



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet fin d'études

Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de master en
construction mécanique

**Thème : Caractérisation expérimentale et
simulation numérique des composites hybrides/non
hybride**

Réalisé par : MAKHLOUF HANI & AFFOUN HOUSSAM

Soutenu publiquement le : juin 2026, devant le jury composé de :

.
Pr. Ait tahar K
Dr. Bouamra Y

Président
Encadreur
Co- encadreur
Examineur
Examineur

Année académique : 2025/2026

Remerciements

Je remercie en premier lieu le Bon Dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon objectif.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et toute ma famille, qui grâce à leurs aides, mon travail a vu le jour.

Je remercie profondément mon promoteur Monsieur Pr. Ait.tahar K d'avoir accepté de diriger mon travail, par son soutien et ses conseils Pertinents qui m'ont permis de travailler tranquillement.

J'adresse mes plus vifs remerciements et reconnaissances à Mr Dr. Bouamra Y pour sa disponibilité et aide précieuse.

Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner travail.

Je remercie mes camarades de promotion pour leur soutien.
Mes sincères remerciements vont à tous mes enseignants.

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de, près ou de loin, mon porté aide et encouragement.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère, pour tous ses sacrifices, son amour, sa
tendresse, son soutien et ses prières tout au long de mes
études,

A mon père qui a été là tout ma vie,

A mes chers frères pour leur appui et leur
encouragement,

A mon binôme Houssam pour ce travail qui a été mené avec
sérieux et dans une très bonne entente,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon
parcours universitaire,

A mes amis qui étaient toujours là pour moi,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi

Table des matières

Introduction générale.....	6
Chapitre.I.Généralités sur les matériaux composites	14
I.1 Introduction :.....	14
I.2 Définition :	14
I.3 Constituants des matériaux composites	15
I.3.1 Matrice :	15
I.3.2 le renfort :	17
I.3.3 Charges et Additifs :	20
I.4 Architecture des matériaux composites :	20
I.4.1 Les stratifiées :	20
I.4.1.2 Bases de désignation des stratifiés à base de fils ou de tissus UD :	22
I.4.1.3 le comportement mécanique des stratifiés	23
I.4.1.3.1 la Théorie des Stratifiés :	23
I.4.2 Les monocouches :	26
I.4.3 les sandwiches :	27
I.5. la mise en œuvre des matériaux composites :	28
I.5.1. Moulage au contact :	28
I.5.2. Moulage par projection simultanée :	29
I.5.3. Injection thermodurcissable BMC	29
I.6. Caractéristiques des matériaux composites :	30
I.7. Mécanisme de rupture et d'endommagement des matériaux composites	30
I.7.1.La rupture des fibres.....	30
I.7.2.La rupture transverse de la matrice	31
I.8. Domaines d'application :	33
Chapitre II : Elaboration des composites stratifiés.....	35
II.1 Introduction :	35
II.2. Les matériaux composites à élaborer :	35
II.3. Présentation des matériaux :	35
II.4. Matériels utilisés pour l'élaboration :	38
II.5. La procédure d'élaboration :	39

II.6. La préparation des éprouvettes :	41
Chapitre III : Caractérisation des composites stratifiés III.1.Introduction :	44
III.2 Les données utilisé pour caractériser les composites	44
III.3. Caractérisation mécanique:	45
Chapitre IV : Simulation numérique	54
IV.1 Introduction :	54
IV.2 Étapes de simulation numérique avec le logiciel ABAQUS	55
IV.2.1 Premier module :	56
IV.2.2 Deuxième module	56
IV.2.3 Troisième module	57
IV.2.4 Quatrième module	57
IV.2.5 Cinquième module	58
IV.2.6 Sixième module	58
IV.2.7 Septième module	59
IV.2.8 Huitième module	60
IV.2.9 Neuvième module	60
IV.3. Présentation des modèles à simuler :	60
IV.3.1 Dimensions et géométrie :	61
IV.4. Résultats et discussions :	67
IV.4.1. Résultats des essais traction :	67
IV.4.2. Résultats des essais Flexion :	73
IV.4.2.1 Représentation graphique des résultats (flexion)	77
IV.5 Confrontation des résultats :	81
IV.6 Conclusion partielle :	83
Conclusion Générale	84

Liste des Figures

Figure I.1 Matériaux composites.....	14
Figure I.2 Différentes familles de matrice	15
Figure I.3 Les différentes formes des renforts fibres de verre	17
Figure I.4 Différentes familles du renfort	18
Figure I.5 Architecture d'un stratifié	21
Figure I.6 Différents type de Stratifiés.....	22
Figure I.7 Désignation ou codification d'un stratifié.....	23
Figure I.8 Convention de signe pour la désignation des stratifiés	23
Figure I.9 Élément de Stratifié	24
Figure I.10 Pli à renforcement unidirectionnel	27
Figure I.11 Matériaux sandwiches à âme pleines	27
Figure I.12 Procédé de moulage par contact.....	28
Figure I.13 Moulage par projection simultanée	29
Figure I.14 Injection thermodurcissable BMC.....	29
Figure I.15 Rupture de la fibre	31
Figure I.16 Rupture transverse de la matrice	31
Figure I.17 Rupture longitudinale de la matrice	32
Figure I.18 Décohésion fibre-matrice	32
Figure I.19 Exemples d'application des matériaux composites.....	33
Figure II.1 Matrice composée de résine (A) et durcisseur (B).....	36
Figure II.2 Le tissu de verre	37
Figure II.3 Tamis en acier galvanisé	37
Figure II.4 Moule utilisé pour l'élaboration des plaques.....	38
Figure II.5 Rouleau	38
Figure II.6 Vaseline	39
Figure II.7 Scie à ruban	41
Figure II.8 La géométrie d'éprouvette d'essai de traction.....	41
Figure II.9 Les éprouvettes d'essai de traction selon la norme ASTM D3039.....	41
Figure II.10 La géométrie d'éprouvette d'essai de flexion	42

Figure II.11 Les éprouvettes d'essai de flexion selon la norme ASTM D7264	42
Figure III.1 La machine universelle (ZwickRoelle).....	45
Figure III.2 L'interface de programme (TestExpert).....	45
Figure III.3 Les courbes de contrainte-déformation du composite Epoxy/Tissu de verre	46
Figure III.4 Les courbes de contrainte-déformation du composite Epoxy/Acier galvanisé	47
Figure III.5 La courbe de contrainte-déformation du composite Hybride	48
Figure III.6 Machine de flexion ZwickRoelle 2,5 KN	49
Figure III.7 Les courbes de contrainte-déformation du composite Epoxy/tissu de verre (flexion).....	50
Figure III.8 Les courbes de contrainte-déformation du composite Epoxy/acier galvanisé (flexion).....	51
Figure III.9 Les courbes de contrainte-déformation du composite Hybride (flexion)	52
Figure IV.1 L'interface d'Abaqus/CAE version 2020	55
Figure IV.2 Modélisation des géométries des éléments.....	56
Figure IV.3 Propriétés mécaniques de chaque matériau	56
Figure IV.4 Assemblage des éléments Appuis-Composite.....	57
Figure IV.5 Le module STEP.....	57
Figure IV.6 Modélisation des interactions du contact et des conditions d'appui	58
Figure IV.7 Application des Conditions aux limites et des sollicitations externes.....	59
Figure IV.8 Maillage du composite.....	59
Figure IV.9 Module Job	60
Figure IV.10 Module Visualisation.....	60
Figure IV.11 Essai de flexion et de traction du procédé étudié	61
Figure IV.12 Epreuve monocouche en fibre de verre.....	61
Figure IV.13 Epreuve monocouche en grille métallique inoxydable	62
Figure IV.14 Stratifié multicouche en fibre de verre et grille métallique	62
Figure IV.15 Poutre en époxy renforcé par des fibres de verres GFRP	63
Figure IV.16 Poutre en époxy renforcé par une grille métallique	63
Figure IV.17 Stratifié multicouche F-F-F-F.....	63
Figure IV.18 Stratifié multicouche G-G-G-G	64
Figure IV.19 Stratifié multicouche F-F-G-G	64
Figure IV.20 Stratifié multicouche G-G-F-F	65
Figure IV.21 Stratifié multicouche F-G-F-G	65
Figure IV.22 Stratifié multicouche G-F-G-F	66

Figure IV.23 Les courbes de contrainte-déplacement du composite Epoxy/fibre de verre	67
Figure IV.24 Evolution de La force (N) – GFRP.....	68
Figure IV.25 Evolution de La contrainte (MPa) – GFRP	68
Figure IV.26 Evolution du déplacement (mm) – GFRP	68
Figure IV.27 Evolution de la déformation – GFRP	68
Figure IV.28 Les courbes de contrainte-déplacement du composite Grille métallique	69
Figure IV.29 Evolution de La force (N) – Grille	69
Figure IV.30 Evolution de La contrainte (MPa) – Grille	69
Figure IV.31 Evolution du déplacement (mm) – Grille	69
Figure IV.32 Evolution de la déformation – Grille	69
Figure IV.33 Les courbes de contrainte-déplacement du composite hybride	70
Figure IV.34 Evolution de La force (N) – Hybride.....	70
Figure IV.35 Evolution de La contrainte (MPa) – Hybride	70
Figure IV.36 Evolution du déplacement (mm) – Hybride	71
Figure IV.37 Evolution de la déformation – Hybride	71
Figure IV.38 Confrontation des résultats (Essai de Traction).....	71
Figure IV.39 Valeurs de la contrainte ultime des spécimens considérés (GFRP - Grille - Hybride)	72
Figure IV.40 Courbes Force-déplacement du composite en fibre de verre GFRP.....	77
Figure IV.41 Courbes Force-déplacement du composite en Grille métallique	77
Figure IV.42 Confrontation des résultats obtenus pour les modèles monocouches (Essai de flexion)	78
Figure IV.43 Courbe Force-déplacement du stratifié G-G-G-G	78
Figure IV.44 Courbe Force-déplacement du stratifié G-F-G-F	79
Figure IV.45 Courbe Force-déplacement du stratifié F-F-F-F	79
Figure IV.46 Courbe Force-déplacement du stratifié F-G-F-G	80
Figure IV.47 Courbe Force-déplacement du stratifié F-F-G-G	80
Figure IV.48 Courbe Force-déplacement du stratifié G-G-F-F	81
Figure IV.49 Confrontation des résultats (flexion – courbes).....	81
Figure IV.50 Confrontation des résultats (flexion – diagramme barres)	82

