural, plusieurs fabricants spécialisés proposent des systèmes composites adaptés aux besoins du génie civil.

Parmi les produits les plus utilisés dans le domaine du génie civil, on peut citer :

- Sika : systèmes de renforcement à base de fibres de carbone, tels que les gammes SikaWrap et Sika CarboDur .
- Mapei : systèmes composites de la gamme MapeWrap à base de fibres de carbone .
- BASF : solutions de renforcement structurel basées sur des matériaux composites .
- Fosroc : systèmes composites pour la réparation et le renforcement des structures.

Le choix du matériau composite dépend de plusieurs critères, notamment la résistance mécanique recherchée, le module d'élasticité, la compatibilité avec le matériau support, la facilité de mise en œuvre, ainsi que les conditions environnementales auxquelles la structure sera exposée. Dans le cas des composites à fibres de carbone, leur module d'élasticité élevé et leur résistance importante à la traction permettent d'assurer une meilleure reprise des efforts de traction, particulièrement dans les zones tendues des poutres soumises à la flexion.

Parmi les solutions proposées par Mapei, la gamme **Maperod** occupe une place importante dans les applications de renforcement interne. Contrairement aux tissus composites utilisés principalement pour le renforcement externe, les barres Maperod sont conçues comme des éléments structurels destinés à être intégrés ou ancrés dans la structure. Ces barres sont fabriquées par pultrusion, un procédé permettant d'obtenir des éléments composites continus avec une excellente homogénéité mécanique et une forte résistance structurale [Annexe 1]

6.1 Types de Produits MAPEROD

La gamme se décline en deux types principaux selon la nature de la fibre utilisée :

- **Maperod C** : Barres de carbone pultrudées à haute résistance à la traction, imprégnées d'une résine époxy. [Annexe 2]
- **Maperod G** : Barres de verre pultrudées, imprégnées d'une résine vinylester modifiée à l'époxy. [Annexe 3]

6.1.1 Résumé Technique du Matériau

Les barres Maperod sont des éléments structurels ronds et déformés (pour une meilleure adhérence) utilisés pour la réparation et le renforcement structurel d'éléments en béton, bois ou maçonnerie.

➤ Caractéristiques Principales

- **Légèreté et Résistance** : Elles offrent une très haute résistance à la traction tout en étant extrêmement légères, ce qui facilite la mise en œuvre sans équipement de levage lourd.
- **Durabilité** : Contrairement aux plaques d'acier (béton plaqué), ces matériaux ne sont pas sujets à la corrosion.
- **Compatibilité** : Leur module d'élasticité est adapté aux exigences du béton et des autres matériaux de construction.

6.2 Comparatif des Performances

TECHNICAL DATA (typical values)		
PRODUCT IDENTITY		
	Maperod C	Maperod G
Matrix:	epoxy resin	epoxy-modified vinylester
Appearance:	solid, round structural element	
Colour:	black	white
PRODUCT CHARACTERISTICS		
	Maperod C	Maperod G
Density (g/cm ³):	1.54	1.995
Fibre content (%):	71	75
Cross-section area (mm ²):	73.9	71.26
Nominal diameter (mm):	9.7	9.53
FINAL PERFORMANCE		
Tensile strength (N/mm ²):	2,000	760
Modulus of elasticity (N/mm ²):	155,000	40,800
Elongation at failure (%):	1.5	2
Shear strength (MPa):	75	15
Coefficient of longitudinal thermal expansion (m/m°C):	6 -10 x 10 ⁻⁶	6-10 x 10 ⁻⁶
Coefficient of transversal thermal expansion (m/m°C):	–	21-23 x 10 ⁻⁶

Fiche technique du société MAPEROD

➤ Domaines d'Application

Ces barres sont principalement utilisées pour :

- Augmenter la capacité de charge (changement de destination d'un ouvrage).
- Améliorer la performance sismique dans les zones à risque.
- Réduire les déformations sous charge de service (augmentation de la rigidité).
- Servir d'ancrage terminal pour d'autres systèmes composites (comme les tissus MapeWrap).

➤ Installation (Points clés)

L'installation se fait par scellement dans des trous forés (environ 1,5 fois le diamètre de la barre pour le béton) préalablement nettoyés. Le système nécessite l'utilisation de résines spécifiques comme le **MapeWrap Primer 1** pour l'adhérence, et les colles époxy **MapeWrap 11/12** ou **Mapefix EP** pour le scellement final.

La gamme Maperod se décline en deux principaux types selon la nature des fibres utilisées : **Maperod C**, constitué de fibres de carbone pultrudées imprégnées de résine époxy, et **Maperod G**, constitué de fibres de verre pultrudées imprégnées d'une résine vinylester modifiée à l'époxy. Le choix entre ces deux types dépend principalement des exigences mécaniques du projet ainsi que des conditions d'exploitation de la structure.

Les barres **Maperod C** présentent des performances mécaniques élevées avec une résistance à la traction pouvant atteindre 2000 MPa et un module d'élasticité de 155 GPa, ce qui leur confère une excellente capacité de reprise des efforts de traction dans les zones tendues des éléments en béton armé [Annexe 2]. En revanche, les barres **Maperod G** possèdent une résistance à la traction d'environ 760 MPa et un module d'élasticité de 40,8 GPa, ce qui en fait une alternative plus économique mais mécaniquement moins performante. [Annexe 3]

L'utilisation des barres Maperod C comme armement interne dans cette étude permet d'évaluer l'influence du remplacement des armatures conventionnelles en acier par des armatures composites en fibres de carbone sur le comportement global de la poutre en béton armé, notamment en termes de rigidité, de capacité portante, de déformation et de mode de rupture, à travers une modélisation numérique réalisée sous Abaqus.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel Abaqus. Il nous a servi à simuler le comportement non linéaire d'une poutre en béton armé renforcée de matériaux composites comme les fibres de carbone ou de verre soumise à un chargement statique.

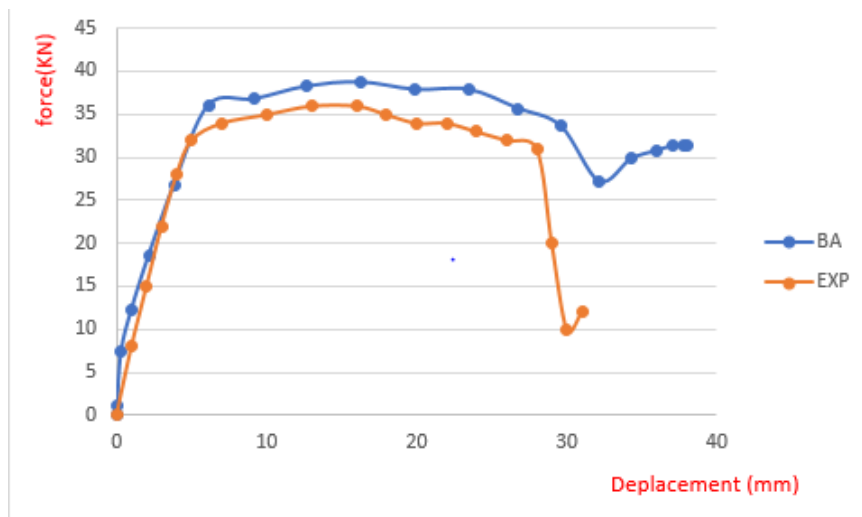
Les matériaux ont été représentés à l'aide de modèles numériques intégrés dans Abaqus. Le béton utilise un modèle de plasticité endommageable. Ce dernier permet d'évaluer la réponse ultime. Il décrit aussi l'évolution de l'endommagement. Cela aide à définir le mode de rupture des éléments étudiés. Les matériaux composites, quant à eux, utilisent un modèle élastique orthotrope. Il caractérise leur comportement mécanique jusqu'à la rupture.

CHAPITRE 3

Analyse Comparative du Comportement d'une Poutre Renforcée

1. Introduction

La présente étude consiste à comparer les résultats expérimentaux obtenus sur une poutre en béton armé avec les résultats issus de la simulation numérique réalisée sous le logiciel Abaqus en utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Pour cela, une poutre réelle a été testée expérimentalement [] afin d'évaluer son comportement mécanique sous chargement. Ensuite, une poutre identique a été modélisée numériquement dans Abaqus en conservant les mêmes dimensions géométriques, les mêmes caractéristiques des matériaux ainsi que les mêmes conditions de chargement et d'appui. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est effectuée à partir des courbes Force-Déplacement dans le but d'évaluer la capacité du modèle numérique à reproduire avec précision le comportement réel de la structure étudiée.



Courbe: Validation du modèle non renforcé

3. Analyse globale de la poutre de référence (Témoin BA)

Les deux courbes (expérimentale et numérique) présentent globalement les mêmes phases de comportement mécanique :

- **Phase élastique initiale** : augmentation rapide et linéaire de la force en fonction du déplacement.
- **Phase plastique / endommagement progressif** : stabilisation de la charge autour de la valeur maximale suite à la plastification des aciers et à la fissuration du béton.
- **Phase post-pic** : diminution de la capacité portante de la structure.
- **Phase de rupture** : chute importante de la force

3.1 Rigidité de la poutre

La rigidité de la poutre est représentée par la pente initiale de la courbe. Les deux courbes présentent une phase initiale quasi linéaire correspondant au comportement élastique de la poutre avant fissuration. On remarque que la courbe numérique (BA) possède une pente légèrement plus élevée que la courbe expérimentale (EXP), ce qui indique que le modèle numérique prévoit une rigidité initiale plus importante. En revanche, la poutre expérimentale présente des déplacements légèrement plus élevés sous les mêmes niveaux de charge

Cette différence s'explique par plusieurs facteurs, notamment la présence de microfissures initiales dans le béton, les défauts de mise en œuvre, ou encore les tolérances d'ajustement des conditions d'appuis réels lors de l'essai, qui sont parfaitement idéalisées dans le modèle numérique. Ainsi, le modèle MEF surestime légèrement la rigidité réelle de la poutre.

3.2 Résistance maximale

Les deux courbes montrent une augmentation progressive de la charge jusqu'à atteindre un palier sommital. La poutre numérique (BA) atteint une charge maximale d'environ 38 kN, tandis que la poutre expérimentale (EXP) plafonne à environ 36 kN. L'écart entre les deux résultats reste faible (environ 5,5 %), ce qui valide la capacité du modèle numérique à prédire correctement la résistance globale de la poutre de référence.

3.3 Capacité de déformation et ductilité

L'analyse des courbes montre que la poutre expérimentale peut subir des déplacements importants avant la rupture finale, avec un déplacement ultime enregistré voisin de 31 mm. Après le pic de charge, la courbe expérimentale présente une chute brutale, traduisant un endommagement macroscopique instable (propagation rapide des fissures et écrasement du béton comprimé.

À l'inverse, la courbe numérique montre une diminution plus progressive de la charge après le pic, traduisant une stabilité numérique inhérente aux algorithmes de calcul. Le modèle numérique affiche donc une ductilité légèrement supérieure. Globalement, la poutre présente un comportement ductile acceptable avec une bonne dissipation d'énergie avant la ruine.

3.4 Limite du modèle

"Le modèle numérique ne prend pas en compte le décollement interfacial béton-FRP, ce qui peut conduire à une légère surestimation de la résistance ultime et du comportement post-pic.

4. Validation du model numérique

La comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus sous ABAQUS montre que le modèle numérique reproduit correctement le comportement global de la structure. La différence sur la charge maximale reste limitée à environ 7 %, ce qui confirme la fiabilité du modèle numérique. Globalement, la simulation ABAQUS constitue un outil efficace pour l'analyse et la prédiction du comportement mécanique de la structure étudiée.

4.1. Analyse de l'endommagement numérique du Poutre en béton arme

Le modèle de comportement du béton (CDPM sous Abaqus) permet d'extraire trois indicateurs clés :

- **DAMAGET** montre surtout les fissures de traction,
- **DAMAGEC** montre l'écrasement ou la dégradation en compression,
- **SDEG** synthétise l'état global du matériau.

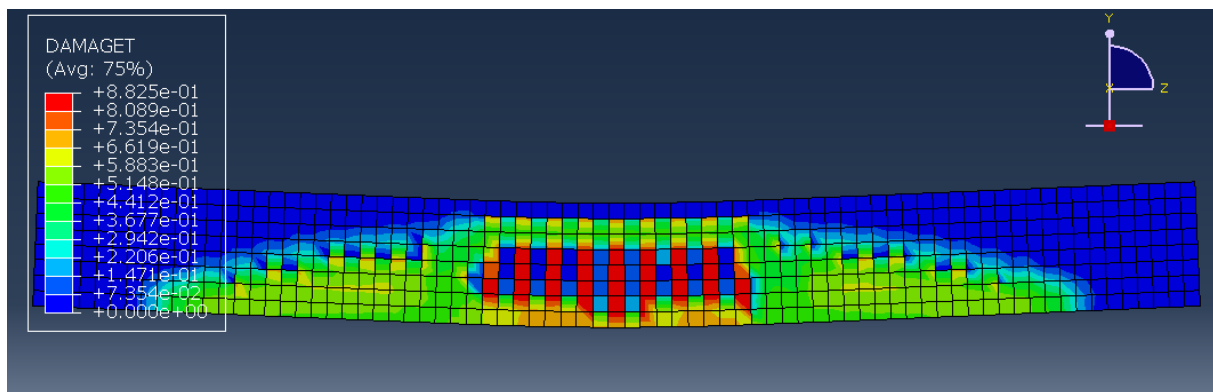


Figure 29 : Représentation de dommages dus à la traction du poutre en béton arme

L'image représente la distribution de l'endommagement (DAMAGET) d'une poutre en béton armé obtenue par simulation numérique sous Abaqus. Les valeurs affichées varient entre 0 et 0,8825.