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	16
Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques	16
Tableau I.3 : Caractéristiques générales des types de verre les plus courants	18
Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques des fibres.....	19
Tableau I.5 : Divers mécanismes de rupture	30
Tableau II.1 : Caractéristiques de la résine MEDAPOXY PRIMER A114.....	36
Tableau II.2 : Propriétés de la fibre de verre-E	36
Tableau II.3 : Propriétés du tamis en acier galvanisé	37
Tableau III.1 : Fraction volumique	44
Tableau III.2 : Caractéristiques du composite Epoxy/Tissu de verre (traction).....	46
Tableau III.3 : Caractéristiques du composite Epoxy/Acier galvanisé (traction)	47
Tableau III.4 : Caractéristiques du composite Hybride (traction).....	48
Tableau III.5 : Caractéristiques du composite Epoxy/Tissu de verre (flexion).....	50
Tableau III.6 : Caractéristiques du composite Epoxy/Acier galvanisé (flexion)	51
Tableau III.7 : Caractéristiques du composite Hybride (flexion).....	51
Tableau IV.1 : Correspondance des unités.....	55
Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques du composite (GFRP)	66
Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques de la grille métallique	67
Tableau IV.4 : Caractéristiques du composite Epoxy/fibre de verre (simulation traction).....	67
Tableau IV.5 : Caractéristiques du composite Epoxy/Acier galvanisé (simulation traction) ..	68
Tableau IV.6 : Caractéristiques du composite Hybride (simulation traction).....	70
Tableau IV.7 : Confrontation des résultats EXP/SIM (Traction).....	72

Introduction générale

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, le développement de nouveaux matériaux capables de répondre aux exigences croissantes des secteurs industriels constitue un enjeu majeur. Les matériaux traditionnels tels que les métaux, bien qu'ils présentent de bonnes propriétés mécaniques, possèdent certaines limites notamment en termes de masse, de résistance à la corrosion et d'adaptation aux conditions sévères d'utilisation. Pour surmonter ces contraintes, les matériaux composites ont connu un essor considérable grâce à leurs performances élevées et à leur capacité à répondre aux besoins des applications modernes.

Un matériau composite est défini comme un assemblage de deux ou plusieurs constituants de natures différentes, dont les propriétés restent distinctes à l'échelle macroscopique. Il est généralement constitué d'une matrice et d'un renfort. La matrice assure la cohésion du matériau, la protection du renfort et le transfert des efforts, tandis que le renfort apporte principalement la résistance mécanique et la rigidité. L'association de ces deux phases permet d'obtenir un matériau présentant des caractéristiques supérieures à celles de ses constituants pris séparément.

Les composites se distinguent principalement par leur excellent rapport entre la masse et les performances mécaniques. Leur faible densité, leur grande résistance spécifique, leur rigidité élevée ainsi que leur bonne résistance à la fatigue et à la corrosion expliquent leur utilisation dans de nombreux domaines. Ils sont aujourd'hui largement employés dans des secteurs variés tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil, l'énergie, le domaine maritime et les équipements sportifs.

L'objectif du travail consiste à étudier expérimentalement le comportement mécanique des composites monocouches et des stratifiés hybrides sous un chargement de traction et de flexion. Les différents résultats obtenus par la simulation numérique ont été confrontés aux résultats expérimentaux pour la validation du modèle numérique. Il est mis en lumière par la comparaison des résultats avec le comportement à la rupture des composites élaborés, qui met en évidence l'influence de l'hybridation et de l'empilement sur les propriétés mécaniques.

.

Le travail se structure en quatre chapitres et se conclut par une conclusion générale accompagnée de perspectives variées.

- Dans le premier chapitre, il est question de présenter une synthèse bibliographique détaillée sur les matériaux composites.
- Au cours du deuxième chapitre, nous allons présenter les matériaux utilisés dans notre projet, le processus d'élaboration suivi et les équipements utilisés pour la l'élaboration des éprouvettes.
- Le troisième chapitre se concentre entièrement sur les Investigations expérimentales. Le travail consiste à évaluer les propriétés mécaniques des divers spécimens d'essai. Nous mettons l'accent sur le comportement des stratifiés monocouches et hybrides, sur la séquence d'empilement et sur l'influence du choix du renfort.
- Dans le quatrième chapitre, on découvre les résultats de la simulation numérique réalisée avec un code de calcul à base d'éléments finis. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, avec des graphiques et des diagrammes en barres pour les illustrer. Il y a aussi une présentation et une discussion sur les modes de rupture illustrés pour chaque type de stratifié considéré. En confrontant les résultats, on met en lumière l'effet de la séquence d'empilement et du type de renforts sur la résistance à la reprise des efforts de traction et de flexion.

En fin de compte, le mémoire comporte une conclusion générale qui présente les principaux résultats.

Chapitre I: Généralités sur les matériaux composites

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction :

Un matériau composite se définit par l'assemblage d'au moins une phase discontinue, appelée renfort, au sein d'une phase continue nommée matrice. L'intérêt fondamental de cette combinaison réside dans l'obtention de propriétés (mécaniques, thermiques ou physico-chimiques) supérieures à celles des constituants pris isolément. Dans cette synergie, le renfort assure l'essentiel des performances mécaniques tandis que la matrice remplit plusieurs fonctions critiques : elle garantit la cohésion structurelle, maintient l'orientation des fibres et assure le transfert des charges. Elle joue également un rôle protecteur contre les agressions environnementales, telles que l'humidité ou la corrosion, tout en stabilisant la tenue thermique. Notre étude s'inscrit dans cette démarche d'optimisation pour concevoir un composite « haute performance », alliant matrice organique et renfort fibreux afin de répondre aux impératifs d'allègement et de résistance structurelle.

I.2 Définition :

Les matériaux composites résultent de l'assemblage de constituants traditionnels, principalement une matrice (généralement une résine) et un ou plusieurs renforts, qu'ils soient sous forme granulaire ou fibreuse. Cette synergie confère au matériau des performances mécaniques nettement supérieures à celles de ses composants isolés.

Au-delà de ce gain structurel, l'intérêt des composites réside dans leur grande légèreté, leur excellente résistance à la corrosion et une maintenance simplifiée. De plus, leur mise en œuvre permet la conception de géométries complexes, offrant ainsi une liberté de design que ne permettent pas toujours les matériaux conventionnels. [1-6]

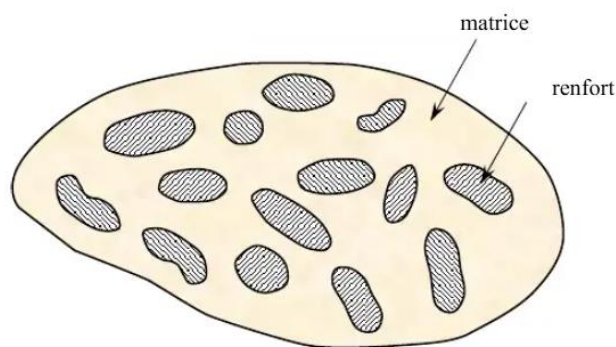


Figure I.1 Matériaux composites [1]

I.3 Composantes des matériaux composites

I.3.1 Matrice :

L'élément qui soutient les fibres est la matrice. Elle distribue les charges (résistance à la traction, à la courbure) tout en préservant chimiquement les fibres. En fonction de la composition de cette matrice, on peut classer ces matériaux composites dans trois grandes catégories [1]:

- **Les composites à base d'une matrice organique** : Représentant la catégorie la plus répandue, ils se déclinent en deux segments. On retrouve les produits de « grande diffusion », privilégiant le rapport coût/performance (fibres de verre sur résines polyester), et les composites à « hautes performances », essentiels à l'industrie aéronautique pour leurs propriétés mécaniques optimales.
- **Les composites à base d'une matrice métallique** : Principalement utilisés dans les secteurs de l'automobile et de l'électronique pour leur conductivité et leur résistance spécifique.
- **Les composites à base d'une matrice céramique** : Conçus pour les environnements de sollicitation extrême (spatial, nucléaire), ils se distinguent par une stabilité thermique exceptionnelle, pouvant supporter des températures allant de 1 000°C à 2 200°C dans le cas des systèmes carbone/carbone .

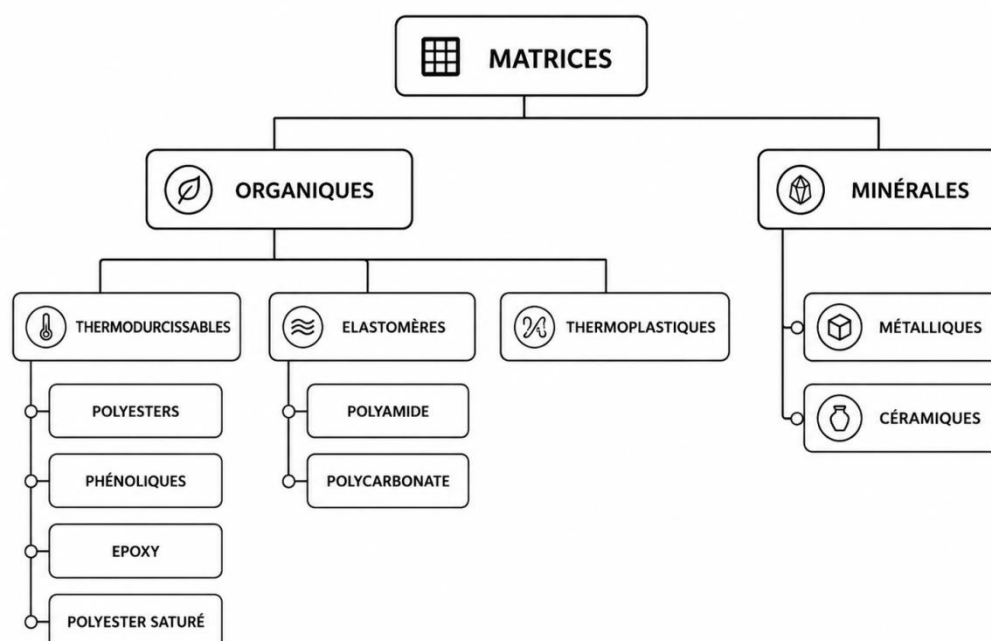


Figure I.2 : Différentes familles de matrice [2]

• Résines thermodurcissables

En raison de leurs propriétés intrinsèques, les résines thermodurcissables (TD) sont les plus utilisées. Leur mise en œuvre est irréversible : une fois la polymérisation activée par un apport thermique ou en présence d'un catalyseur, elles forment un réseau tridimensionnel rigide. Cette structure géométrique finale ne peut être altérée que par une dégradation thermique intense, empêchant tout remodelage ultérieur. Parmi les grandes familles de résines TD, on distingue [2] :

- Les polyesters insaturés : principalement destinés aux applications de grande diffusion.
- Les résines époxydes : reconnues pour leurs excellentes propriétés mécaniques et leur adhérence.
- Les résines de condensation : incluant les systèmes phénoliques, aminoplastes (aminoliques) et furaniques.

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [3].

Résine	Tf (°C)	$\rho(kg/m^3)$	ξ_t (%)	σ_t (Mpa)	σ_c (Mpa)	E (Gpa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénolique	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

• Les résines thermoplastiques

Contrairement aux thermodurcissables, les thermoplastiques (TP) sont constitués de polymères linéaires ou ramifiés qui possèdent la propriété d'être transformables de façon réversible : ils peuvent être ramollis par chauffage et durcis par refroidissement à plusieurs reprises. Grâce à leurs excellentes propriétés intrinsèques, ils sont fréquemment employés seuls pour la fabrication de pièces diverses. Toutefois, dans le domaine des composites, l'ajout de fibres courtes permet d'accroître leur stabilité dimensionnelle ainsi que leurs performances thermomécaniques. Les matrices TP techniques se distinguent par une tenue en température supérieure à 100 °C, avec notamment [2] :

- Le Polyamide (PA) : apprécié pour sa résistance aux chocs, à la fatigue et aux hydrocarbures.
- Les Poly téréphtalates (PET, PBT) : reconnus pour leur rigidité et leur ténacité.
- Le Polycarbonate (PC) : sélectionné pour sa grande résistance aux impacts.

Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques [4].

Résine	Tf (°C)	$\rho(kg/m^3)$	E (Gpa)	σ_t (Mpa)
polypropylène	50-60	900	1,1 à 1,4	20 à 35
Polyamide	65-100	1140	1,2 à 2,5	60 à 85

I.3.2 Renfort :

Les renforts constituent l'ossature du composite, assurant la reprise des efforts mécaniques. Ils se présentent principalement sous une forme de fibres (organiques ou minérales) dont la géométrie impacte directement les propriétés finales : les fibres longues ou courtes déterminent la résistance et la rigidité, par contre les renforts sous forme de particules sont introduits pour améliorer la stabilité dimensionnelle ou la tenue à l'usure. Dans l'industrie, ces fibres sont disponibles sous plusieurs architectures textiles et formes commerciales telles que [2-5]:

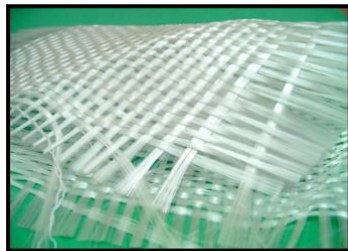
a. Le roving (fils ou mèches) : il consiste en un assemblage de fils de base disposés parallèlement et groupés sans torsion.

b. Le tissu (taffetas, toile, sergé, etc.) : cette architecture résulte de l'entrecroisement perpendiculaire de mèches de roving. Ces textiles peuvent atteindre un grammage important, s'élevant jusqu'à 800 g/m².

c. Les mats : ces nappes sont formées de fils (continus ou sectionnés) agglomérés par un liant dont la vitesse de dissolution dans la résine est adaptée au processus de fabrication.



a – Roving de verre



b – Tissu de verre



c – Mat de verre

Figure I.3 : les différentes formes des renforts fibres de verre [2]

Les principales catégories de renforts utilisées dans les matériaux composites sont classifiées et présentées dans l'organigramme illustré par la Figure I.4 ci-dessous. [3]

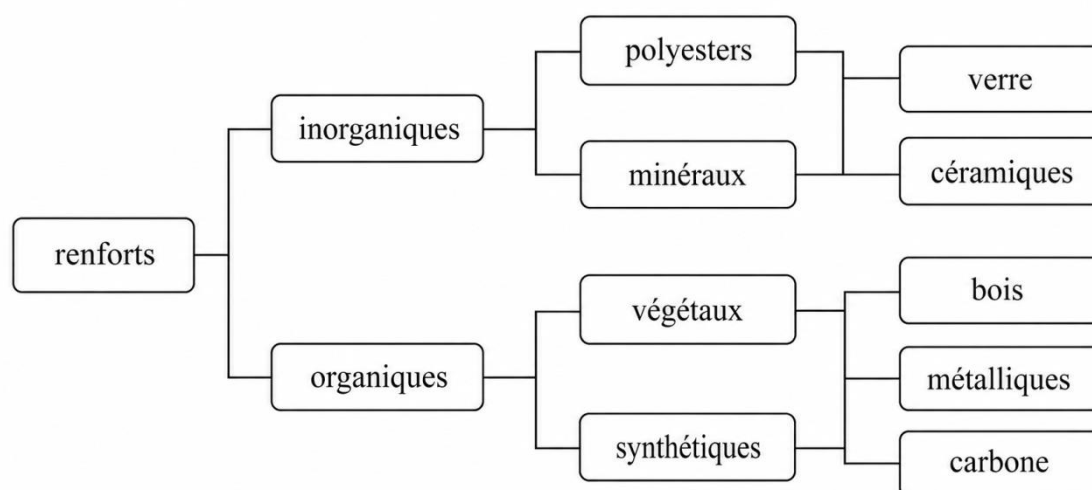


Figure I.4 : Différentes familles du renfort [3]

- **Fibres de verre**

Grâce à leur excellent rapport performance-prix, les fibres de verre s'imposent comme le renfort prédominant sur le marché actuel des composites structuraux. Leur compétitivité économique, alliée à des caractéristiques mécaniques robustes, explique leur large hégémonie dans les applications de construction. Le verre peut être classifié comme verre E, C, D, R ou S selon la technique de confection du mélange préparatoire. Par conséquent, les caractéristiques de chaque catégorie de verre sont aussi variables[5].

Tableau I.3 : Caractéristiques générales de types de verre les plus courants [5].

Type	Indication générale
E	Applications générales et courantes
D	Hautes propriétés diélectrique
A	Haute teneur en alcalins
C	Résistance chimique en milieu acide
R ; S ; S2 ; H ; H2	Haute Résistance mécanique
AR	Résistance en milieu acide et basique
E-CR	résistance accrue aux environnements acides

• Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont des renforts à hautes performances élaborés à partir de précurseurs organiques. Elles sont classées selon leur résistance à la traction. On rencontre classiquement [3]:

- Fibres à haute résistance (HR) : T300, TR50.
- Fibres à module intermédiaire (IM) : T800, IM6, IM7.
- Fibres à haut module (HM) : MR40, GY.

• Fibres aramides

Les fibres aramides sont des renforts à haute ténacité offrant une excellente tenue en traction, bien que leur résistance à la compression reste médiocre. Elles sont principalement utilisées dans les applications exigeant légèreté et résistance aux chocs. On retrouve classiquement trois grandes marques mondiales [3]:

- Kevlar (États-Unis) .
- Twaron (Europe) .
- Technora (Japon).

• Fibres céramiques

Les composites céramiques associent des matrices et des renforts de même nature pour une performance thermique optimale. On rencontre principalement trois types de fibre [3] :

- Fibres de carbure de silicium (SiC) : reconnues pour leur résistance à l'oxydation.
- Fibres de bore : appréciées pour leur très grande rigidité.
- Fibres de bore carbure de silicium : une solution hybride pour des applications spécifiques.

Tableau I.4: Caractéristiques mécaniques des fibres [3]

Renforts	$\rho(\text{kg/m}^3)$	σ_t (Mpa)	σ_c (Mpa)	E (Gpa)
AS4	1800	/	3599	235
T300	1700	1,2	3654	231
IM6	/	0,88	1460	/
IM8	1800	/	5171	310
Kevlar 49	3440	2,5	3620	124
Verre E	2580	3,5	3450	69

I.3.3 Charges et Additifs :

Outre le couple matrice-renfort, la formulation de la résine intègre souvent des constituants secondaires destinés à moduler les propriétés finales ou à optimiser les coûts de production. On distingue deux catégories selon leur taux d'incorporation [2]:

- **Les additifs** : Présents en faibles proportions (généralement inférieurs à quelques pourcents), ils sont indispensables pour garantir l'adhérence à l'interface fibre/matrice. Ils agissent également sur la processus de fabrication et la durabilité du matériau en servant d'agents de démoulage, de lubrifiants, de pigments, ou encore de stabilisants anti-UV et d'accélérateurs de polymérisation. Ils permettent aussi de compenser le retrait volumique lors du durcissement [2].
- **Les charges** : Incorporées à des taux pouvant atteindre plusieurs dizaines de pourcents, elles sont présentées sous forme de poudres. ou de microbilles (verre, carbone, polymères). Leur ajout vise soit à améliorer les performances mécaniques intrinsèques de la résine, soit à réduire le coût de revient tout en préservant les propriétés globales du composite. Les charges métalliques (cuivre, aluminium) ou le noir de carbone sont également utilisés pour modifier les caractéristiques de conductivité ou de résistance à l'usure [2].

I.4 Architecture des matériaux composites :

Il existe trois classifications principales pour la structure des matériaux composites ::

- Les stratifiées
- Les monocouches
- Les sandwiches

I.4.1 Les stratifiées :

Les stratifiés se composent de strates superposées (parfois nommées plis) de matériaux de renfort (fils, mats, tissus, etc.) imbibées de résines. Nous analysons les différentes sortes de stratifiés[4].

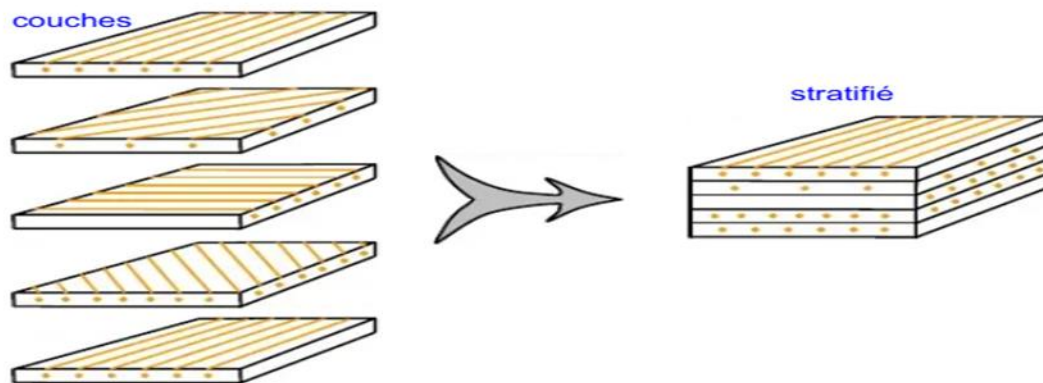


Figure I.5 : architecture d'un stratifié [4]

I.4.1.1 Les Différents types des stratifiés :

On distingue quatre variétés parmi les stratifiés (Figure I.6) [4] :

- **Stratifié unidirectionnel**

Tous les plis présentent une orientation de fibres uniforme alignant dans la même direction.

Exemple: un stratifié unidirectionnel à 0° , $\theta=0^\circ$ dans les divers plis .

- **Stratifié à pli orienté $\pm\theta$**

L'orientation des fibres est en alternance de couche en couche, $(+\theta/-\theta/)$.

- **Stratifié à pli croisé**

L'orientation des fibres est alternée d'un pli à l'autre, $0/90^\circ/0^\circ/90^\circ$.