Les zones critiques sont principalement localisées au milieu de la travée, correspondant à la région de moment fléchissant maximal

Cette concentration élevée de l'endommagement indique l'apparition des fissures principales de flexion dans la zone tendue du béton

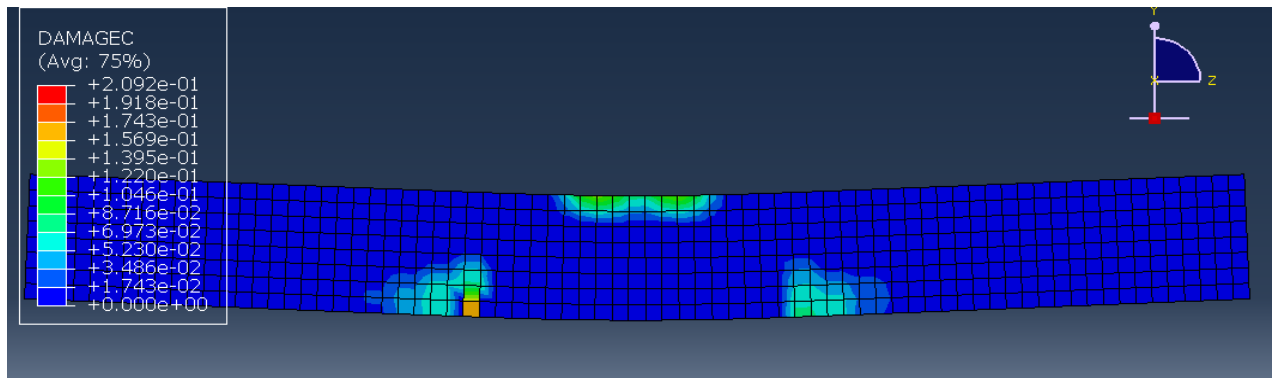


Figure 30 : Représentation de dommages dus à la compression de la poutre en béton armé

L'image **DAMAGEC** représente la dégradation du béton sous compression. Les valeurs restent relativement faibles avec :

$$Dc_{max} \approx 0.209$$

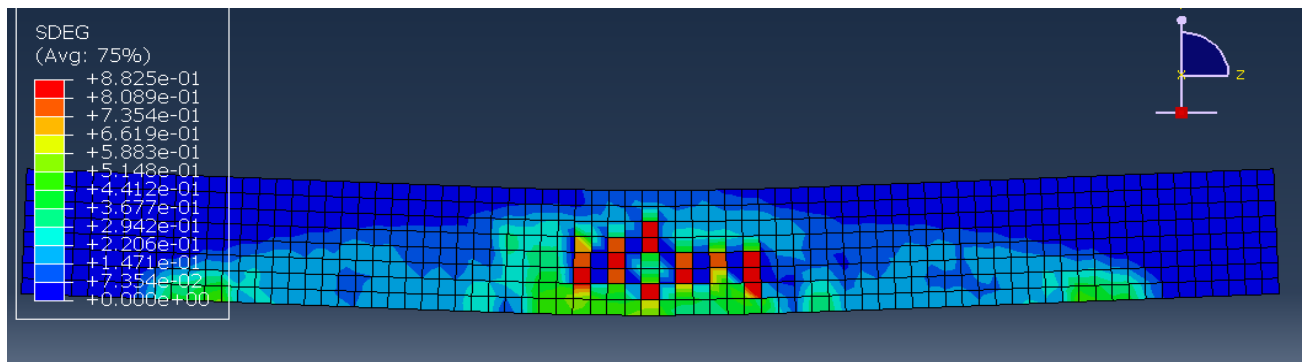


Figure 31 : Représentation de dommages globale du poutres en béton armé

La variable **SDEG** correspond à l'endommagement scalaire global du matériau. Elle combine les effets de :

- La traction
- La compression
- La propagation générale des fissures.

La valeur maximale atteint environ :

$$SDEG_{max} \approx 0.882$$

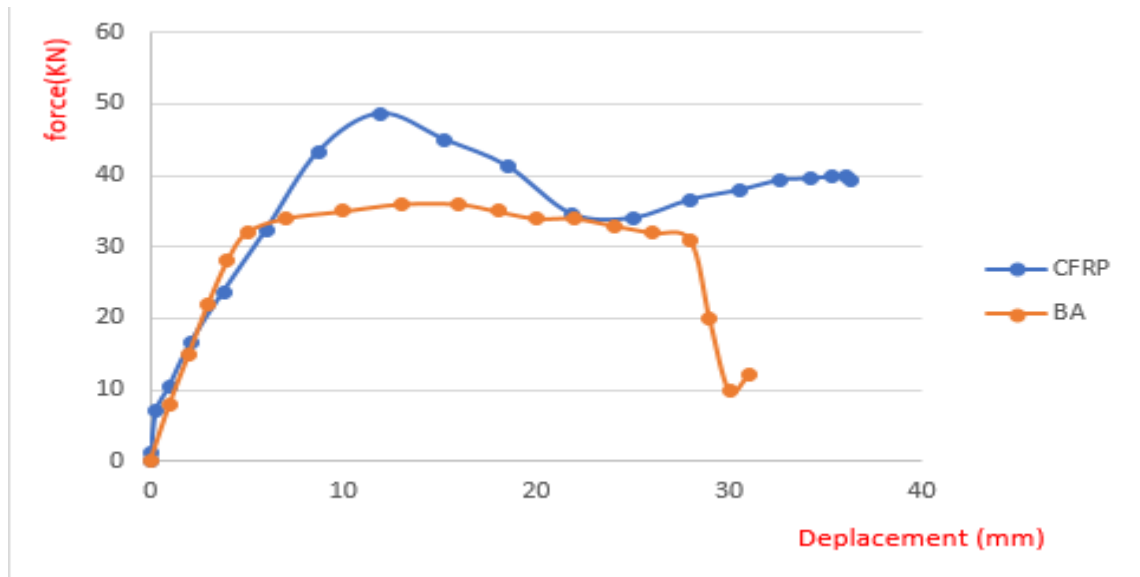
Les zones endommagées apparaissent principalement :

- Dans la partie supérieure centrale de la poutre (zone comprimée),
- Ainsi qu'autour de certaines régions proches des charges et des appuis

5. Remplacement intégral des armatures par des barres composites (CFRP/GFRP)

Dans cette section, les deux barres d'armature inférieures en acier ont été remplacées numériquement par des barres en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP), puis par des barres en fibres de verre (GFRP), à géométrie et diamètre constants.

5.1 Analyse du comportement avec armatures en CFRP



courbe : Validation du modèle renforcé par des barres inférieur de fibre de carbone

- **Rigidité :** La poutre armée en CFRP présente une rigidité supérieure à la poutre en acier (BA). Pour un déplacement de 10 mm, la charge est de 43 kN (CFRP) contre 34 kN (BA), soit une augmentation de 26 %. Les propriétés mécaniques élevées du carbone limitent efficacement les déformations.
- **Résistance :** La charge ultime atteint 48 kN pour la poutre CFRP contre 36 kN pour la poutre BA, soit un gain de résistance de 33 % dû à la haute résistance à la traction du composite.
- **Ductilité et limites :** Bien que le déplacement ultime s'étende à 38 mm (+15 %) , le comportement du CFRP reste purement élastique linéaire sans phase plastique. La redistribution des efforts se fait par transfert progressif du béton fissuré vers le CFRP (visualisé par la concentration de la variable DAMAGET en zone centrale tendue). Le modèle MEF a tendance à surestimer la capacité post-pic (+36 % d'écart avec certains essais théoriques) car il considère une adhérence parfaite et omet le décollement prématuré de l'interface béton-composite.

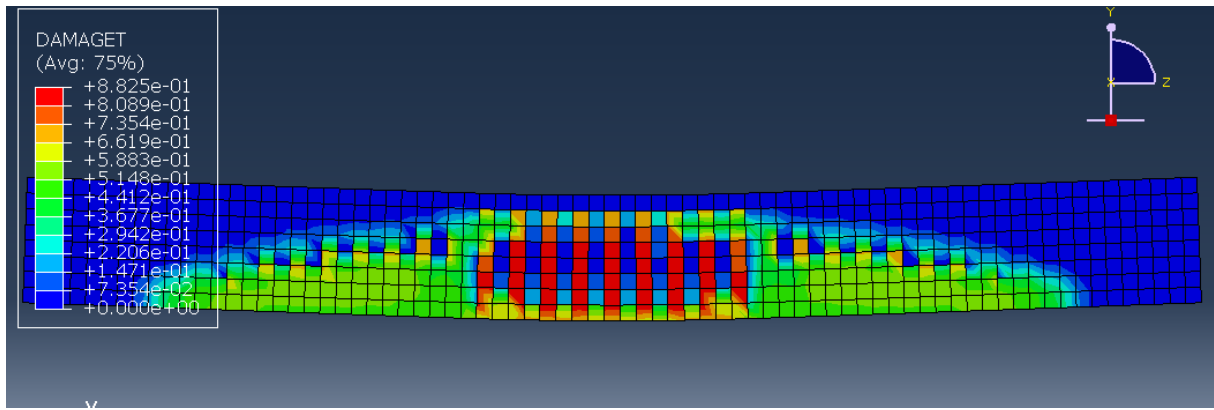


Figure 32 : dommages dus à la traction de la poutre en béton armé par des fibres de carbone

L'image présente la distribution de l'endommagement en traction (**DAMAGET**) d'une poutre en béton armé dans laquelle les barres d'acier inférieures ont été remplacées par des barres en fibre de carbone (CFRP).

La valeur maximale de l'endommagement atteint environ :

$$Dt.max \approx 0.882$$

Les zones rouges observées au milieu de la poutre correspondent aux régions fortement fissurées situées dans la zone tendue inférieure. Cela confirme que les fissures de flexion se développent principalement au centre de la portée, où le moment fléchissant est maximal.

Par rapport à une poutre classique armée par acier, plusieurs différences peuvent être observées :

- Les fissures sont plus concentrées dans la région centrale.
- La propagation verticale des fissures est plus marquée.
- L'endommagement reste principalement localisé dans la zone de traction.
- La poutre conserve une bonne rigidité globale malgré l'apparition des fissures.

Les armatures CFRP limitent la déformation des zones tendues et permettent une meilleure résistance à la fissuration. Cependant, contrairement à l'acier, les fibres de carbone ne présentent pas de phase plastique importante. Ainsi, la structure devient généralement moins ductile et la rupture peut être plus brusque.

La concentration des valeurs élevées de DAMAGET dans la partie inférieure montre que le béton fissuré transfère progressivement les efforts de traction vers les barres CFRP.

L'endommagement reste relativement faible dans la zone comprimée supérieure, indiquant que la rupture est dominée par la traction et non par l'écrasement du béton

Globalement, cette simulation montre que le remplacement des armatures inférieures en acier par des barres en fibre de carbone améliore la résistance à la traction et réduit l'extension générale des fissures, tout en modifiant le mode de rupture et la ductilité de la poutre.

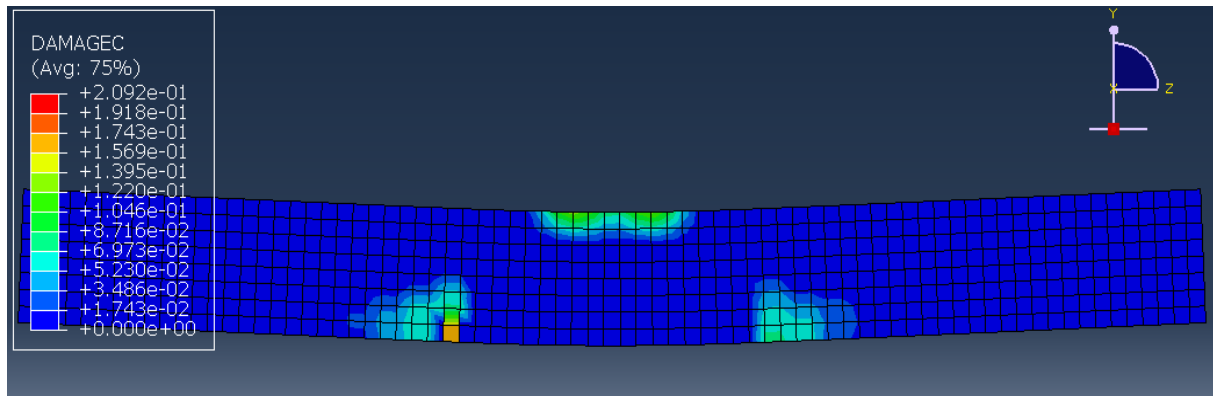


Figure 33 : dommages due à la compression de la poutre BA par des fibres de carbone
la dégradation du béton sous compression. Les valeurs restent relativement faibles avec :