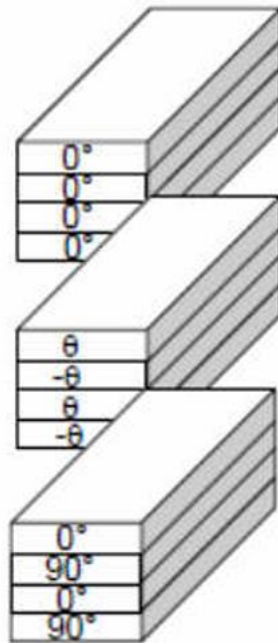


Figure.I.6 : Différents type.de Stratifiés [4]

I.4.1.2 Bases de désignation des stratifiés à base de fils ou de tissus UD :

En théorie, tout autre type de stratifié peut être considéré comme une forme de stratifié de base à base de fils ou de tissus unidirectionnels. Ces stratifiés, comme l'illustre la figure I.3, se composent de superpositions de fils ou de tissus unidirectionnels, avec une orientation décalée pour chaque couche [4].

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

- Chaque strate est identifiée par un chiffre qui représente la valeur en degrés de l'angle créé par l'orientation des fibres par rapport à l'axe x de référence.
- Les différentes couches sont séparées si leurs angles diffèrent.
- Les strates de même orientation sont identifiées par un indice numérique.
- Les couches sont désignées de manière progressive en partant d'un côté à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) délimitent le commencement et la conclusion du code.

La désignation est en fonction du système d'axes sélectionné. Un exemple est fourni dans la figure I.7.

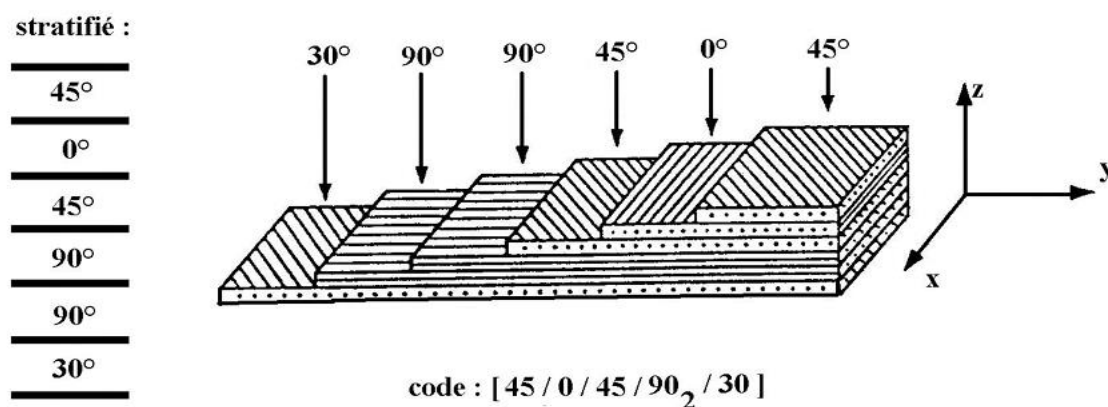


Figure I.7 : Désignation ou codification d'un stratifié [4].

- **Angles positifs et négatifs**

Quand des couches sont positionnées à des angles égaux en magnitudes, mais de polarités contraires, on utilise les symboles + ou -. L'usage d'angles positifs ou négatifs est tributaire du système d'axes sélectionné : une inversion peut survenir en fonction de la décision prise (figure I.8) [4].

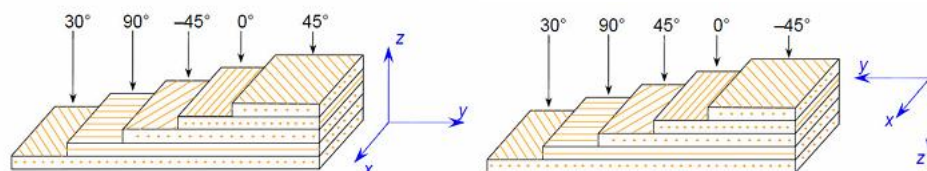


Figure I.8 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés [4].

I.4.1.3 Le comportement mécanique des stratifiés :

Le comportement mécanique d'un stratifié définit la réponse d'un assemblage multicouche soumis à diverses sollicitations, telles que la traction, la compression, la flexion ou le cisaillement. Cette réponse est intrinsèquement liée aux caractéristiques élastiques et à l'orientation angulaire de chaque pli constitutif. La superposition de ces couches induit une anisotropie globale, laquelle détermine la rigidité structurelle, les seuils de résistance et les modes de déformation de l'ensemble de la structure.

I.4.1.3.1 La Théorie des Stratifiés :

La Théorie Classique des Stratifiés (CLT) constitue une approche de modélisation fondamentale en mécanique des composites pour prédire la réponse structurelle des plaques multicouches. Elle repose sur l'établissement de relations analytiques entre les contraintes, les déformations et les efforts globaux (efforts tranchants, moments de flexion et de torsion). En intégrant les propriétés élastiques intrinsèques et l'orientation angulaire de chaque pli, cette méthode permet de caractériser précisément le comportement macroscopique de

l'assemblage[4].



Figure I.9 : élément de Stratifié[4].

- Matrice de rigidité dans les axes principaux

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

- Constantes de rigidité réduites dans les axes principaux

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}^2 \frac{E_T}{E_L}} \quad (2)$$

$$Q_{22} = \frac{E_T}{E_L} Q_{11} \quad (3)$$

$$Q_{12} = \nu_{LT} Q_{22} \quad (4)$$

$$Q_{66} = G_{LT} \quad (5)$$

- matrice de rigidité dans les couches de stratifié

Dans le cadre de la théorie classique des stratifiés nous obtenons, pour la couche k :

$$\sigma_k = [Q'_k] \varepsilon \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}'_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \mathbf{k} \quad (7)$$

- **Matrice de rigidité globale [ABD]**

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

- **Matrices A, B et D du stratifié**

$$\mathbf{A} = [A_{ij}] \text{ avec } A_{ij} = \sum_{k=1}^n (h_k^1 - h_{k-1}^1) (Q'_{ij})_k \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = [B_{ij}] \text{ avec } B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) (Q'_{ij})_k \quad (10)$$

$$\mathbf{D} = [D_{ij}] \text{ avec } D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) (Q'_{ij})_k \quad (11)$$

- **Équation constitutive du comportement mécanique des stratifiés**

L'équation constitutive d'une plaque stratifiée exprime les résultantes et moments en fonction des déformations en membrane et des courbures.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

- **Champ des déformations**

Le champ des déformations en un point M est :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

- **Champ des contraintes en un point M**

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Avec :

$$\sigma_{xx} = Q'_{11}\varepsilon_{xx} + Q'_{12}\varepsilon_{yy} + Q'_{16}\gamma_{xy} \quad (15)$$

$$\sigma_{yy} = Q'_{12}\varepsilon_{xx} + Q'_{22}\varepsilon_{yy} + Q'_{26}\gamma_{xy} \quad (16)$$

$$\sigma_{xy} = Q'_{16}\varepsilon_{xx} + Q'_{26}\varepsilon_{yy} + Q'_{66}\gamma_{xy} \quad (17)$$

$$\sigma_{yz} = 0 \quad (18)$$

$$\sigma_{xz} = 0 \quad (19)$$

I.4.2 Les monocouches :

La couche élémentaire, ou strate, constitue l'unité structurelle de base du matériau composite. Elle se compose d'un ou de plusieurs plis identiques, dont l'assemblage définit l'épaisseur minimale du constituant. Le pli est un semi-produit associant fibres et matrice sous une forme quasi-bidimensionnelle, avec une épaisseur standard généralement proche de 0,125 mm. Selon l'architecture du renfort, on distingue trois types de plis [7,10] :

Le pli unidirectionnel (UD) : les fibres sont toutes alignées selon une direction unique.

Le pli tissé : le renfort présente une structure orientée selon deux directions (chaîne et trame).

Le pli mat : les fibres sont disposées de manière aléatoire, offrant une structure isotrope dans le plan. [7]

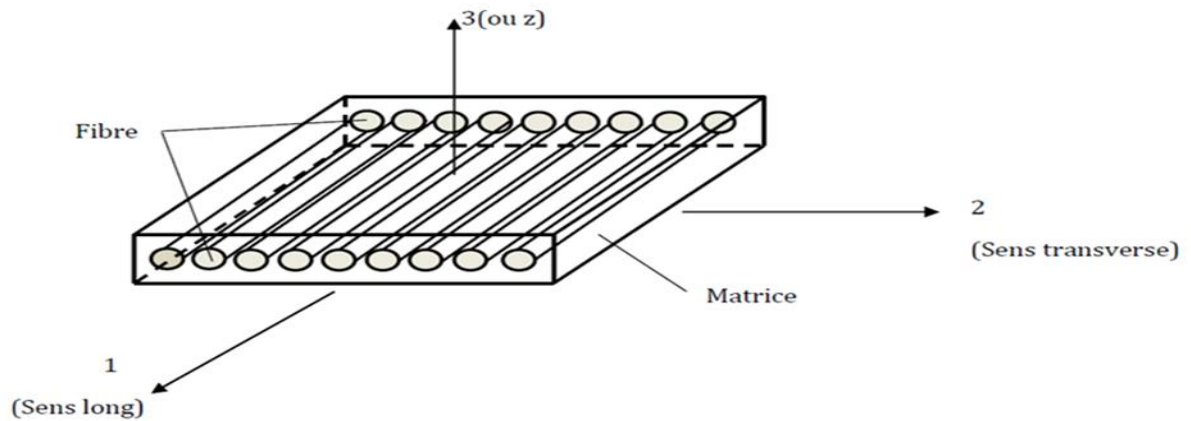


Figure I.10 : Pli a renforcement unidirectionnel.[7]

I.4.3 les sandwichs :

Une structure sandwich se définit par l'association de deux parements rigides et minces enveloppant un noyau épais de faible densité. Cette conception permet de maximiser la rigidité en flexion tout en minimisant la masse totale, répondant ainsi aux exigences de légèreté des secteurs de pointe. En plus de sa résistance structurelle, ce type de matériau se distingue par ses capacités d'isolation thermique, intrinsèques à la nature poreuse ou cellulaire de son âme.