$Dc.max \approx 0.209$

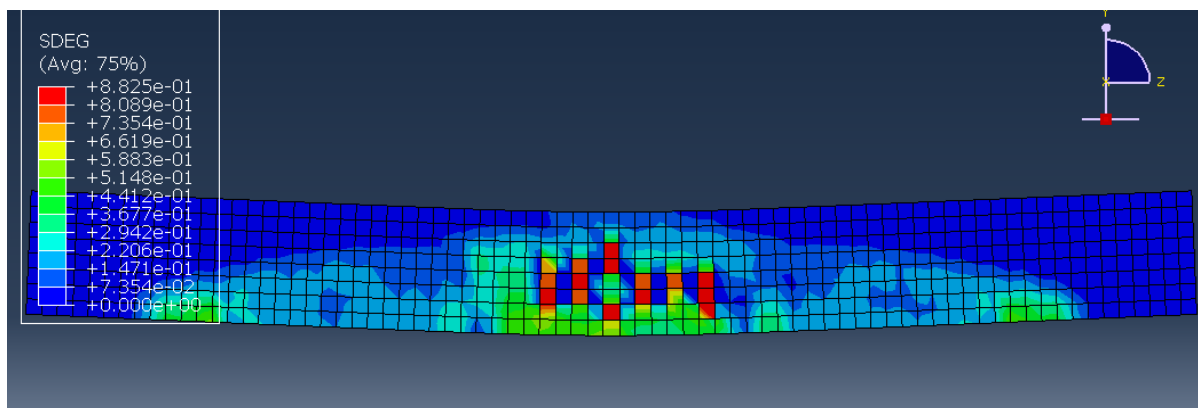
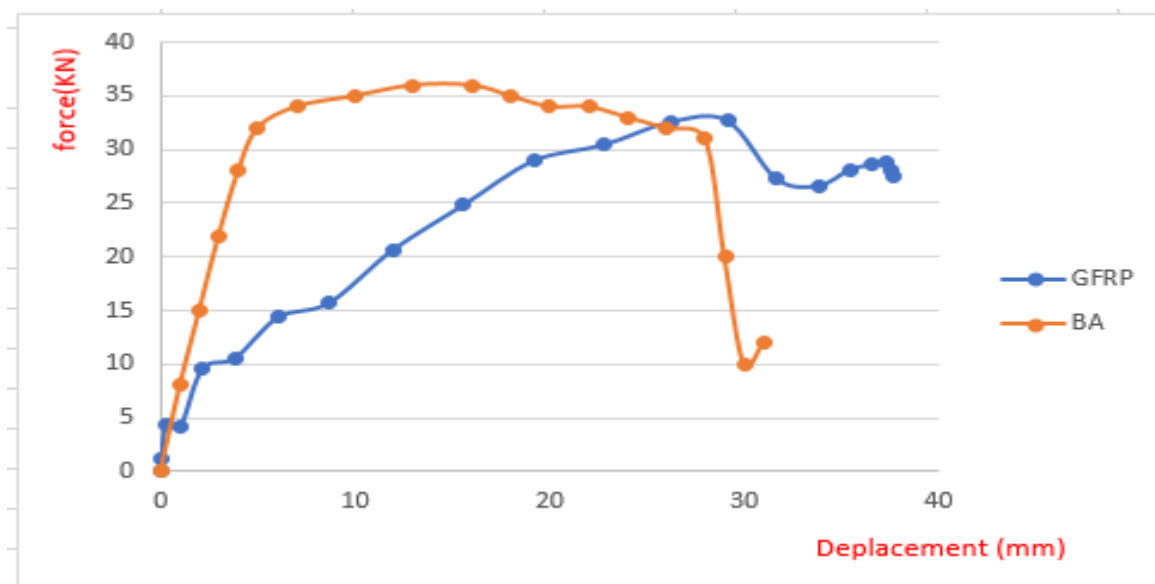


Figure 34 : Représentation de dommages globale de la poutre en BA par des fibres de carbone

5.2 Analyse du comportement avec armatures en GFRP :



Courbe : Validation du model renforce par des barres inférieures de fibre de verre

- **Rigidité** : Contrairement au carbone, la poutre équipée de barres en fibres de verre (GFRP) montre une diminution de sa rigidité initiale par rapport à l'acier. Les déformations sont plus importantes sous une charge équivalente car le module d'élasticité de la fibre de verre est nettement inférieur à celui de l'acier.
- **Résistance et Ductilité** : La résistance maximale se stabilise autour de 35 kN. Cependant, grâce à la plus grande déformabilité de la fibre de verre, la poutre affiche une excellente capacité de déformation et une rupture post-pic moins brutale que celle du CFRP, offrant une meilleure tolérance aux concentrations de contraintes à l'interface.

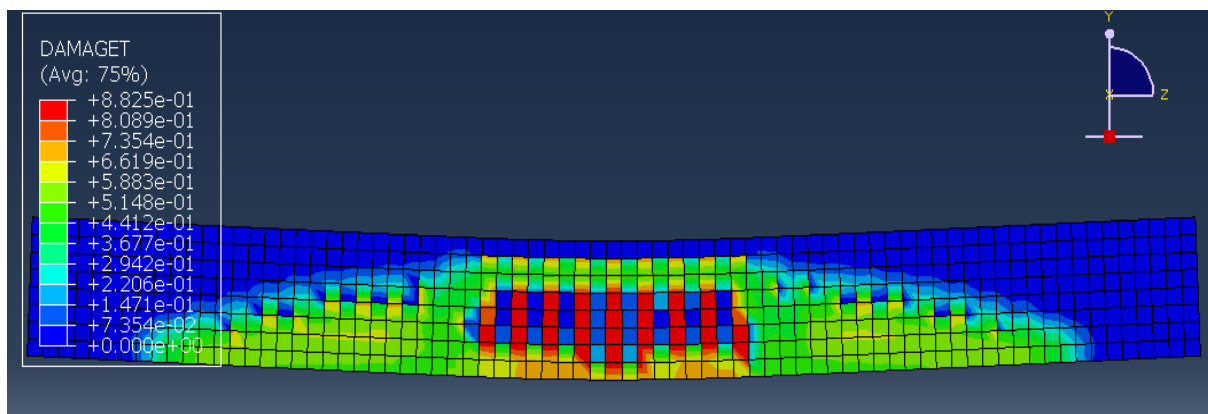


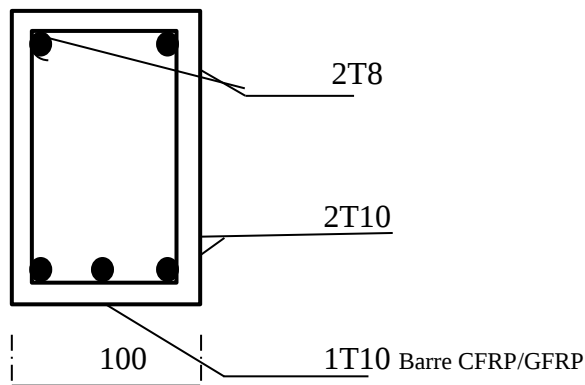
Figure 35 : dommages dus à la traction de la poutre en béton armé par des fibres de verre

le renforcement en GFRP contribue à limiter la propagation des fissures en dehors de la zone centrale.

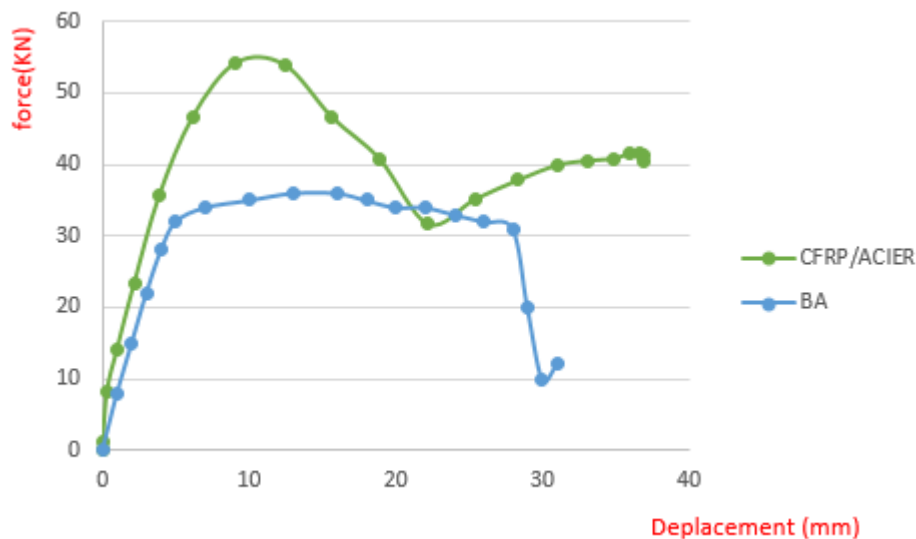
6. Analyse des configurations hybrides (Acier + Barre Composite Additionnelle)

Cette configuration consiste à conserver les armatures longitudinales en acier et à implanter une troisième barre centrale en composite (CFRP ou GFRP)

SECTION A-A



L'objectif de cette modification est d'étudier l'influence de l'ajout d'une barre composite sur le comportement mécanique de la poutre. Cette configuration hybride acier-CFRP /acier-GFRP permet également d'évaluer la contribution des barres composants dans l'amélioration de la capacité portante et du comportement structural global de la poutre tout en conservant les armatures traditionnelles en acier.



Courbe : Validation du model renforcé par des barres inférieur hybrides acier /CFRP

6.1 Configuration Hybride Acier/CFRP

- **Rigidité** : L'action conjuguée de l'acier et de la barre CFRP engendre une forte augmentation de la rigidité initiale (+54 % de charge reprise à 10 mm de déplacement, soit 54 kN contre 35 kN pour la poutre BA).
- **Résistance ultime** : C'est la configuration la plus performante avec une charge maximale de 55 kN, soit un gain de 54 % par rapport au témoin.
- **Ductilité** : Le déplacement ultime atteint 34 mm (+13 %). Contrairement à la poutre BA qui subit une chute de 67 % de sa résistance après 30 mm, la courbe hybride se stabilise aux alentours de 40 kN, prouvant une excellente dissipation d'énergie.

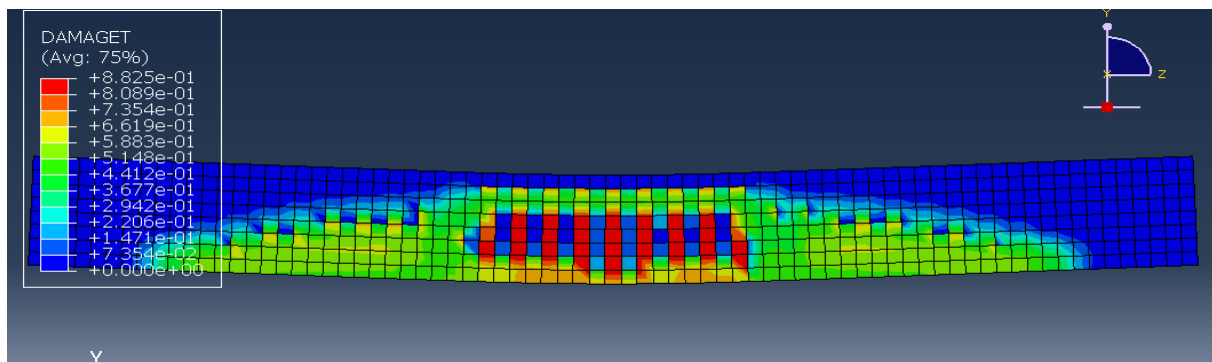


Figure 36 : dommages dus à la traction de la poutre en béton armé par Hybride Acier/CFRP

L'introduction d'un renforcement hybride acier/CFRP dans la zone tendue améliore le comportement structural de la poutre en limitant la propagation des fissures et en augmentant la capacité de reprise des efforts de traction. L'endommagement reste concentré dans la région centrale soumise au moment fléchissant maxima.

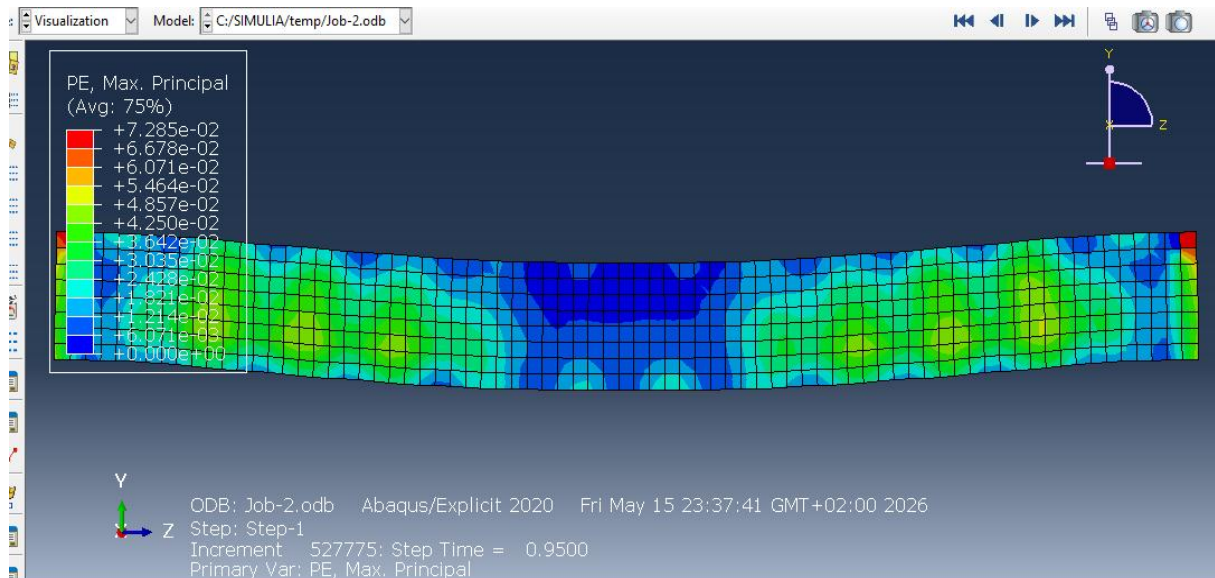
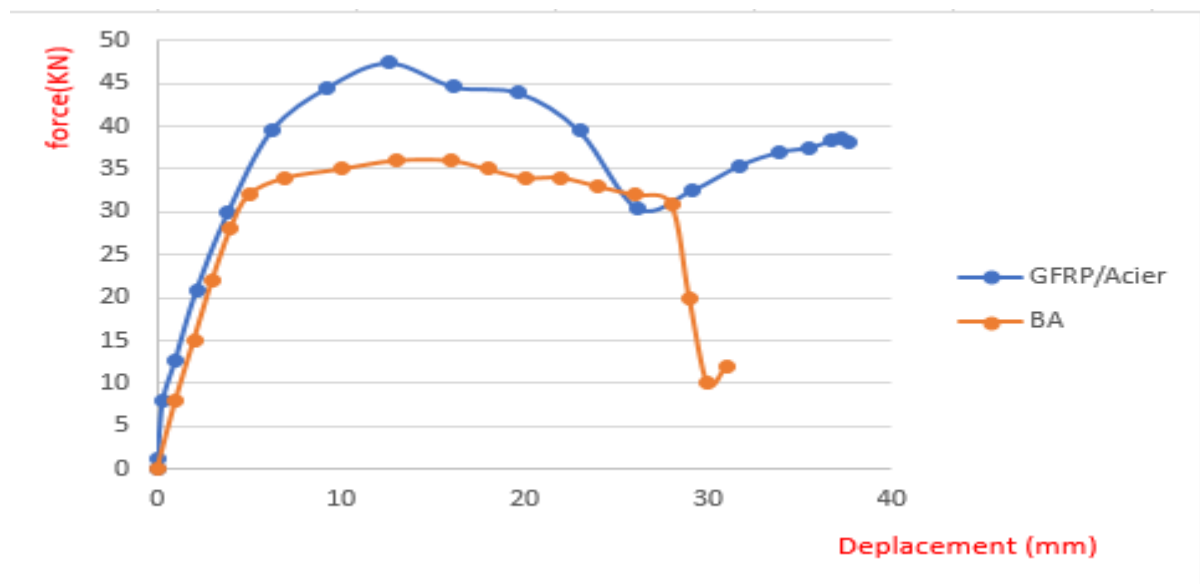