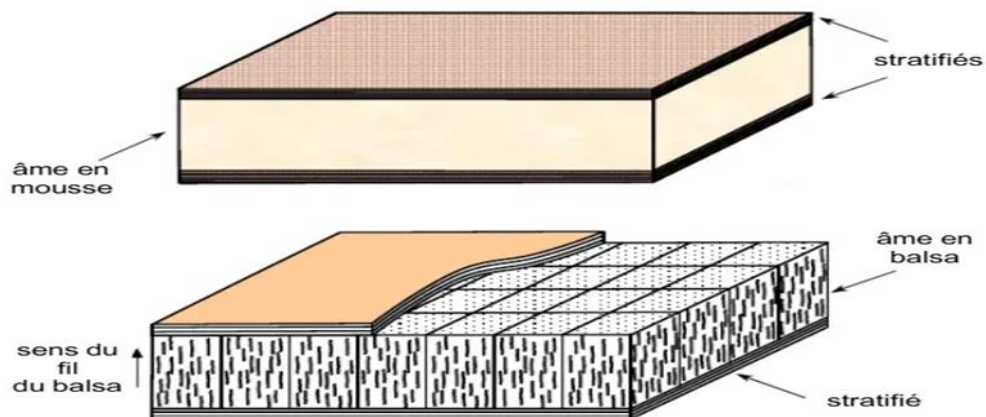


Figure I.11: matériaux sandwichs à âme pleines [4]

I.5. la mise en œuvre des matériaux composites :

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir [4]:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système soit :
 - par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC

I.5.1. Moulage au contact :

Le principe implique de placer les renforts dans un moule, qu'ils soient en matériau mat ou en tissu, imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable [4].

La réalisation de pièces de formes diverses peut se faire à une cadence extrêmement basse.

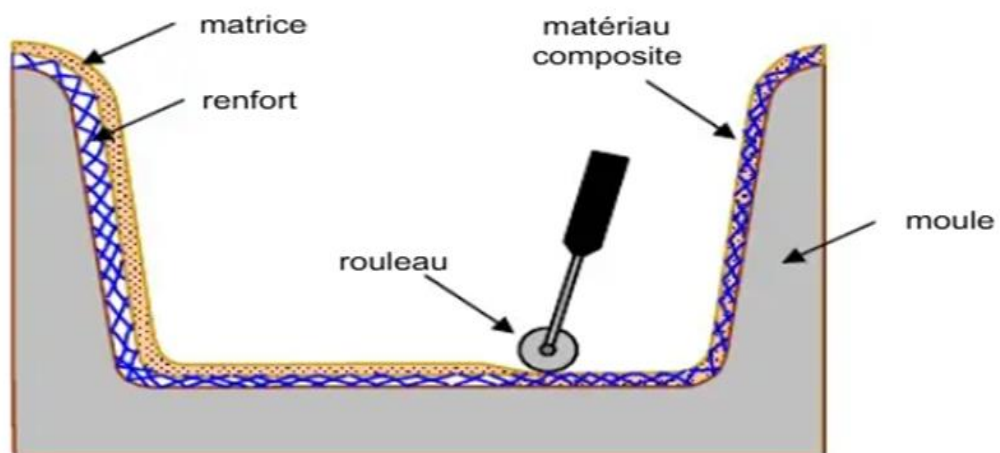


Figure I.12: Procédé de moulage par contact [4]

I.5.2 Moulage par projection simultanée :

Le processus de moulage consiste à projeter simultanément des fibres coupées et de la résine catalysée sur un modèle. L'équipement à déployer comprend une machine de découpe du stratifié et un pistolet appliquant la résine et les fibres coupées, le tout en fonctionnement pneumatique. Ensuite, la couche de fibres imbibées de résine est comprimée et granuleuse au moyen d'un rouleau côtelé. La technique du moulage par projection facilite la production en série de pièces à coût réduit [4].

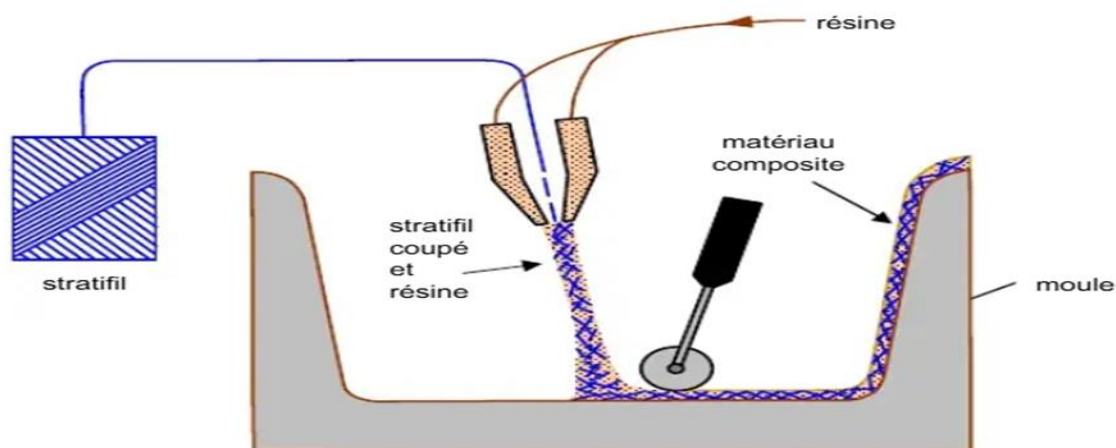


Figure I.13 : Moulage par projection simultanée [4]

I.5.3. Injection thermodurcissable BMC

Le processus de moulage du matériau composite s'effectue entre un moule et un contre-moule préchauffé à une température variant de 140 à 170°C, sous une pression oscillant entre 50 et 100 bars [4].

Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition.

Le compound : c'est de la résine, de la fibre coupée et de la charge.

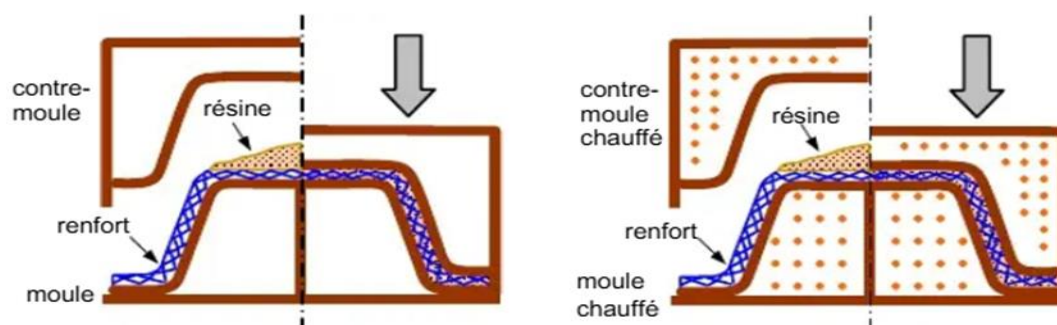


Figure I.14: Injection thermodurcissable BMC [4]

I.6. Caractéristiques des matériaux composites :

Contrairement aux matériaux isotropes classiques, les composites offrent la possibilité d'adapter les propriétés mécaniques en fonction des directions sollicitées. Cette liberté de conception, rendue possible par la stratification, permet de placer la matière et le renfort uniquement là où les contraintes le nécessitent. Au-delà de l'allègement structurel, cette approche favorise une meilleure gestion de la fatigue et des impacts [1,7].

Les avantages distinctifs se résument ainsi :

- Optimisation massique : Excellence du rapport résistance/densité.
- Orientation des performances : Exploitation de l'anisotropie pour un comportement mécanique directionnel.
- Durabilité environnementale : Résistance intrinsèque à l'oxydation et aux agressions chimiques.
- Intégration de fonctions : Réalisation de géométries complexes par moulage, simplifiant l'architecture globale des systèmes [1-7].

I.7 Mécanisme de rupture et d'endommagement des matériaux composites :

La fracture d'un composite unidirectionnel résulte de l'accumulation de différents mécanismes élémentaires tels que [4] :

- la rupture des fibres
- la rupture transverse de la matrice
- la rupture longitudinale de la matrice
- la rupture de l'interface fibre-matrice (décohésion fibre-matrice)
- la rupture de l'interface inter-ply (délaminage)

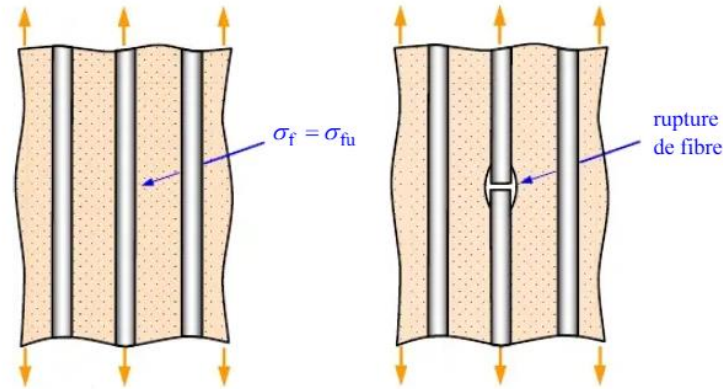
Tableau.I.5. Divers mécanismes de rupture

Fibre	Matrice	Interface
-rupture des fibres	-rupture transverse de la matrice -rupture longitudinale de la matrice	-décohésion fibre-matrice -délaminage inter-ply

I.7.1 La rupture des fibres :

La rupture des fibres se produit lorsque la contrainte de tension σ_f appliquée sur une fibre atteint la contrainte de rupture σ_{fu} de cette même fibre. La rupture de la fibre engendre une concentration de contraintes près de l'endroit de la rupture. La répartition de ces contraintes, et de ce fait le processus de rupture qui en découle, dépend essentiellement de [4] :

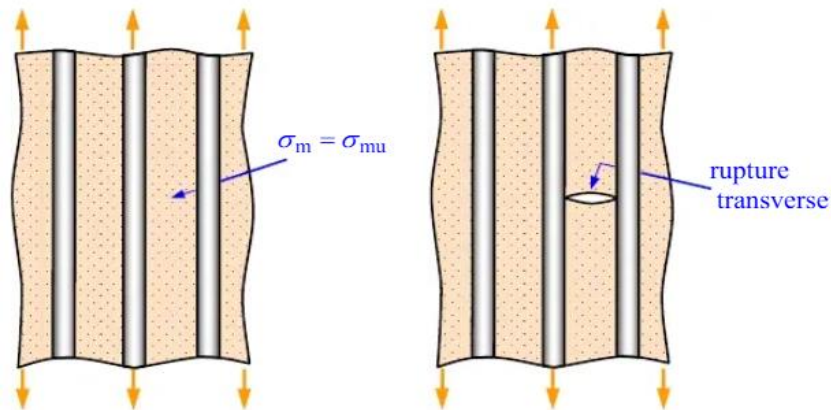
- de la contrainte à la rupture des fibres.
- de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée.
- des propriétés de l'interface fibre-matrice.



Figur.I.15 Rupture de la fibre [4]

I.7.2.La rupture transverse de la matrice :

La matrice peut se fracturer, soit à travers une fissure transversale (figure.I.16), soit à travers une fissure longitudinale (figure.I.17) [4].