Figure 37 : PE Max principal de la poutre en béton armé par Hybride Acier/CFRP

6.2 Configuration Hybride Acier/GFRP



Courbe : Validation du modèle renforcé par des barres inférieure hybrides acier /GFRP

Rigidité : La rigidité augmente de 28 % à 10 mm de déplacement (45 kN contre 35 kN pour la BA).

Résistance ultime : Elle culmine à 48 kN, ce qui représente une amélioration de 33 %.

Ductilité : Le comportement post-fissuration est hautement sécuritaire : la charge se maintient sur un plateau stable entre 37 et 38 kN jusqu'à un déplacement ultime de 37 mm.

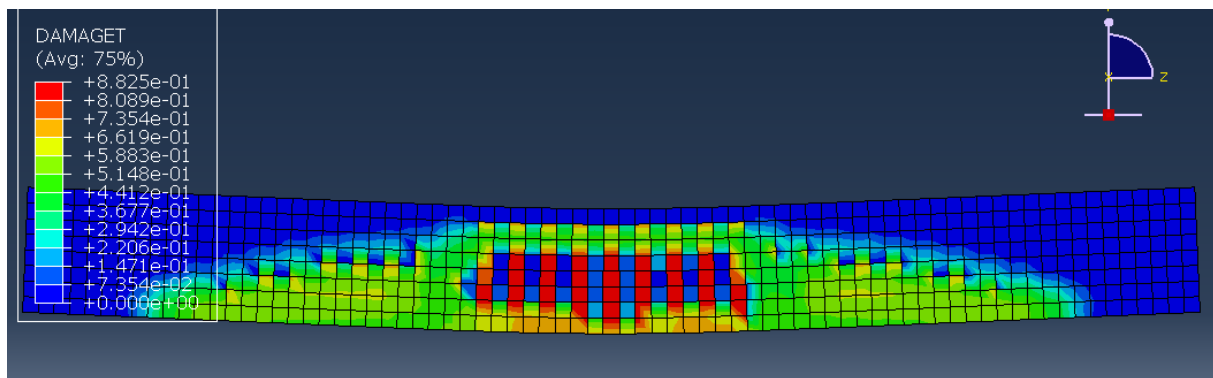


Figure 38: dommages dus à la traction de la poutre en béton armé par Hybride Acier/GFRP

Le modèle renforcé par des armatures hybrides acier/GFRP présente une concentration de l'endommagement dans la zone centrale soumise aux efforts de flexion maximaux. L'utilisation des barres hybrides permet d'améliorer la capacité portante et de contrôler la fissuration du béton.

La propagation des fissures semble légèrement plus étendue que dans le cas hybride acier/CFRP, ce qui est cohérent avec le module d'élasticité plus faible du GFRP.

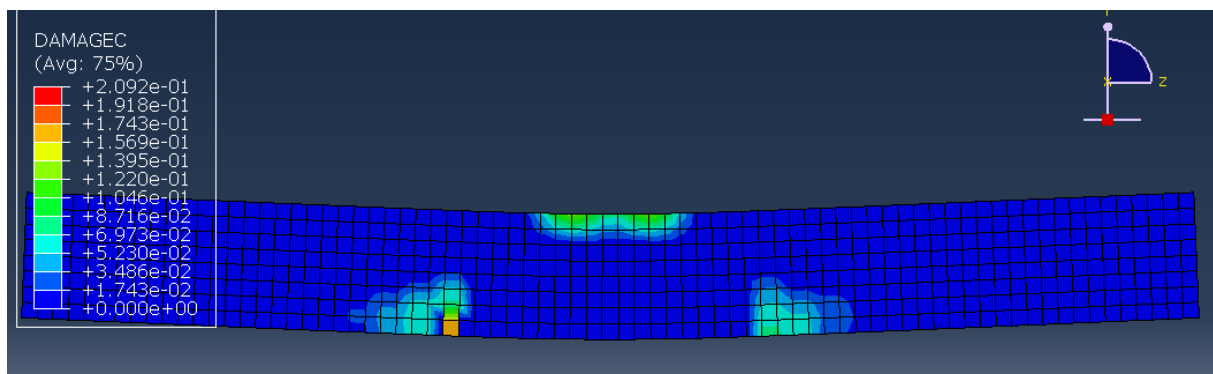


Figure 39 : dommages dus à la traction de la poutre en béton armé par Hybride Acier/GFRP

Tableau 3.1 : synthèse comparatif des performances structurales:

Type de poutre	Rigidité	Résistance maximale	Ductilité / capacité de déformation	Comportement général
Béton Arme BA	Rigidité de référence	$\approx 36 \text{ kN}$	Déplacement ultime $\approx 32 \text{ mm}$	Comportement ductile acceptable mais avec une chute brutale après le pic de charge
CFRP	Augmentation d'environ 26 % par rapport à BA	$\approx 48 \text{ kN (+33 \%)}$	$\approx 37 \text{ mm (+15 \%)}$	Très bon comportement mécanique, meilleure stabilité après fissuration
GFRP	Rigidité plus faible que BA ($\approx -41 \%$)	$\approx 35 \text{ kN (-3 \%)}$	$\approx 37 \text{ mm (+15 \%)}$	Bonne capacité de déformation mais rigidité réduite
CFRP / Acier (Hybride)	Augmentation d'environ 54 %	$\approx 55 \text{ kN (+53 \%)}$	$\approx 37 \text{ mm (+15 \%)}$	Meilleure performance globale, excellente stabilité et forte capacité portante
GFRP / Acier (Hybride)	Augmentation d'environ 28 %	$\approx 48 \text{ kN (+33 \%)}$	$\approx 34 \text{ mm (+14 \%)}$	Bon compromis entre résistance, ductilité et durabilité

Discussion scientifique comparative avec les travaux publiés

Les résultats obtenus dans cette étude sont globalement cohérents avec les travaux expérimentaux et numériques publiés dans la littérature concernant le renforcement des poutres en béton armé par matériaux composites FRP.

Concernant les poutres renforcées par CFRP, plusieurs chercheurs ont montré que l'utilisation des composites à fibres de carbone permet une amélioration significative de la capacité portante, de la rigidité ainsi que du comportement post-fissuration des poutres en béton armé. Les travaux de Li et al. ont montré que le renforcement par CFRP augmente considérablement la charge ultime et limite la propagation des fissures de flexion.

Dans notre étude numérique, la poutre renforcée par des barres CFRP présente une augmentation de la charge maximale d'environ 33 % par rapport à la poutre de référence en béton armé. Cette amélioration reste en bon accord avec les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature, où les gains de résistance observés varient généralement entre 25 % et 45 % selon le type de renforcement, le taux d'armature et les conditions d'adhérence béton-composite.

Les simulations réalisées sous ABAQUS montrent également une augmentation importante de la rigidité initiale des poutres renforcées par CFRP. Ce comportement a également été observé dans plusieurs études expérimentales qui confirment que le module d'élasticité élevé des fibres de carbone permet de limiter les déformations et de réduire l'ouverture des fissures.

Cependant, malgré l'amélioration de la résistance mécanique, plusieurs auteurs soulignent que les matériaux CFRP conservent un comportement fragile sans phase plastique importante. La rupture se produit généralement de manière brutale par rupture du composite ou par décollement interfacial béton-FRP.

Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus dans notre étude, où les zones fortement endommagées restent concentrées dans la région centrale de la poutre soumise au moment fléchissant maximal. Le modèle numérique montre également que les efforts de traction sont progressivement transférés du béton fissuré vers les armatures CFRP.

Concernant les poutres renforcées par GFRP, les résultats obtenus montrent une rigidité plus faible que celle observée pour les poutres renforcées par CFRP. Ce comportement est principalement lié au module d'élasticité inférieur des fibres de verre. Toutefois, les poutres GFRP présentent une capacité de déformation plus importante ainsi qu'un comportement post-fissuration plus stable. Des observations similaires ont été rapportées dans plusieurs travaux expérimentaux consacrés aux composites GFRP.

Les configurations hybrides acier/CFRP étudiées dans ce travail présentent les meilleures performances globales. L'association entre la ductilité de l'acier et la forte résistance des composites CFRP permet d'obtenir une augmentation importante de la capacité portante tout en maintenant une bonne stabilité structurale après fissuration. Ce comportement hybride a également été signalé dans plusieurs études numériques et expérimentales portant sur les structures renforcées par composites FRP.

Par ailleurs, la bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux confirme la capacité du modèle éléments finis sous ABAQUS à reproduire correctement le comportement mécanique des poutres renforcées. Des conclusions similaires ont été obtenues dans plusieurs études utilisant les modèles non linéaires de type Concrete Damaged Plasticity (CDP) pour la simulation des structures renforcées par composites FRP.

Néanmoins, certaines différences entre les résultats numériques et expérimentaux peuvent être attribuées aux hypothèses simplificatrices adoptées dans la modélisation, notamment l'hypothèse d'adhérence parfaite entre le béton et les matériaux composites. En réalité, plusieurs études montrent que le décollement interfacial constitue l'un des principaux modes de rupture des structures renforcées par FRP

Conclusion générale

Dans cette étude, plusieurs configurations d'armatures ont été analysées afin d'évaluer l'influence des matériaux composites sur le comportement mécanique des poutres en béton armé. Les armatures traditionnelles en acier ont été remplacées totalement ou partiellement par des barres en fibre de carbone (CFRP) et en fibre de verre (GFRP), tout en conservant les mêmes dimensions géométriques et le même diamètre des armatures.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des matériaux composites améliore globalement les performances structurales des poutres. Les poutres renforcées par des barres CFRP présentent les meilleures performances en termes de rigidité et de résistance mécanique grâce à la très grande résistance à la traction des fibres de carbone. La poutre CFRP/Acier a donné les résultats les plus élevés avec une augmentation de rigidité d'environ 54 % et une amélioration de la résistance ultime de l'ordre de 53 % par rapport à la poutre de référence armée uniquement en acier.

Les poutres renforcées par des barres GFRP ont également montré un comportement satisfaisant, notamment au niveau de la capacité de déformation et de la durabilité. Cependant, leur rigidité reste inférieure à celle des poutres armées en acier en raison du module d'élasticité plus faible des fibres de verre.

Concernant la ductilité, toutes les poutres renforcées par des matériaux composites ont présenté une meilleure capacité de déformation avant la rupture, avec une amélioration moyenne d'environ 15 % du déplacement ultime. De plus, les courbes charge-déplacement montrent un comportement post-fissuration plus stable pour les poutres hybrides, contrairement à la poutre BA qui présente une chute brutale de la charge après le pic de résistance.

Globalement, cette étude confirme que les barres composites CFRP et GFRP constituent une alternative prometteuse aux armatures traditionnelles en acier, particulièrement dans les structures nécessitant une haute résistance mécanique, une bonne durabilité et une excellente résistance à la corrosion. Parmi toutes les configurations étudiées, la combinaison hybride CFRP/Acier apparaît comme la solution la plus performante pour améliorer le comportement structural des poutres en béton armé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **J.M. Berthelot (2005)**, « *Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures* » Edition. Lavoisier, ISBN: 2-7430-0771-0. pp 72
- [2] **ACI Committee 544. (1988)** “*Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 5, pp. 563-580.
- [3] **ZIDANI M’hamed Berrezoug (2016)** ; *Simulation Par elements Finis Des Poutres En Béton Arme Renforcées Par Des Plaques FRP* ; Thèse de doctorat l’université de SIDI BEL ABBES
- [4] **M. ADAM M. NEVILLE (2000)**, “*propriétés des bétons* ”, Eyrolles, Paris, (septembre2000).
- [5] **M. Joseph ABSI et M. Nicolas TESSIER-DOYEN (2009)** ; *Influence de l’endommagement sur les propriétés d’élasticité de matériaux modelés : approche numérique et expérimentale* ; Thèse de doctorat de l’université de LIMOGES
- [6] **T. Hassaine Daouadji (2013)** : “*analytical analysis of the interfacial stress in damaged reinforced concrete beams strengthened by bonded composite plates*” Strength of Materials, Vol. 45, No. 5, September.
- [7] **A.A. Griffith (1921)**, *The phenomenon of rupture and flow in solids*, Philosophical Transactions of the Royal Society (London), A221 (1921)163
- [8] **M. Boulal, S. Barouki et I. Moukadem, (2001)** “*Endommagement de béton comparaison entre deux modèles*”, Mémoire de Master de l’université Africain d'Adrar
- [9] **Nisitani T., Teranishi T., Seimoto, A., Fukuyama, K. (2000)**, « *The versatility of the method of KI , KII analysis by FEM based on ths stress value at a crack tip* », Fracture and strength of solids, vol 183-187, pp 553-558.
- [10] **Abdelhakim BEDDIAR (2004)** ; *Renforcement des poutres en béton arme à l’aide dematériaux composites* ; Mémoire de Magister de l’université de BISKRA
- [11] **KHERBOUCHE LAAZIZ (2010)** ; *Introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites*. Mémoire de Magister de l’université de BISKRA.
- [12] **Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. (2002)**. “*FRP rengthened structures*”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245p.
- [13] **M. Mosbah (2017)** ; *Redistribution des efforts dans les poutres hyperstatiques soumises aux charges statiques concentrées* ; Mémoire de Master de l’université de Oum El Bouaghi
- [14] **Drouna Karima (2002)** *évaluation des performances parasismiques des portiques en B.A renforces par chemisages en béton armée et par bandage en CFRP*, Mémoire de Magister de l’université de Constantine ,146 page
- [15] **Liang Huang, Chen Zhang, Libo Yan, Bohumil Kasal (2018)**: *Flexural behavior*
- [16] **BENMILOUD Meriam (2001)** ; *application de la mécanique de rupture sur le comportement des poutres en béton armé renforcées par collage des plaque d’acier* ; Mémoire d’ingénieur d’état de l’université de LAGHOUAT
- [17] **Mahboub Lotfi Moulessechool Sid Ahmed (2003)**, *étude des systèmes de contreventements des structures en béton armée par matériaux composites*, Mémoire deMaster en Civil Spécialité : ingénieries des structures ; 113pages
- [18] **Carolín, A. (2003)**. “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, 178 p.
- [19] **RPA, (2003)**. “*REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA 99 / VERSION 2003*”

- [20] Tripi J.M., Bakis C.E., Roothby T.E., Nanni A (2001). « *Deformation in concrete with external CFRP sheet reinforcement* » ASCE, J.Comp. for constr 103(7):1461-1476
- [21] McKenna J.K., Erki M.A (1994). « *Strengthening of R.C. flexural members using externally applied steel plates and fibre composite sheets* » Canadian journal of civil engineering, feb.1994, pp.16-23
- [22] Charif A (1983).. « *Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates* ».P.h.D thesis. Sheffield Univ.
- [23] Al-Sulaimani G.J., Sharif A., Basunbul I.A., Baluch M.H., Ghaleb B.N. (1994) « *Shear repair for R.C by fibre glass plate bonding* » ACI structural journal, July- Aug. 1994 pp. 458-461.
- [24] Raouf M., El-Rimaoui J.A., Hassanen M.A.H, (2000) « *Theoretical and experimental study on externally plated R.C. beams* », Engineering structures, Vol. 22, 2000, pp.85-101
- [25] Hussain M., Sharif A., Basunbul I.A., Baluch M.H., Al-Sulaimani G.J. (1995). « *Flexural behaviour of precracked RC beams strengthened externally by steel plates* » ACI structural journal, 1995, pp.14-22
- [26] Mayo R., Nanni A., Gold W., Baker M. (1999) « *strengthening of bridge G270 with externally-bonded CFRP reinforcement* » ACI SP-188, Proc., 4th international symposium on FRP for reinforcement of concrete structures (CFPRCS 4), Baltimore, MD, Nov.1999,pp.429-440
- [27] AOYAMA H., OTANI S., KITAYAMA K (1988), « *Design criteria for reinforced Interior Beam-Column Connections* », Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. IV, Tokyo, 1988, p.615-620
- [28] Drouna Karima (2012), *évaluation des performances parasismiques des portiques en B.A renforcés par chemisages en béton armé et par bandage en CFRP*, Mémoire de Magistères de l'université de Constantine, 146 pages
- [29] Brown et al, (1977) « *shear requirements for load reversals on RC members* », journal of structural division, 103(7):1461-1476, 1977
- [30] DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE , **Comportement et modélisation des connecteurs dans une structure mixte (acier-béton)** par TABET-DERRAZ Moulay Idriss
- [31] **Efficacité du renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites** page 3.
- [32] Bertero et al, (1983) « *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitation* », University of California, rapport no UCB/EFRC-83/23 of the national Science foundation, 1983.
- [33] B. Hu, et al. (2019), *Experimental and theoretical investigation on the hybrid CFRPECC flexural strengthening of RC beams with corroded longitudinal reinforcement* Engineering Structures 200 109717
- [34] Lynda CHERIFI, (2014) « *Influence de la disposition du renforcement en matériau composite dans les zones nodales d'un portique étagé en béton armé* », Mémoire de Master de l'université de Tizi Ouzou, Pages 83
- [35] Mahboub Lotfi Mr Moulessechool Sid Ahmed ; (2009), *étude des systèmes de contreventements des structures en béton armé par matériaux composites*, Mémoire de Master : ingénieries des structures ; 113 pages
- [36] Aboutaha, R.S., Engelhardt, M.D., Jirsa, J.O., and Kreger, M.E (1996). « *Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets.* » ACI Structural J., 96(1),

- [37] **Nekmouche A, Kezmane A, ChérifiL, Boukais S (2014)** « Simulation numérique d'un portique en béton armé renforcé par collage des plaques composites » *CMMS14* Le 13-14 novembre 2014.999
- [38] **M. BOUMAAZA S. et al. (2015)** « *Réhabilitation des Poutres en Béton Arme Rompues au Cisaillement à l'aide des Matériaux Composites* » 22ème Congrès Français de Mécanique Lyon.
- [39] **Steiner, W. (1996)** "Strengthening of structures with FRP strips" In: EI-Badry, M.M. (Ed.), *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, pp. 407-417.
- [40] **Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. (2002)** "*FRP strengthened RC structures*", John Wiley& Sons, Ltd, Chichester, UK, 245 p. [41] **Mukhopadhyaya, P., Swamy, N., et Lynsdale, C. (1998)** "*Optimizing structural response of beams strengthened with GFRP plates*", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 2, pp. 87-95
- [42] **Sun C. T. and Jianxin Tao, (1998)**, *Prediction of failure envelopes and stress/strain behaviour of composite laminates*, *Composites Science and Technology*, Volume 58, Issue 7, July 1998, Pages 1125-1136
- [43] **M. DAVID, E (1999).**, *Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composite, étude expérimentale et modélisation*, Thèses de Doctorat, Spécialité génie civil, Université d'Artois, FranceArtois, France
- [44] **Malek A.M., Saadatwonesh H. and Ehserin M.R (1998)**, « *Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plates due to stress-concentration at the plate end* » *ACI Structural journal*, Mar.-Apr., , pp 142-15
- [45] **Philippe LAMOTHE (1999)** « *essais de renforcement avec des matériaux composites pour des poutres de pont en béton armé* » thèse doctorat université de SHARBROOKE 1999.

ANNEXES

Annexe 1



Maperod C Maperod G



Pultruded carbon fibre or glass fibre bars for repairing and structural strengthening damaged concrete, wooden and masonry elements.
Maperod C: high tensile bars pre-impregnated with epoxy resin.
Maperod G: deformed bars pre-impregnated with epoxy-modified vinylester

WHERE TO USE

Repairs and structural strengthening for reinforced concrete, brickwork, stone, wooden and tuff elements damaged by physical-mechanical stress or natural causes.

Maperod C and **Maperod G** are used in combination with fabrics from the **MapeWrap** range to improve anchorage, especially when interventions are carried out to increase flexural and shear strength (for concrete, masonry and wood).

Some application examples

- Upgrading seismic performance of structures in high-risk zones.
- Setting terminal anchors and anti-delamination connectors in composite systems.
- Studding and micro-stitching.
- As a valid substitute for metal through tie-rods in masonry for reinforced structural strengthening (reinforced stitching method).
- Reducing deformation under service loads (increase in stiffness).
- Increasing load-bearing capacity (e.g. re-qualifying structures due to change in final use).
- Increasing fatigue strength.
- Increasing overall durability of the intervention.

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Maperod C is a range of deformed, pultruded carbon fibre bars in an epoxy matrix with a peel-ply film, characterised by their high tensile strength. **Maperod C** is a valid alternative to metal bars.

The bars in the **Maperod C** range are 10 mm in diameter and have a modulus of elasticity of 155 GPa.

Maperod G is a range of deformed, pultruded glass fibre bars in an epoxy-modified vinylester matrix, characterised by their high tensile strength.

The bars in the **Maperod G** range are 10 mm in diameter and have a modulus of elasticity of 40.8 GPa.

Thanks to their composition and production process, which guarantees constant properties throughout the bars, **MapeWrap C** and **MapeWrap G** have the following characteristics:

- high tensile strength;
- lightweight;
- modulus of elasticity compatible with and suitable for the requirements of concrete and other materials used in constructions;
- easy to apply.

ADVANTAGES

Unlike interventions using traditional methods, thanks to their extremely low weight, products from the **Maperod** range may be applied extremely quickly without using special handling or lifting equipment, and often without interrupting the use of structures.



Annexe 1

Maperod C
Maperod G

TECHNICAL DATA (typical values)		
PRODUCT IDENTITY		
	Maperod C	Maperod G
Matrix:	epoxy resin	epoxy-modified vinylester
Appearance:	solid, round structural element	
Colour:	black	white
PRODUCT CHARACTERISTICS		
	Maperod C	Maperod G
Density (g/cm ³):	1.54	1.995
Fibre content (%):	71	75
Cross-section area (mm ²):	73.9	71.26
Nominal diameter (mm):	9.7	9.53
FINAL PERFORMANCE		
Tensile strength (N/mm ²):	2,000	760
Modulus of elasticity (N/mm ²):	155,000	40,800
Elongation at failure (%):	1.5	2
Shear strength (MPa):	75	15
Coefficient of longitudinal thermal expansion (m/m/°C):	6 -10 x 10 ⁻⁶	6-10 x 10 ⁻⁶
Coefficient of transversal thermal expansion (m/m/°C):	–	21-23 x 10 ⁻⁶

Compared with the cladding technique using metal plates (*béton plaqué*), **Maperod** does not require temporary supports during application and there is no risk of corrosion of the strengthening materials applied. Compared with cladding using fabric impregnated directly on site, bars from the **Maperod** range may be applied very quickly and the quality of the installation is less dependent on the experience and skill of the workers.

RECOMMENDATIONS

- Before bonding, make sure the tensile strength of the substrate is sufficient.
- Do not apply **Maperod** on substrates which are not fully cured.
- On particularly absorbent substrates or on concrete in areas with a high level of R.H. (underpasses, underground rooms, cellars, etc.), we recommend priming the substrates with a coat of **MapeWrap Primer 1** before bonding **Maperod** (see relative technical data sheet for preparation and application instructions). Application of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**, or as on alternative **Mapefix EP** must be carried out while the **MapeWrap Primer 1** is still "fresh".

For applications on wooden substrates, we recommend using an epoxy adhesive from the **Mapewood** range.

APPLICATION PROCEDURE

1. Application phases.
2. Drilling the holes.
3. Preparation of **MapeWrap Primer 1**.
4. Application of **MapeWrap Primer 1**.
5. Preparation of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**, **Mapefix EP**.
6. Application of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**, **Mapefix EP**.
7. Inserting the **Maperod** bars.

1. Drilling the holes

Preparation of masonry

Drill a series of holes slightly larger than the diameter of the bar in the face of the wall. The depth of the holes must be calculated by a design engineer according to the tensile requirements of the bar. Pour an epoxy binder-based product into the holes and insert the bars to the depth required until the epoxy product comes out of the holes.

Maperod C is particularly recommended as a structural strengthening system for wood. Use a product with an epoxy-based binder in such cases, as it is more compatible with wooden substrates.

Preparation of concrete

Drill a series of holes around 1.5 times the diameter of the bar in the concrete. The depth of the holes must be calculated by a design engineer according to the tensile requirements of the bar. Pour the resin into

Annexe 1

the holes and then insert the **Maperod C/ Maperod G** bars to the bottom of the holes so that the epoxy resin is squeezed out. Remove all traces of dust and loose material from inside the holes with compressed air.

2. Preparation of MapeWrap Primer 1

The two components which make up **MapeWrap Primer 1** must be mixed together. Pour component B into component A and mix with a low-speed drill with a mixing attachment until the resin is completely blended. Mixing ratio: 3 parts by weight of component A with 1 part by weight of component B. To avoid dosage errors, use the entire contents of the two components. If only partial quantities are required, use high-precision electronic scales to weigh out the components (this procedure must also be adopted for the other products). Once prepared, the workability time of **MapeWrap Primer 1** is approx. 90 minutes at +23°C.

3. Application of MapeWrap Primer 1

After drilling and preparing the holes, apply the **MapeWrap Primer 1** inside the holes using a bottle brush.