Figur.I.16.Rupture transverse de la matrice [4]

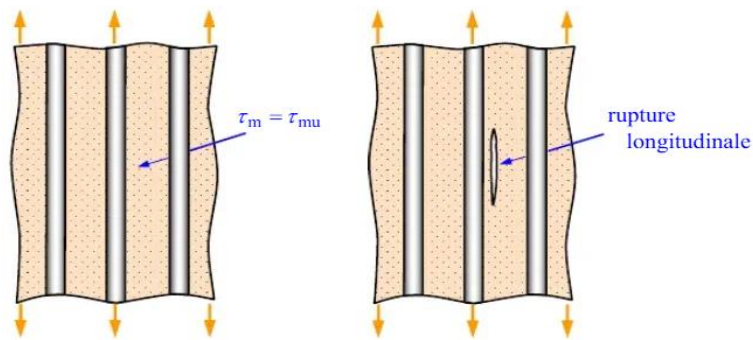


Figure.I.17.Rupture longitudinale de la matrice [4]

I.7.3.Décohésion fibre-matrice

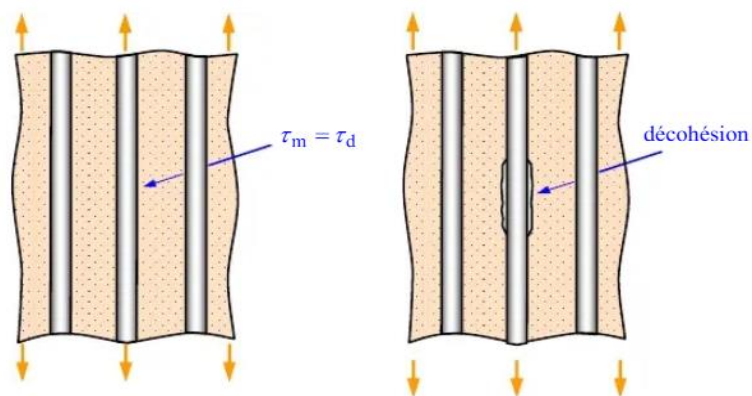


Figure.I.18.Décohésion fibre-matrice [4]

I.7.4.Le Délaminage :

Le délaminage est l'une des formes de rupture les plus préoccupantes et critiques que l'on trouve dans les structures stratifiées en matériaux composites. Cela implique une distinction physique des plis (strates) contigus à l'intérieur d'un stratifié. Les contraintes entre les couches sont responsables de l'émergence et de l'évolution du délaminage [15].

I.8. Domaines d'application :

L'usage des composites est guidé par la recherche de légèreté, de résistance à la corrosion et de liberté de forme. Ils sont présents dans [5-11] :

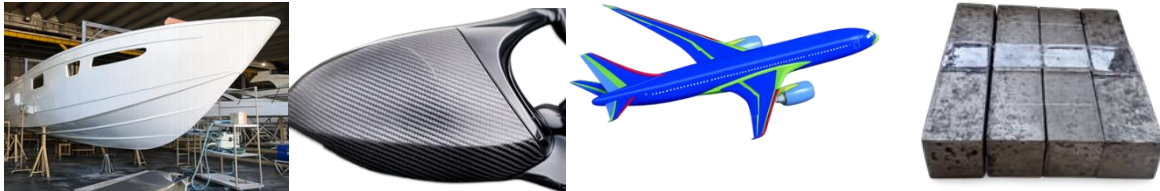


Figure.I.19 Exemples d'application des matériaux composites

Aéronautique et Spatial : Structures d'ailes, fuselages d'avions (comme l'Airbus A350 ou le Boeing 787), pales d'hélicoptères et composants de satellites.

Transport Terrestre : Les plaquettes de frein, Pièces de carrosserie, châssis de voitures de sport, composants de carrosserie de trains à grande vitesse (TGV).

Énergie : Fabrication des pales d'éoliennes (pour leur résistance à la fatigue et leur légèreté).

Sport et Loisirs : Cadres de vélos, raquettes de tennis, skis, mâts de bateaux et coques de navires de plaisance.

Génie Civil : Renforcement de structures en béton, tabliers de ponts et réservoirs de stockage de produits chimiques. Construction navale : fabrication des coques des bateaux.

Chapitre II :

Elaboration des composites stratifiés

Chapitre II : Elaboration des composites stratifiés

II.1 Introduction :

L'élaboration des plaques composites étudiées dans ce travail a été réalisée au sein du Laboratoire de recherche en génie des matériaux et structures de l'Université. Ce cadre académique offre un environnement de pointe dédié à l'innovation structurelle et à la caractérisation physico-chimique et mécanique des nouveaux matériaux.

Le but principal de cette recherche expérimentale consiste à concevoir et fabriquer des variantes de plaques composites stratifiées hybrides. Cette étude s'inscrit dans une démarche d'optimisation des propriétés mécaniques en associant des matériaux de natures différentes pour répondre à des exigences de résistance, de rigidité et de durabilité.

II.2. Les matériaux composites à élaborer :

Pour examiner l'impact du renfort sous forme de grille en acier galvanisé et du tissu de verre, au sein d'une structure stratifiée, trois différentes plaques de composite ont été élaborées :

a : Plaque Epoxy/Tissu de verre : Constituée uniquement de plis de fibres de verre imprégnées de résine époxy, servant de référence pour les propriétés de base.

b : Plaque Epoxy/Grille d'acier : Composée d'un empilement de grilles en acier galvanisé dans la matrice époxy, permettant d'étudier le comportement spécifique stratifié monocouche

c : Plaque Hybride (Epoxy/Tissu de verre/Grille d'acier) : Ces plaques combinent les deux types de renforts afin de créer une synergie entre la légèreté des fibres de verre et la rigidité structurale de l'acier galvanisé.

Ce protocole expérimental vise à comparer les performances de chaque système et à identifier l'apport réel de l'hybridation métal-fibres de verre sur la résistance ultime des plaques.

II.3. Présentation des matériaux :

II.3.1. La résine Epoxy

La résine époxy mise en œuvre est désignée sous l'appellation MEDAPOXY PRIMER A114 de la marque GRANITEX. Elle est constituée de deux composants, A et B, qui représentent respectivement la résine et son durcisseur, comme illustré à la Figure II.1. Le tableau II.1 synthétise les caractéristiques physiques et mécaniques de la résine.

Tableau II.1 : les caractéristiques de la résine MEDAPOXY PRIMER A114 [9].

Propriété	Valeur
Densité (g/cm ³)	1,2
Viscosité (CF6/20°C) (s)	53
Adhérence (MPa)	3
Résistance à la traction (MPa)	57
Résistance à la compression (MPa)	70
Durcissement complet à 20°C (Jour)	7

Elément A: Résine époxy**Elément B:** durcisseur**Figure II.1** : Matrice composée de résine(A) et durcisseur(B)

II.3.3. Le tissu de verre

Le matériau en verre (Figure II.2) employé est un tissu fait de fils de verre E continus tissés de façon bidirectionnelle. Le tableau II.2 résume ses caractéristiques.

Tableau II.2 : les propriétés de fibre de verre-E [1]

Propriété	Valeur
Résistance à la traction (MPa)	2500
Module de Young (GPa)	25
Module de cisaillement (GPa)	30
Coefficient de poisson	0,25
Densité (g/cm ³)	2,60
L'allongement (%)	3,5

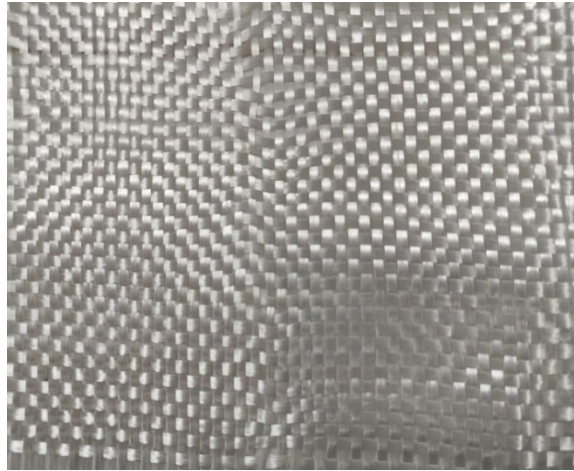


Figure II.2 : le tissu de verre

II.3.4. tamis en acier galvanisé

Le tamis en acier galvanisé (Figure II.3) utilisé est conçu à partir de fils d'acier au carbone galvanisé ondulés de 0,15 mm de diamètre, présentant une maille unitaire de 1x1x0,3 mm. Le tableau II.3 résume les caractéristiques physiques et mécaniques de l'acier .

Tableau II.3 : Les propriétés de tamis en acier galvanisé [1]

Propriété	Valeur
Résistance à la traction (MPa)	400
Module de Young (GPa)	205
Module de cisaillement (GPa)	79
Coefficient de poisson	0,30
Densité (g/cm ³)	7,85
L'allongement (%)	1,8 -10



Figure II.3 : Tamis en acier galvanisé

II.4. Matériels utilisés pour l'élaboration :

II.4.1 Le moule

Le moule de dimension 450*250*80mm. a été produit au niveau de laboratoire de génie mécanique pour les besoins de notre travail. Il est constitué de cinq plaques de verre.



Figure II.4 : moule utilisé pour l'élaboration des plaques

II.4.2 Le rouleau

Utilisé pour répartir uniformément la résine lors du processus de moulage. et créer une compression pour faire évacuer les vides.



Figure II.5 : rouleau

II.4. 3 la vaseline

Utilisé comme lubrifiant pour faciliter le démoulage.



Figure II.6 : vaseline

II.5. La procédure d'élaboration :

Nous avons réalisé la préparation du stratifié en respectant les étapes énoncées ci-dessous :

- Préparation du moule



- Application de la vaseline pour rendre le démoulage plus facile.
- Mise en place du tissu de verre à l'intérieur de moule.



- Versement d'une quantité de résine avec durcisseur au-dessus de tissu (imprégnation du tissu par la résine).



- Finition



- Durcissement : Laisser le matériau composite ainsi élaboré durcir à l'air libre

Pour les autres plaques, la même procédure est appliquée, en considérant les plis nécessaires

II.6. La préparation des éprouvettes :

Suite au démoulage des plaques en composites, On les coupe avec une Scie à ruban (Figure II.7) au sein de l'atelier de menuiserie.



Figure II.7: Scie à ruban

II.6.1. Les éprouvettes d'essai de traction :

Les éprouvettes sont confectionnées selon la spécification ASTM D3039, présentant une forme rectangulaire plane de 250 mm de long et 25 mm de large (Figure II.8) [11].



Figure II.8 : La configuration de l'éprouvette utilisée dans les essais de traction.

La Figure II.9 ci-après illustre les éprouvettes de traction testées pour les trois composites préparés.



Figure II.9 : Les échantillons d'épreuve en traction conformes à la norme ASTM D3039.

Chapitre III : Caractérisation des composites stratifiés

Chapitre III : Caractérisation des composites stratifiés

III.1.Introduction :

Afin de caractériser des stratifiés composites élaborés, deux essais mécaniques ont été effectués.