If the surface is particularly absorbent, apply a second coat of **MapeWrap Primer 1** once the first coat has been completely absorbed. Then apply **MapeWrap 11**, **MapeWrap 12** or **Mapefix EP** while the product underneath is still "fresh".

4. Preparation of MapeWrap 11, MapeWrap 12 and Mapefix EP

MapeWrap 11 or MapeWrap 12

MapeWrap 11 or **MapeWrap 12** must be chosen according to the surrounding temperature and workability time (**MapeWrap 12** has a higher workability time than **MapeWrap 11**).

Pour component B into component A and mix with a low-speed drill with a mixing attachment until they form an even, grey paste.

Mixing ratio for both products: 3 parts by weight of component A with 1 part by weight of component B. At +23°C, **MapeWrap 11** remains workable for around 40 minutes after mixing, while **MapeWrap 12** remains workable for around 60 minutes.

Mapefix EP

Mapefix EP is a two-component product supplied in bi-axial 385 ml cartridges and comprises two separate components, A (resin) and B (catalyser). They are mixed together during extrusion from the cartridge through a static mixer supplied with the product. This product may be applied at +5°C to +40°C.

5. Application of MapeWrap 11 or MapeWrap 12 and Mapefix EP

Completely fill the holes previously treated with **MapeWrap Primer 1** while it is still "fresh". Apply **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** in the holes using an empty sealant cartridge filled with product and an extrusion gun, and **Mapefix EP** through the static mixer supplied with the product using an extrusion gun.

6. Inserting the Maperod bars

Maperod C and **Maperod G** are supplied in lengths of 2 meters and 6 metres respectively, and are cut to length on site using a diamond cutting disk. Insert the **Maperod** bars while applying a constant pressure along their entire length. Remove excess resin with a trowel, taking care not to move the bars.

When applied on curved elements, the bars must be held in position with clamps or stays until the resin has completely hardened (24 hours is usually enough before the clamps or stays can be removed).

PRECAUTIONS TO BE TAKEN DURING AND AFTER APPLICATION

- The temperature during application must be at least +5°C and the structure must be protected from rain and dust carried by the wind.
- After completing application, make sure the treated surface is kept at a temperature of at least +5°C until the products are completely cured.
- Protect the surface from rain for at least 24 hours if the temperature does not drop below +15°C, or for at least 3 days if the temperature is lower.

Cleaning

MapeWrap 11 and **MapeWrap 12** form a strong bond, including on metal. Cleaning tools with solvent (such as ethanol, toluene, etc.) before they harden is recommended.

PACKAGING

Maperod C and **Maperod G** are supplied in boxes of 10x2 metre lengths and 10x6 metre lengths respectively.

Maperod C and **Maperod G** are supplied in 10 mm diameter lengths.

STORAGE

Store in a covered, dry area.

PRECAUTIONS TO BE TAKEN WHEN HANDLING THE PRODUCTS

All workers must wear waterproof rubber gloves, goggles and protective clothing when preparing and applying the bars and epoxy systems (**MapeWrap 11**, **MapeWrap 12** and **Mapefix EP**). Avoid contact with the eyes or skin. If they come into contact with the skin, wash off with plenty of soap and water. If they come into contact with the eyes, wash with plenty of clean water and seek medical attention.

If the products are applied in closed environments, make sure they are well ventilated to guarantee a continuous circulation of fresh air.

For further and complete information about the safe use of our product please refer to our latest version of the Material Safety Data Sheet.

PRODUCT FOR PROFESSIONAL USE.

WARNING

Although the technical details and recommendations contained in this product

Maperod C
Maperod G

Annexe 1

data sheet correspond to the best of our knowledge and experience, all the above information must, in every case, be taken as merely indicative and subject to confirmation after long-term practical application: for this reason, anyone who intends to use the product must ensure beforehand that it is suitable for the envisaged application: in every case, the user alone is fully responsible for any consequences deriving from the use of the product.

Please refer to the current version of the Technical Data Sheet, available from our website www.mapei.com

**All relevant references
for the product are available
upon request and from
www.mapei.com**

(GB) A.G. BETA

Any reproduction of texts, photos and illustrations published
here is prohibited and subject to prosecution

1015/1016 - 1-2013



BUILDING THE FUTURE

Annexe 2



DOMAINE D'APPLICATION

Le système est préconisé pour réparer des éléments en béton armé dégradé par des actions physico- mécaniques, contenir le flambage des éléments en béton (compression et flexion), renforcer des éléments porteurs et la mise en conformité sismique des structures dans les zones à risque.

Quelques exemples d'application

- Réparer, mettre en conformité sismique des structures dégradées nécessitant l'intégration d'une section résistante à la traction et au cisaillement.
- Contenir le flambage d'éléments en béton (poutres, piles de ponts, cheminées) afin d'en améliorer la capacité portante ou la ductilité.
- Réparation et mise en conformité sismique des structures voûtées sans augmentation des masses sismiques et sans danger de percolation des liquides au niveau de l'intrados.
- Réparation des structures endommagées par l'incendie.
- Renfort d'éléments porteurs d'édifices dont la structure est modifiée par de nouvelles contraintes.
- Mise en conformité sismique de bâtiments industriels en béton.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

MapeWrap C UNI-AX est un tissu en fibres de carbone unidirectionnel, caractérisé par un haut module élastique et une résistance à la traction élevée ($252.000 \pm 2 \% \text{ N/mm}^2$).

La mise en œuvre du **MapeWrap C UNI-AX** se fait par imprégnation et marouflage à l'aide d'une gamme complète de résines époxy composée de :

- **MapeWrap Primer 1**, primaire époxy pour la consolidation du support.
- **MapeWrap 11** et **MapeWrap 12**, ragréages époxy pour la régularisation d'éventuelles imperfections ou de la porosité du support (**MapeWrap 12** possède un temps ouvert plus long que **MapeWrap 11**).
- **MapeWrap 31**, résine époxy destinée à l'imprégnation par marouflage des tissus **MapeWrap**.

Afin de satisfaire les plus larges exigences, **MapeWrap C UNI-AX** est fourni en deux grammages différents et en plusieurs largeurs (10, 20 et 40 cm) :

- **MapeWrap C UNI-AX 300** (300 g/m²).
- **MapeWrap C UNI-AX 600** (600 g/m²).

AVANTAGES

Par rapport à d'autres techniques de renforcement de structures, le procédé **MapeWrap** se caractérise par :

- une mise en œuvre aisée (les tissus sont particulièrement légers par rapport à l'acier, ils s'adaptent à n'importe quelle forme de l'élément à traiter et leur mise en place se fait sans système de serrage ou de maintien) ;
- un faible poids propre (pas de surcharge de l'existant) ;
- aucun risque de corrosion ;
- une inertie chimique qui permet de réaliser des renforcements d'ouvrages situés en atmosphère agressive.

INDICATIONS IMPORTANTES

Annexe 2

- Vérifier avant de procéder au collage, que le support en béton possède une résistance à la traction supérieure à 1,5 MPa.
- Ne pas utiliser **MapeWrap** sur un béton frais.
- Doter les utilisateurs de gants, de masques pour solvants et de lunettes de protection.

MODE D'EMPLOI

Préparation du support

La surface sur laquelle doivent être appliqués les tissus **MapeWrap C UNI-AX** doit être parfaitement propre, sèche et résistante mécaniquement.

Éliminer, par tout moyen mécanique adapté, tous résidus d'huile de décoffrage, de vernis, de peinture ou de laitance de ciment.

Éliminer toutes les parties de béton endommagé, manuellement ou par hydroscarification.

Décaper les armatures à fer blanc en ayant soin d'éliminer toute trace de rouille puis les traiter avec **Mapefer** ou **Mapefer 1K**, mortiers anti-corrosion. Pour l'application du produit, se reporter aux prescriptions de la fiche technique.

Réparer les surfaces en béton avec les produits de la gamme **Mapegrout** ou **Planitop**.

Attendre minimum trois semaines avant de procéder à la mise en œuvre de **MapeWrap C UNI-AX**.

Dans le cas où l'intervention de renforcement doit être effectuée immédiatement, utiliser **Adesilex PG1** (ou **Adesilex PG2**) ou **MapeWrap 11** (ou **MapeWrap 12**) pour la réparation.

Traiter les fissures éventuelles par injection, avec **Epojet**.

Tous les angles saillants présents dans les éléments en béton (exemple : poutres et piliers) à traiter avec **MapeWrap C UNI-AX** doivent être arrondis à l'aide d'un outil adapté (le rayon de courbure doit être supérieur ou égal à 2 cm). Dans les angles rentrants, créer une gorge de rayon de courbure au moins égal à 2 cm.

Pose de MapeWrap C UNI-AX

1. Préparation de MapeWrap Primer 1

Mélanger les deux composants de **MapeWrap Primer 1**.

Verser le composant B dans le composant A et mélanger avec un malaxeur électrique à vitesse lente jusqu'à obtention d'une résine fluide et homogène.

Rapport du mélange : 3 volumes de composant A et 1 volume de composant B.

Afin d'éviter toute erreur de dosage, il est conseillé de mélanger et d'utiliser la totalité du conditionnement. Dans le cas de fractionnement du produit, utiliser une balance de précision (cette précaution devra être adoptée pour tous les produits ci-après). Une fois mélangé, **MapeWrap Primer 1** est utilisable pendant 90 minutes à + 23°C.

2. Application de MapeWrap Primer 1

Appliquer une passe de **MapeWrap Primer 1** à la brosse ou rouleau, sur le béton propre et sec. Dans le cas de support très absorbant, appliquer une seconde passe après absorption complète de la précédente. Effectuer ensuite, si cela est nécessaire, le ragréage avec **MapeWrap 11** (ou **MapeWrap 12**) sur **MapeWrap Primer 1** encore frais (environ 30 minutes à + 20°C après son application).

3. Préparation de MapeWrap 11 ou MapeWrap 12

Le choix entre les deux produits se fait en fonction de la température et du délai d'utilisation. **MapeWrap 12** possède un délai d'utilisation plus long que **MapeWrap 11**.

Verser le composant B dans le composant A.

Mélanger avec un malaxeur à vitesse lente, jusqu'à obtention d'un mélange gris clair uniforme.

Rapport de mélange : 3 volumes de composant A et 1 volume de composant B. Une fois mélangé, **MapeWrap 11** est utilisable pendant environ 40 minutes, et **MapeWrap 12** pendant environ 60 minutes (à + 23°C).

4. Application de MapeWrap 11 ou MapeWrap 12

Sur le béton préalablement traité avec **MapeWrap Primer 1**, appliquer à l'aide d'une spatule crantée, une passe de **MapeWrap 11** ou **MapeWrap 12** en épaisseur d'environ 1 mm. Lisser la surface afin d'uniformiser complètement le support et d'éliminer les irrégularités. Remplir ou arrondir les angles avec le même produit de façon à créer un chanfrein dont le rayon de courbure doit être supérieur ou égal à 2 cm.

5. Préparation de MapeWrap 31

Verser le composant B dans le composant A et mélanger avec un malaxeur électrique à vitesse lente, jusqu'à obtention d'un mélange de couleur jaune homogène.

Rapport de mélange : 4 volumes de composant A et 1 volume de composant B. Le produit est utilisable pendant environ 40 minutes à + 23°C.

6. Application de la première passe de MapeWrap 31

Appliquer uniformément, à la brosse ou au rouleau à poils courts, une première passe de **MapeWrap 31** d'environ 0,5 mm d'épaisseur sur **MapeWrap Primer 1** encore frais.

Dans le cas où la surface a été régularisée avec **MapeWrap 11** ou **MapeWrap 12**, appliquer **MapeWrap 31** sur **MapeWrap 11** ou **MapeWrap 12** encore frais.

7. Mise en œuvre de MapeWrap C UNI-AX

Sur la couche de **MapeWrap 31** encore fraîche, afficher immédiatement le tissu en ayant soin de l'appliquer sans faire de plis. Après l'avoir bien marouflé avec les mains protégées par des gants de caoutchouc imperméables, appliquer sur le tissu **MapeWrap C UNI AX** une seconde passe de **MapeWrap 31** et le presser plusieurs fois en utilisant un rouleau en caoutchouc rigide pour permettre à l'adhésif de pénétrer complètement à travers les fibres du tissu. Afin d'éliminer les bulles d'air éventuelles, repasser sur le tissu imprégné un rouleau en aluminium à vis sans fin.

Une fois posé et marouflé au rouleau, le tissu **MapeWrap C UNI-AX** ne doit plus être bougé.

8. Application de plusieurs couches de MapeWrap C UNI-AX

Appliquer une nouvelle passe de **MapeWrap 31** puis maroufler la nouvelle bande de tissu dans la colle encore fraîche.

Après avoir bien marouflé, appliquer une deuxième couche de **MapeWrap 31**.



Annexe 2

N.B : Dans le cas où plusieurs couches de tissu sont posées après 24 heures, il est impératif de poncer la passe précédente déjà durcie.

Nettoyage

Les systèmes époxy possèdent un pouvoir d'adhérence élevée. C'est pourquoi il est conseillé de nettoyer les outils à l'aide de solvants (acétone par exemple) avant leur durcissement.

REVÊTEMENTS DE PROTECTION

La protection peut être réalisée avec **Mapelastic** mortier base ciment bi-composant élastique ou avec **Elastocolor**, peinture acrylique élastique (pour l'application consulter la fiche technique des produits concernés), après durcissement complet des résines époxy (1 à 2 jours à + 23°C).

Les produits sus-mentionnés créent une barrière efficace contre les rayons ultra violets. Leur utilisation est particulièrement conseillée lorsque les structures sont exposées aux rayons solaires.

Dans le cas où une protection au feu est nécessaire, il convient de protéger le **MapeWrap C UNI-AX** par un produit isolant bénéficiant d'un PV d'essai d'un laboratoire agréé et permettant de garantir que la température de l'interface de collage reste inférieure à la température de transition vitreuse de **MapeWrap 31**, soit + 63°C.



Préparation du support



Application de MapeWrap Primer 1



Ratissage éventuel avec MapeWrap 11 ou MapeWrap 12



Imprégnation manuelle de MapeWrap C



Imprégnation manuelle de MapeWrap C



Application de MapeWrap C Uni-AX



Application de la première passe de MapeWrap 31



Renforcement d'un poteau et d'une poutre



Renforcement d'un nœud poteau/poutre

Annexe 2



Application de la seconde passe de MapeWrap 31



Recouvrement avec Elastocolor Peinture



Rouleaux de MapeWrap C Uni-AX

CONSOMMATION INDICATIVE DES SYSTÈMES ÉPOXY

Primaïrisation, régularisation et ragréage des surfaces (fonction de la rugosité du support)

	Consommation (g/m ²)
MapeWrap Primer 1	250-300
MapeWrap 11 ou MapeWrap 12	1500-1600

Imprégnation des tissus MapeWrap C UNI-AX

	Grammage (g/m ²)	Consommation (g/m ²)	Hauteur (cm)	Consommation (g/m)
MapeWrap 21	300	1200 à 1300	10	120 à 130
			20	240 à 260
			40	480 à 520
	600	1800 à 1950	10	180 à 195
			20	360 à 390
			40	720 à 780
MapeWrap 31	300	1000 à 1100	10	100 à 110
			20	200 à 220
			40	400 à 440
	600	1500 à 1550	10	150 à 155
			20	300 à 310
			40	600 à 620

CONDITIONNEMENT

Les tissus MapeWrap C UNI-AX sont disponibles en rouleaux de 50 mètres, emballés dans des boîtes en carton portant les dénominations suivantes

	Grammage (g/m ²)	Consommation (g/m ²)	Hauteur (cm)	Consommation (g/m)
MapeWrap 21	300	1200 à 1300	10	120 à 130
			20	240 à 260
			40	480 à 520
	600	1800 à 1950	10	180 à 195
			20	360 à 390
			40	720 à 780
MapeWrap 31	300	1000 à 1100	10	100 à 110
			20	200 à 220
			40	400 à 440
	600	1500 à 1550	10	150 à 155
			20	300 à 310
			40	600 à 620

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

- Durant la pose, la température ne doit pas être inférieure à + 5°C.
- La structure doit être protégée contre la pluie et la poussière éventuelle transportée par le vent.
- Après avoir effectué l'intervention maintenir la surface traitée à une température supérieure à + 5°C.
- Protéger contre la pluie pendant 24 heures minimum si la température ne descend pas au-delà de + 15°C, et pendant au moins 3 jours si la température est inférieure à + 15°C.

Annexe 2

INSTRUCTIONS DE SÉCURITÉ POUR LA PRÉPARATION ET LA MISE EN ŒUVRE

Pour les précautions d'emploi, consulter la dernière version de la Fiche de Données de Sécurité (FDS) disponible sur le site Internet www.mapei.com.

PRODUIT RÉSERVÉ À UN USAGE PROFESSIONNEL

PRODOTTO E CONSERVATO IN UN AMBIENTE PROFESSIONALE

DONNÉES TECHNIQUES (valeurs types)		
DONNÉES D'IDENTIFICATION DU PRODUIT		
Type de fibre :	carbone haute résistance	
Aspect :	tissu unidirectionnel	
Grammage (g/m3):	300	600
Masse volumique (g/m3) :	1.800	1.800
Epaisseur de tissu sec (mm) :	0,164	0,331
Surface résistante par unité de largeur (mm²/m) :	164,3	331,3
Résistance mécanique à la traction (N/mm2) :	≥ 4.900	≥ 4.900
Charge maximum par unité de largeur (kN/m) :	> 800	> 1.600
Module élastique à la traction (N/mm2) :	252.000 ± 2 %	252.000 ± 2 %
Allongement à la rupture (%) :	≥ 2	≥ 2
CARACTÉRISTIQUES FINALES		
Adhérence au béton (N/mm²) :	> 3 (rupture du béton)	
CARACTÉRISTIQUES DU TISSU IMPRÉGNÉ AVEC MAPEWRAP 31		
MapeWrap C UNI-AX 300		MapWrap C UNI-AX 600
Résistance mécanique à la traction (MPa)	858	854
Module élastique à la traction (MPa) :	55400	49583
Allongement à la rupture (%) :	1.6	1.7
Epaisseur minimale du tissu (mm) :	0,76	1.72

Annexe 2

AVERTISSEMENT

Les informations et prescriptions de ce document résultent de notre expérience. Les données techniques correspondent à des valeurs d'essais en laboratoire. Les conditions de mise en œuvre sur chantier pouvant varier, il est conseillé à l'utilisateur de vérifier si le produit est bien adapté à l'emploi prévu dans le cadre des normes en vigueur. L'utilisateur sera par conséquent toujours lui-même responsable de l'utilisation du produit. Les indications données dans cette fiche technique ont une portée internationale. En conséquence, il y a lieu de vérifier avant chaque application que les travaux prévus rentrent dans le cadre des règles et des normes en vigueur, dans le pays concerné.

Se référer à la dernière mise à jour de la fiche technique disponible sur le site web www.mapei.com

MENTION LÉGALE

Le contenu de la présente Fiche de données Techniques (FT) peut être reproduit dans un autre document, mais le document qui en résulte ne peut en aucun cas remplacer ou compléter la FT en vigueur au moment de l'application ou de la mise en œuvre du produit MAPEI. La FT la plus récente peut être téléchargée à partir de notre site web www.mapei.com.

MAPEI DÉGAGE TOUTE RESPONSABILITÉ EN CAS DE MODIFICATION DU TEXTE OU DES CONDITIONS D'UTILISATION CONTENUES DANS CETTE FT OU SES DÉRIVÉS.

1002-03-2016 F(FR)

La reproduction intégrale ou partielle des textes, des photos et illustrations de ce document, faite sans l'autorisation de Mapei, est illicite et constitue une contrefaçon.



Annexe 3



WHERE TO USE

This system is particularly recommended for improving bending/compressive capacity, and compressive confinement of masonry or concrete piles and pillars.

It is also suitable for repairing concrete or masonry elements damaged by physical-mechanical actions and to upgrade the seismic capacity of structures in high-risk areas.

Some application examples

- Repairs and static upgrading of unstable or weak structures where the shear and tensile strength need to be supplemented.
- Confining compressed and pre-stressed members (pillars, bridge piles, chimneys, and storage tanks) to improve their load-bearing capacity or ductility.
- Seismic upgrading and restoration work vaulted structures without increasing their seismic mass and without the risk of liquids percolating towards the inner face.
- Strengthening load-bearing members in buildings whose structural system has been modified due to new architectural requirements or changes in use.

TECHNICAL CHARACTERISTICS

MapeWrap G UNI-AX is a unidirectional, glass fibre fabric that can be applied using two different methods:

- "wet application method"
- "dry application method"

using a complete range of epoxy resin products, consisting of:

- **MapeWrap Primer 1**, consolidating product for treating the substrates.
- **MapeWrap 11** and **MapeWrap 12**, skim coating compounds for levelling off any defects and sealing the porosity (the workability time of **MapeWrap 12** is higher than that of **MapeWrap 11**).
- **MapeWrap 21**, impregnator for fabric to be used with the "wet application method"
- **MapeWrap 31**, fluid impregnator for fabric to be used with the "dry application method"
- **MapeWrap 31 T**, thixotropic impregnator for fabric to be used with the "dry application method"

The bonding products from the **MapeWrap** range comply with the principles from the EN 1504-9 standard ("*Products and systems for the protection and repair of concrete structures: definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. General principles for the use of products and systems*") and the minimum requirements of EN 1504-4 ("*Structural bonding*").

With the "wet application method", the fabric is pre-impregnated and then applied, while with the "dry application method" the fabric is placed directly over a layer of resin previously applied on the surface of the

Annexe 3

concrete element to be strengthened.

MapeWrap 31 T, thanks to its thixotropic consistency, can also be used for the preliminary levelling off of the substrate.

To satisfy a wide range of structural requirements, **MapeWrap C UNI-AX** is available in two different weights (300 and 900 g/m²), each with different heights:

- **MapeWrap G UNI-AX 300/30**
- **MapeWrap G UNI-AX 300/60**
- **MapeWrap G UNI-AX 900/30**
- **MapeWrap G UNI-AX 900/60**

ADVANTAGES

Unlike work carried out using conventional techniques, thanks to their extremely low weight, the fabrics from the **MapeWrap G UNI-AX** range can be applied by a smaller team of workers.

With the use of tools that make the application easier, both the "dry application method" and "wet application method" enable the application of the product quickly and often without having to interrupt the normal activities that take place in the structure.

Compared to the cladding technique with metal plates (beton plaqué), **MapeWrap G UNI-AX** fabric can be adapted to suit any shape of element or structure to be repaired, it does not require temporary supports during application and there is no risk of corrosion of the strengthening system.

RECOMMENDATIONS

All workers must use protective gloves and goggles and anti-solvent safety masks.

APPLICATION PROCEDURE

Preparation of the substrate

The surface on which **MapeWrap G UNI-AX** is to be applied must be perfectly clean, dry, and strong.

Masonry structures

Before applying the fabric, remove all loose or crumbling areas or areas at risk of becoming detached and level off the surfaces with a layer of **Planitop HDM Maxi**.

Wooden structures

Repair wooden elements and structures, where required, by applying adhesives from the **Mapewood** range.

Concrete structures

- Not damaged
Remove by sanding all traces of tripping oil, varnish, paint, and cement laitance.
- Damaged
remove all damaged areas with a hammer, a jackhammer, or by hydro-scarifying.
Remove all traces of rust from the steel reinforcement and protect them by applying **Mapefer** two-component anti-corrosion cementitious mortar or **Mapefer 1K Zero** one-component anti-corrosion cementitious mortar.
Repair the concrete surfaces with products from the **Mapegrout** range. Wait at least three weeks before applying **MapeWrap G UNI-AX**.
If strengthening work on concrete structures needs to be carried out immediately, use **Adesilex PG1** or **Adesilex PG2**.

Seal any cracks in the structure by injecting them with **Epojet** or **Epojet LV** (suitable only for dry or slightly damp cracks) or with **Foamjet T** or **Foamjet F** (suitable for damp cracks or if water is seeping in).

Refer to the relevant Technical Data Sheet for details on how to apply the aforementioned products.

Round off all sharp edges and corners on concrete or masonry elements and structures that are to be strengthened with the **MapeWrap G UNI-AX** (such as beams and pillars) with a jackhammer or other suitable tools. It is recommended to round them off to a radius of at least 2 cm, in compliance with CNR-DT 200 R1/2013.

Annexe 3

Application of MapeWrap G UNI-AX using the "wet application method"

Application phases

1. Preparation of **MapeWrap Primer 1**
2. Application of **MapeWrap Primer 1**
3. Preparation of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**
4. Preparation of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**
5. Preparation of **MapeWrap 21**.
6. Impregnation of fabric with **MapeWrap 21**
7. Application of **MapeWrap G UNI-AX**

1. Preparation of MapeWrap Primer 1

The two components of **MapeWrap Primer 1** must be mixed together: pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until the fluid resin is completely blended.

Mixing ratio: 3 parts by weight of component A and 1 part by weight of component B.

Do not use partial quantities: to avoid the risk of accidental dosage mistakes, use the whole package; if only partial quantities are required, use a precision electronic scale to weigh the components (this procedure must also be adopted for the other products).

Once prepared, the workability time of **MapeWrap Primer 1** is around 90 minutes at +23°C.

2. Application of MapeWrap Primer 1

Apply an even coat of **MapeWrap Primer 1** with a brush or roller on the concrete surface, that must be as flat as possible.

If the surface is particularly absorbent, apply a second coat of **MapeWrap Primer 1** once the first coat has been completely absorbed.

Finally, skim the surface with **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** while the previously applied coat is still fresh.

3. Preparation of MapeWrap 11 or MapeWrap 12

Choose whether to use **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** according to the surrounding temperature and workability times. **The workability time of MapeWrap 12** is higher than that of **MapeWrap 11**.

Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until they form an even, grey paste.

Mixing ratio for both products: 3 parts by weight of component A and 1 part by weight of component B.

At +23°C **MapeWrap 11** remains workable for approximately 35 minutes after mixing, while **MapeWrap 12** remains workable for approximately 50 minutes.

MapeWrap 11 is particularly recommended if the surrounding temperature is between +5°C and +23°C, while **MapeWrap 12** is recommended for higher temperatures.

4. Application of MapeWrap 11 or MapeWrap 12

On concrete surfaces treated beforehand with **MapeWrap Primer 1** and while the product is still wet, apply a coat approx 1 mm thick of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** with a notched trowel.

Then smooth over the surface with a flat trowel to eliminate any imperfections on the surface.

Using the same product, fill and round off the corners to form a fillet with a radius of at least 2 cm.

5. Preparation of MapeWrap 21

Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until the resin is completely blended.

Mixing ratio: 4 parts by weight of component A and 1 part by weight of component B.

The product remains workable for approximately 40 minutes at +23°C.

6. Impregnation of fabric with MapeWrap 21

Manual impregnation

Cut the **MapeWrap G UNI-AX** to the sizes required and impregnate it by dipping it for a few minutes in a rectangular plastic bowl filled approximately 1/3 with **MapeWrap 21**.