- Le premier concerne un test de traction directe que nous avons effectué à l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement de l'Université M'Hammed Bougara de Boumerdès . En ce qui concerne le second essai, il s'agit d'un essai de flexion que nous avons mené au niveau de la même unité.

III.2 Les données utilisé pour caractériser les composites

La loi des mélanges :

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

- **La fraction volumique des fibres**

Nous avons pris $V_f=60\%$

- **la fraction volumique de résine**

$$V_c = V_f + V_m$$

$$V_m = V_c - V_f \text{ avec } V_c = 100\%$$

$$V_m = 100\% - 60\%$$

$$V_m = 40\%$$

Tableau III.1 : fraction volumique

V_c	V_f	V_m
100%	60%	40%

V_c : fraction volumique de composites

V_f : fraction volumique des fibres

V_m : fraction volumique de résine

III.3. Caractérisation mécanique:

III.3.1 L'essai de traction:

Les tests de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine universelle « ZwickRoell » (figure III.1), dotée d'un capteur de force ayant une capacité de 10 kN. Cette machine est connectée à un ordinateur qui évalue les forces et les mouvements à l'aide d'un logiciel nommé « TestXpert », comme illustré dans la figure III.2. Nous avons également employé un extensomètre pour quantifier l'allongement de l'éprouvette. Le test utilise une vitesse de 2mm/s.



Figure III.1: la machine universelle (ZwickRoelle)

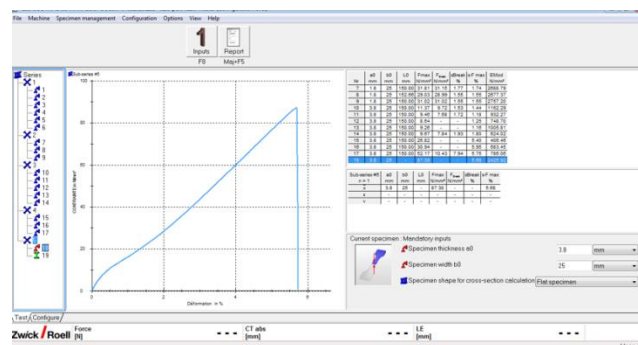


Figure III.2: l'interface de programme (TestExpert)

III.3.1.1.composites Epoxy/ tissu de verre :

Les graphiques représentant la contrainte et la déformation obtenus à partir des tests de traction réalisés sur le composite époxy/tissu de verre sont présenté dans la figure III.3. L'exploitation de ces données expérimentales permet d'évaluer le module d'élasticité ainsi que la résistance à la rupture du matériau . Les valeurs numériques ainsi déduites sont synthétisées dans les tableaux III.2.

Tableau III.2 : les caractéristiques du composite Epoxy/Tissu de verre

Eprouvette	E(Mpa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	σ_e (mpa)	ϵ_e (%)
1	2393,19	26,82	0,57	23,006	0,47
2	2830.16	30,94	0,63	29,58	0,51
3	3433,63	52,17	0,73	46,9	0,47
Moyenne	2885,66	36,64	0,64	33,162	0,48

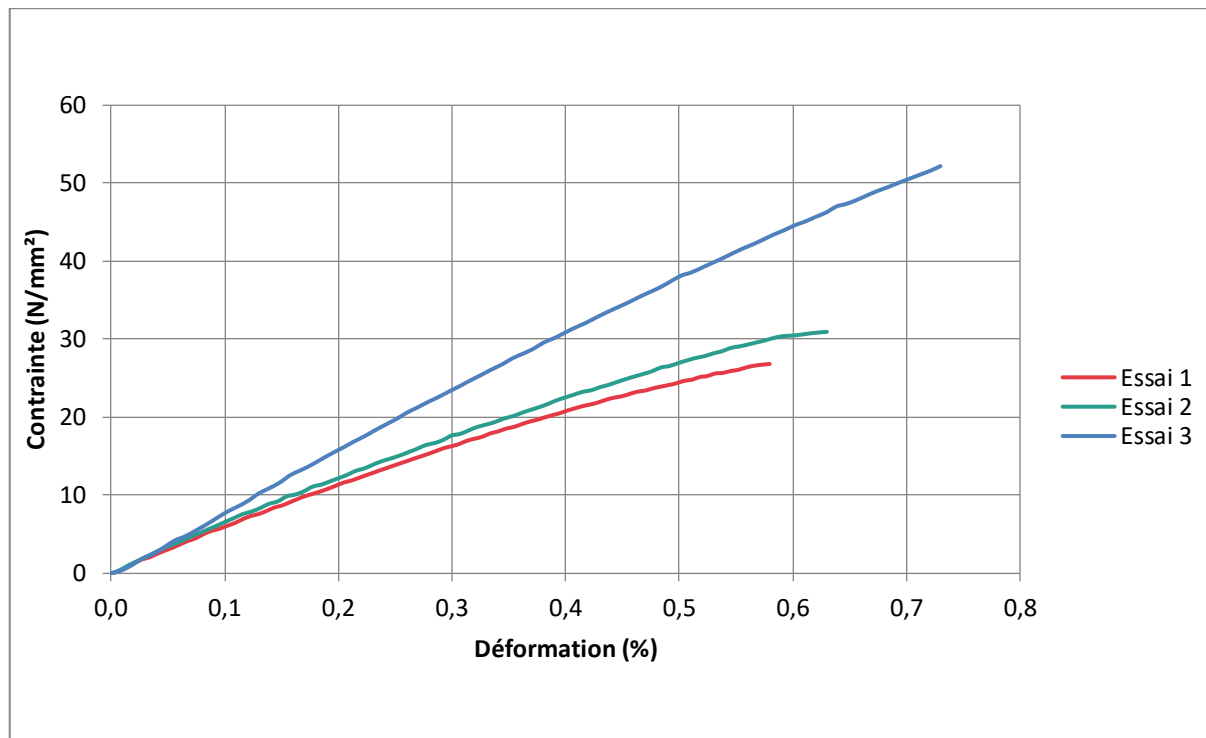


Figure III.3 : les courbes de contrainte-déformation du composite Epoxy/Tissu de verre

L'analyse du comportement illustré par la figure III.3 montre un comportement presque linéaire élastique. Le mode de rupture observé est fragile. La valeur la contrainte ultime est de 52,17 MPa avec une déformation correspondante au pic de $\epsilon_{max} = 0,73$ (%).

III.3.1.2. Composite Epoxy/grille en acier galvanisé :

La figure III.4 illustre les graphes montrant la progression des contraintes par rapport à la déformation lors des tests de traction du composite Epoxy/acier galvanisé. Sur la base de ces tests, nous avons établi le module d'élasticité et la contrainte de rupture. Les tableaux III.3 présentent les résultats acquis.

Tableau III.3 : les caractéristiques du composite Epoxy/Tissu de Acier galvanisé

Eprouvette	E(Mpa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	σ_e (mpa)	ϵ_e (%)
1	2688,79	45,81	1,74	43,82	1,4
2	2677,37	40,03	1,54	29,75	0,9
3	2757,20	50,02	1,56	42,62	1,17
Moyenne	2707,79	45.28	1,61	20,25	1,15

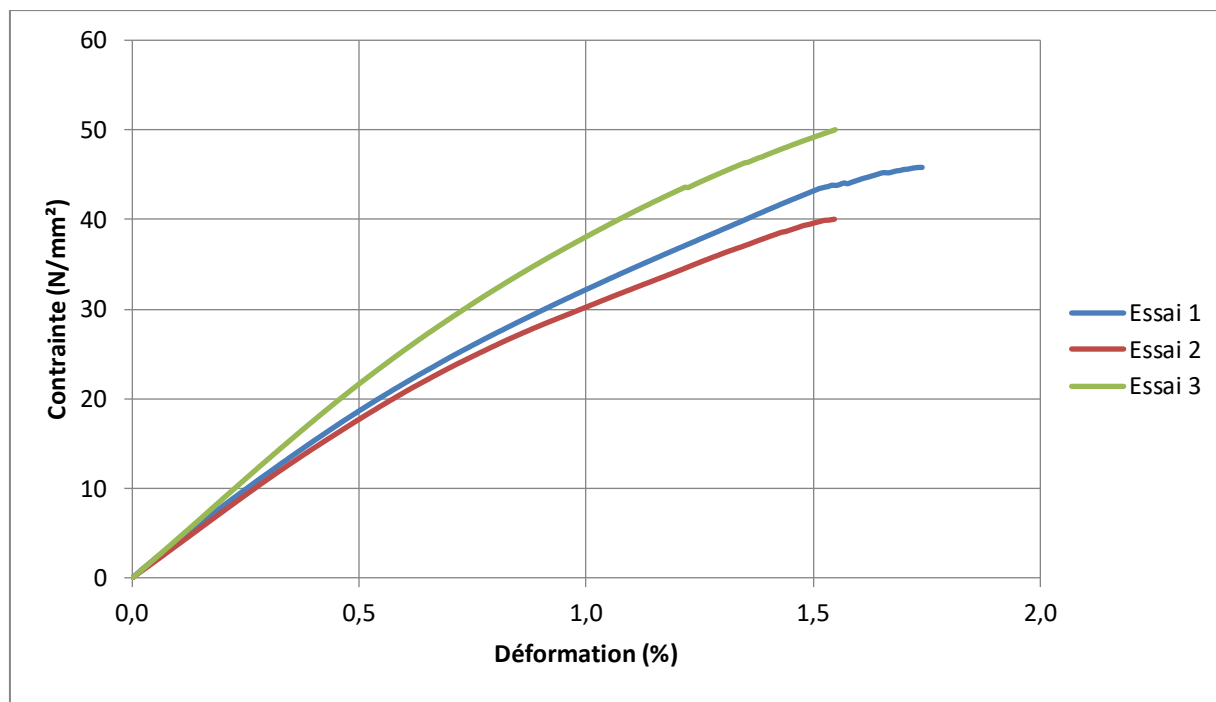


Figure III.4 : les courbes de contrainte-déformation du composite Epoxy/Acier galvanisé

L'analyse du comportement illustré par la figure III.4 montre un comportement presque linéaire présentant une certaine courbure, ce qui nous rapproche d'un comportement plus au moins ductile. La valeur la contrainte ultime es de 50,02 MPa avec une déformation correspondante au pic de $\epsilon_{\max} = 1,56$ (%). On remarque une légère diminution de la contrainte de rupture comparativement au cas du composite Epoxy/Tissu de verre, avec une amélioration importante de la déformabilité du matériau.

III.3.1.3 Composite Hybride:

La figure III.5 illustre la courbe décrivant l'évolution des contraintes en relation avec la déformation lors des tests de traction effectués sur le composite hybride. Sur la base de ces tests, nous avons établi le module d'élasticité et la contrainte de rupture. Le tableau III.4 présente les résultats obtenus.