Take the fabric from the bowl leave it to drip for a few seconds and then remove all the excess resin by squeezing it gently with your hands without wringing it to prevent damaging the fibres. Wear rubber gloves when carrying out these operations.

Impregnation by machine

As an alternative to manual impregnation, simple equipment consisting of a bowl and a series of rollers can be used. Such equipment makes the impregnation and dripping operation easier and safer for the operator,

Annexe 3

and it is particularly recommended when the a large number of interventions need to be carried out on a single structure over a large area of the surface. This system will guarantee that the resin is distributed evenly in every part of the fabric.

Apply the fabric immediately after impregnating it.

7. Application of MapeWrap G UNI-AX

Check that **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** is still, then immediately apply the **MapeWrap G UNI-AX** making sure there are no folds or creases.

After flattening the fabric out by hand (always wear rubber gloves), go over the surface several times with a rigid rubber roller in the same direction as that of the fibres so that the fabric penetrates perfectly into the **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** epoxy grout.

Then go over the surface again with the **MapeWrap Roller** to completely remove all the air bubbles.

While the resin is still wet, fully broadcast the surface with dry quartz sand Quartz 1.2 or **Quartz 1.9** respectively with grain size between 1.2 and 1.9 mm.

For further information on the technical characteristics of each resin product used for the **MapeWrap G UNI-AX**, refer to the related Technical Data Sheet.

Joints

When binding pillars, the overlap of the ends of the strips of **MapeWrap G UNI-AX** must be at least 30 cm.

It is not necessary to overlap the strips in the longitudinal direction of the fabric: it is sufficient to apply the fabric strips side by side.

After applying and going over the fabric with **MapeWrap Roller**, **MapeWrap G UNI-AX** must not be moved or adjusted.

Procedure for applying MapeWrap G UNI-AX using the "dry application technique" – with fluid impregnator MapeWrap 31

Application phases

1. Preparation of **MapeWrap Primer 1**
2. Application of **MapeWrap Primer 1**
3. Preparation of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**
4. Preparation of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12**
5. Preparation of **MapeWrap 31**
6. Application of the first coat of **MapeWrap 31**
7. Application of **MapeWrap G UNI-AX** and second coat of **MapeWrap 31**

1. Preparation of MapeWrap Primer 1

The two components of **MapeWrap Primer 1** must be mixed together.

Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until the resin is completely blended.

Mixing ratio: 3 parts by weight of component A and 1 part by weight of component B.

Do not use partial quantities: to avoid the risk of accidental dosage mistakes, use the whole package; if only partial quantities are required, use a precision electronic scale to weigh the components (this procedure must also be adopted for the other products).

Once prepared, the workability time of **MapeWrap Primer 1** is around 90 minutes at +23°C.

2. Application of MapeWrap Primer 1

Apply an even coat of **MapeWrap Primer 1** with a brush or roller on the concrete surface, that must be as flat as possible.

If the surface is particularly absorbent, apply a second coat of **MapeWrap Primer 1** once the first coat has been completely absorbed.

Finally, skim the surface with **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** while the previously applied coat is still fresh.

3. Preparation of MapeWrap 11 or MapeWrap 12

Choose whether to use **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** according to the surrounding temperature and workability times (the workability time of **MapeWrap 12** is longer than that of **MapeWrap 11**).

Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until they form an even, grey paste.

Mixing ratio for both products: 3 parts by weight of component A and 1 part by weight of component B.

Annexe 3

At +23°C **MapeWrap 11** remains workable for approximately 35 minutes after mixing, while **MapeWrap 12** remains workable for approximately 50 minutes.

MapeWrap 11 is particularly recommended if the surrounding temperature is between +5°C and +23°C, while **MapeWrap 12** is recommended for higher temperatures.

4. Application of MapeWrap 11 or MapeWrap 12

On concrete surfaces treated beforehand with **MapeWrap Primer 1**, apply a coat approx 1 mm thick of **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** with a notched trowel.

Then smooth over the surface with a flat trowel to eliminate any imperfections on the surface.

Using the same product, fill and round off the corners to form a fillet with a radius of at least 2 cm.

5. Preparation of MapeWrap 31

Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until they form an even, yellow paste.

Mixing ratio: 4 parts by weight of component A with 1 part by weight of component B.

The product remains workable for approximately 40 minutes after mixing, at a temperature of +23°C.

6. Application of the first coat of MapeWrap 31

Apply a first, even coat of **MapeWrap 31** of approx. 0.5 mm thickness on **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** while still wet using a brush or roller.

7. Application of MapeWrap G UNI-AX and second coat of MapeWrap 31

Immediately lay by hand (wear protective, waterproof rubber gloves) the **MapeWrap G UNI-AX** fabric over **MapeWrap 31** while it is still wet, making sure it is applied without any creases or folds and pass over the surface several times with a **MapeWrap Roller** so that the adhesive completely penetrates into the fibres of the fabric.

Apply a second coat of **MapeWrap 31** over **MapeWrap G UNI-AX**.

Pass the **MapeWrap Roller** over the impregnated fabric, to eliminate completely any air bubbles formed during the application.

While the resin is still wet, fully broadcast the surface with dry quartz sand **Quartz 1.2** or **Quartz 1.9** respectively with grain size 1.2 and 1.9 mm. (For further information on the technical characteristics of each resin product used for the **MapeWrap G UNI-AX**, refer to the related Technical Data Sheet).

Joints

When binding pillars, the overlap of the ends of the strips of **MapeWrap G UNI-AX** must be at least 30 cm. It is not necessary to overlap the strips in the longitudinal direction of the fabric: it is sufficient to apply the fabric strips side by side.

After applying and going over the fabric with **MapeWrap Roller**, **MapeWrap G UNI-AX** must not be moved or adjusted.

Procedure for applying MapeWrap G UNI-AX using the "dry application technique" – with thixotropic impregnator MapeWrap 31 T

Application phases

1. Preparation of **MapeWrap Primer 1**.
2. Application of **MapeWrap Primer 1**.
3. Preparation of **MapeWrap 31 T**.
4. Application of the first coat of **MapeWrap 31 T**.
5. Application of **MapeWrap G UNI-AX** and second coat of **MapeWrap 31 T**.

1. Preparation of MapeWrap Primer 1

The two components of **MapeWrap Primer 1** must be mixed together. Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until the resin is completely blended. Mixing ratio: 3 parts by weight of component A with 1 part by weight of component B. To avoid dosage mistakes, use the whole amount of the two components. If only partial quantities are required, use a high-precision electronic scale to weigh out the components (this procedure must also be adopted for the other products).

Once prepared, the workability time of **MapeWrap Primer 1** is around 90 minutes at +23°C.

2. Application of MapeWrap Primer 1

Apply an even coat of **MapeWrap Primer 1** with a brush or roller on the clean, dry concrete surface.



Annexe 3

If the surface is particularly absorbent, apply a second coat of **MapeWrap Primer 1** once the first coat has been completely absorbed. Finally, skim the surface with **MapeWrap 11** or **MapeWrap 12** while the previously applied coat is still fresh.

3. Preparation of MapeWrap 31 T

Pour component B into component A and mix with a drill at low speed with a mixing attachment until they form an even paste. Mixing ratio: 4 parts by weight of component A and 1 part by weight of component B. Do not use partial quantities to avoid the risk of accidental dosage mistakes, use the whole package; if only partial quantities are required, use a precision electronic scale to weigh the components. After mixing, the product remains workable for approximately 50 minutes at +23°C.

4. Application of the first coat of MapeWrap 31 T

Apply a first, even coat of **MapeWrap 31 T** of approx. 1 mm thickness with a flat trowel.

5. Application of MapeWrap G UNI-AX and application of a second coat of MapeWrap 31 T

Immediately lay the **MapeWrap G UNI-AX** fabric over the **MapeWrap 31 T** while it is still wet, making sure it is applied by hand (wear protective rubber gloves), without any creases or folds and pass over the surface several times with a **MapeWrap Roller** so that the adhesive completely penetrates into the fibres of the fabric.

Apply a second coat of **MapeWrap 31 T** over **MapeWrap G UNI-AX**.

Pass the Roller for MapeWrap over the impregnated fabric, in order to completely eliminate any air bubbles formed during the application.

While the resin is still wet, fully broadcast the surface with dry quartz sand **Quartz 1.2** or **Quartz 1.9** respectively with grain sizes 1.2 and 1.9 mm. (For further information on the technical characteristics of each resin product used for the **MapeWrap G UNI-AX**, refer to the related Technical Data Sheet).

Joints

When binding pillars, the overlap of the ends of the strips of **MapeWrap G UNI-AX** must be at least 30 cm. It is not necessary to overlap the strips in the longitudinal direction of the fabric: it is sufficient to apply the fabric strips side by side.

After applying and going over the fabric with **MapeWrap Roller**, **MapeWrap G UNI-AX** must not be moved or adjusted.

Wet application method (within 24 hours) for additional layers of MapeWrap G UNI-AX

For the "wet application method" repeat the following operations:

- Impregnation of fabric with **MapeWrap 21**.
- Application of **MapeWrap G UNI-AX**

For the "Dry application method":

- Application of the first coat of **MapeWrap 31**.
- Application of **MapeWrap G UNI-AX**
- Application of an additional coat of **MapeWrap 31**.

Note: if additional layers of fabric need to be applied after more than 24 hours, the surface of the hardened resin must be roughened up by sanding.

FINISH AND PROTECTIVE COATING

Once the epoxy products used in the system have hardened (approx. 1-2 days at +23°C), the surface can be finished off with a skim-coat of fine-textured cementitious compounds such as **Planitop 200** or **Planitop 210** (refer to the related Technical Data Sheet).

If the strengthened area is to be covered by a false ceiling, the aforementioned finishing procedure is not required.

For external applications, protect the system once the epoxy systems have completely hardened by applying a coat of **Mapelastic** or **Mapelastic Guard**, two-component, elastic cementitious mortar, or as an alternative, products from the **Elastocolor** range (refer to the related Technical Data Sheet).

This product forms an efficient barrier against UV rays, which makes it particularly recommended for structures exposed to direct sunlight.

To protect the system from fire, it can be dressed with panels, which are usually made from calcium-silicate, or with a layer of intumescent render, as specified in article 4.8.2.3 of CNR DT 200 R1/2013.

Annexe 3

PRECAUTIONS TO BE TAKEN DURING AND AFTER APPLICATION

- The temperature during application must be at least +5°C (or +10°C in the case of **MapeWrap Primer 1**) and the structure must be dry and protected from rain and dust carried by the wind.
- After completing the application, make sure the treated surfaces are kept at a temperature over +5°C (or over +10°C if **MapeWrap Primer 1** had been used).
- Protect strengthened surfaces from rain for at least 24 hours if the temperature does not drop below +15°C, or for at least 3 days if the temperature is lower.

CLEANING

The epoxy systems described form an extremely strong bond, so it is recommended to clean all work tools with solvent (such as ethanol, toluene, etc.) before the products harden.

CONSUMPTION OF EPOXY SYSTEMS

Priming, levelling and skimming the surfaces	Consumption (g/m ²)
MapeWrap Primer 1	250-300
MapeWrap 11 or MapeWrap 12	1500-1600

Impregnator	Weight (g/m ²)	Consumption (g/m ²)
MapeWrap 21	300	900-1000
	900	1400-1500
MapeWrap 31	300	850-950
	900	1300-1400
MapeWrap 31 T	300	1400-1500

PACKAGING

The fabrics of the **MapeWrap G UNI-AX** range are available in carton boxes containing 50 m rolls.

STORAGE

Store in a covered dry area.

SAFETY INSTRUCTIONS FOR PREPARATION AND APPLICATION

MapeWrap G UNI-AX is an article and referring to the current European regulations (Reg. 1906/2007/CE - REACH) does not require the preparation of the Safety Data Sheet. During use, it is recommended to wear gloves and goggles and follow the safety requirements of the workplace.
PRODUCT FOR PROFESSIONAL USE.

Annexe 3

TECHNICAL DATA (typical values)

PRODUCT IDENTITY

Type of fibre:	glass Type E
Consistency:	unidirectional fabric

MECHANICAL PROPERTIES OF DRY FABRIC

Weight (g/cm ³):	300	900
Equivalent thickness of dry fabric (mm):	0.118	0.342
Load-resistant area per unit of width (mm ² /m):	118	342
Tensile strength (N/mm ²):	2,560	2,560
Tensile modulus of elasticity (N/mm ²):	80,700	80,700
Elongation at failure (%):	3-4	3-4

FINAL PERFORMANCE PROPERTIES

Bond to concrete (MPa):	> 3 (failure of concrete)
-------------------------	---------------------------

WARNING

Although the technical details and recommendations contained in this product data sheet correspond to the best of our knowledge and experience, all the above information must, in every case, be taken as merely indicative and subject to confirmation after long-term practical application; for this reason, anyone who intends to use the product must ensure beforehand that it is suitable for the envisaged application. Please refer to the current version of the Technical Data Sheet, available from our website www.mapei.com

LEGAL NOTICE

The contents of this Technical Data Sheet ("TDS") may be copied into another project-related document, but the resulting document shall not supplement or replace requirements per the TDS in force at the time of the MAPEI product installation.

The most up-to-date TDS can be downloaded from our website www.mapei.com.

ANY ALTERATION TO THE WORDING OR REQUIREMENTS CONTAINED OR DERIVED FROM THIS TDS EXCLUDES THE RESPONSIBILITY OF MAPEI.

1030-9-2023 en (IT)

Any reproduction of texts, photos and illustrations published here is prohibited and subject to prosecution