Tableau III.4 : les caractéristiques du composite Hybride

Eprouvette	E (MPa)	σ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)
Moyenne	2425,92	87,3013	5,68

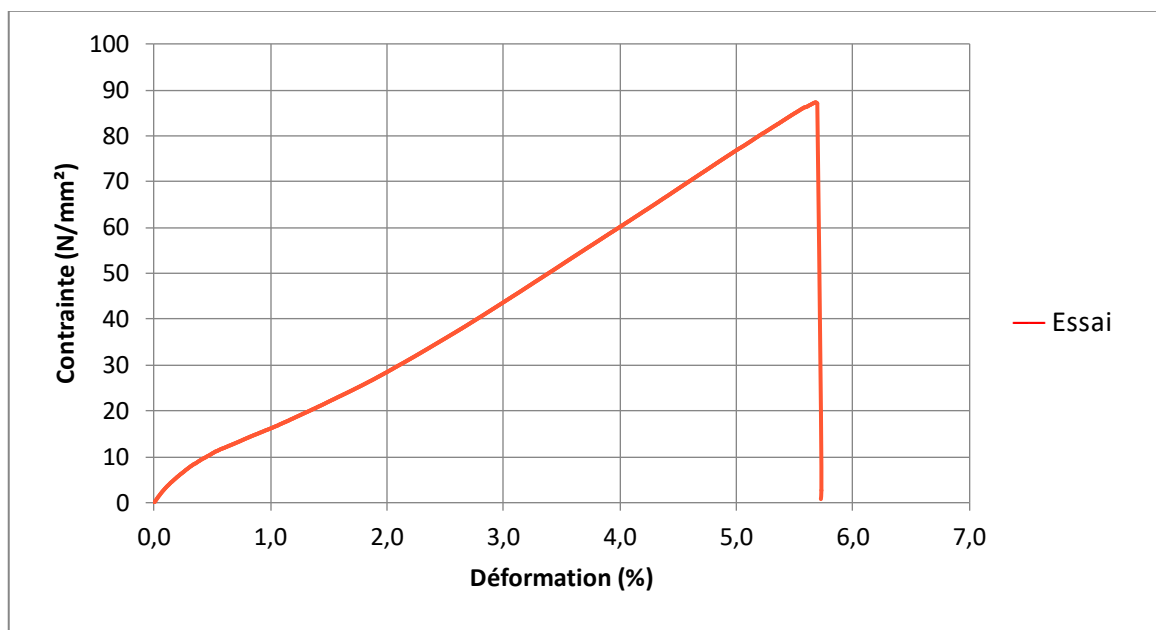


Figure III.5 : la courbe de contrainte-déformation du composite Hybride

Pour ce cas du composite, on obtient un comportement fragile. La contrainte ultime est de 87,3 MPa le composite est très déformable. Pour ces stratifiés, on observe une rupture brutale lorsque la contrainte maximale est atteinte, ce qui montre leur fragilité. Cette rupture peut être due à la rupture totale des fibres ou à la rupture de la matrice.

III.3.2 L'essai de flexion :

Les tests de flexion en trois points ont été réalisés à température ambiante à l'aide d'une machine de flexion ZwickRoell, dotée d'une capacité d'appui de 3 mm (Figure III.6), et capable de mesurer des forces allant jusqu'à 2,5 kN.



Figure.III.6. Machine de flexion ZwickRoelle.2,5 kN.

Le programme TextXpert enregistre les fluctuations de la force appliquée ainsi que l'amplitude maximale. On calcule les contraintes au centre de l'éprouvette à l'aide de la formule ci-dessous.

$$\sigma = \frac{3FL}{2ab^2} \quad (\text{III.1})$$

σ : la contrainte (MPa)

F : la force (N)

L : la distance entre les appuis (mm)

a : la largeur d'Eprouvette (mm)

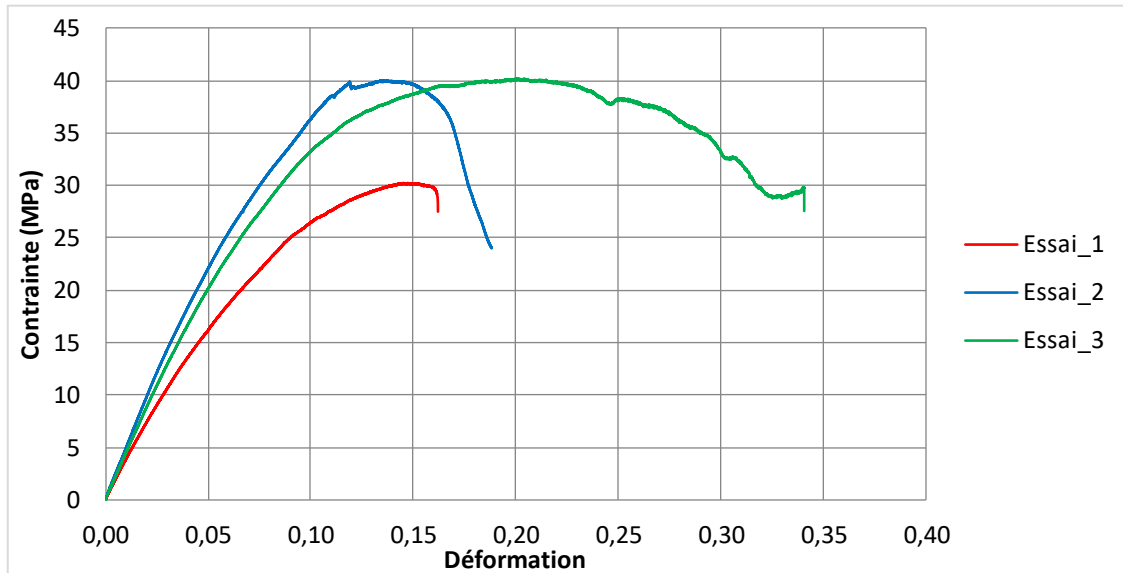
b : l'épaisseur de l'Eprouvette (mm)

III.3.2.1.Composites Epoxy/tissu de verre

La figure III.7 illustre les graphes démontrant les variations des contraintes par rapport à la déformation lors des tests de flexion du matériau Epoxy/tissu de verre. Sur la base de ces tests, nous avons établi le module d'élasticité et la contrainte de rupture. Les tableaux III.5 exposent les résultats obtenus.

Tableau.III.5. les caractéristiques du composite Epoxy/Tissu de verre

Eprouvette	σ (MPa)	E(MPa)	ϵ (%)
1	30,238	313,1	0.16
2	40,034	416,7	0.18
3	40,209	425,2	0.22
Moyenne	36,827	385	0.18

**Figure III.7:** les courbes des contrainte-déformation du composite Epoxy/tissu de verre

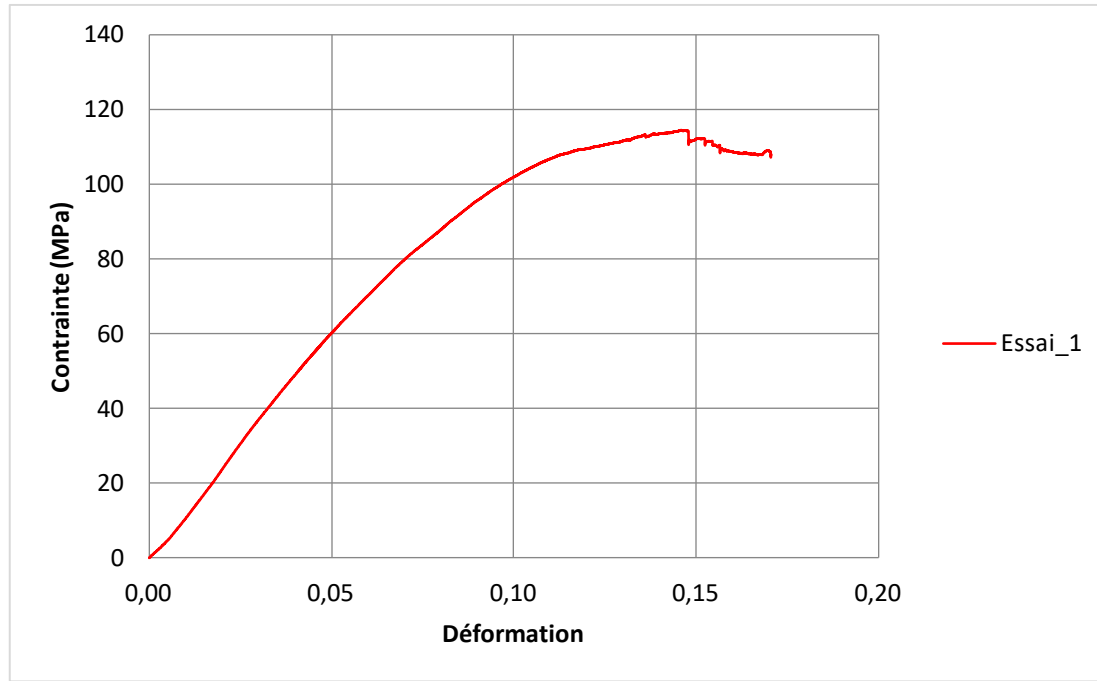
L'analyse du comportement illustré par la fig III.7 montre un comportement ductile avec une courbure prononcée. La valeur de la contrainte ultime est de 40,21 MPa avec une déformation correspondante au pic de $\epsilon_{\max} = 0,22$ (%).

III.3.2.2. Composite Epoxy/grille en acier galvanisé :

La figure III.8 illustre les graphiques qui montrent l'évolution des contraintes selon la déformation lors des tests de flexion du composite Epoxy/grille en acier galvanisé. Sur la base de ces tests, nous avons établi le module d'élasticité et la contrainte de rupture. Les tableaux III.6 illustrent les résultats obtenus.

Tableau.III.6. les caractéristiques du composite Epoxy/acier galvanisé

Eprouvette	σ (MPa)	E(MPa)	ϵ (%)
moyenne	114,388	1251,2	0.17

**Figure.III.8.** les courbes des contrainte-déformation du composite Epoxy/acier galvanisé

D'après la figure II.8 on remarque une amélioration en termes de résistance comparativement au cas précédent, La contrainte de rupture est de 114,4 MPa pour une déformation de rupture correspondante plus faible de 0,17%. Ce type de composite peut être préconisé pour les structures nécessitant des résistances élevées.

III.3.2.3 Composite Hybride:

La figure III.9 illustre les graphes montrant l'évolution des contraintes par rapport à la déformation lors des tests de flexion effectués sur le matériau composite Epoxy/ grille d'acier galvanisé. Sur la base de ces tests, nous avons établi le module d'élasticité et la contrainte de rupture. Le tableau III.7 présente les résultats obtenus.

Tableau.III.7. les caractéristiques du composite Hybride

Eprouvette	σ (MPa)	E(MPa)	ϵ (%)
1	87,011	1650,1	0.12
2	88,158	2104,1	0.121
3	67,397	698,2	0.23
moyenne	80,86	1484,1	0.15

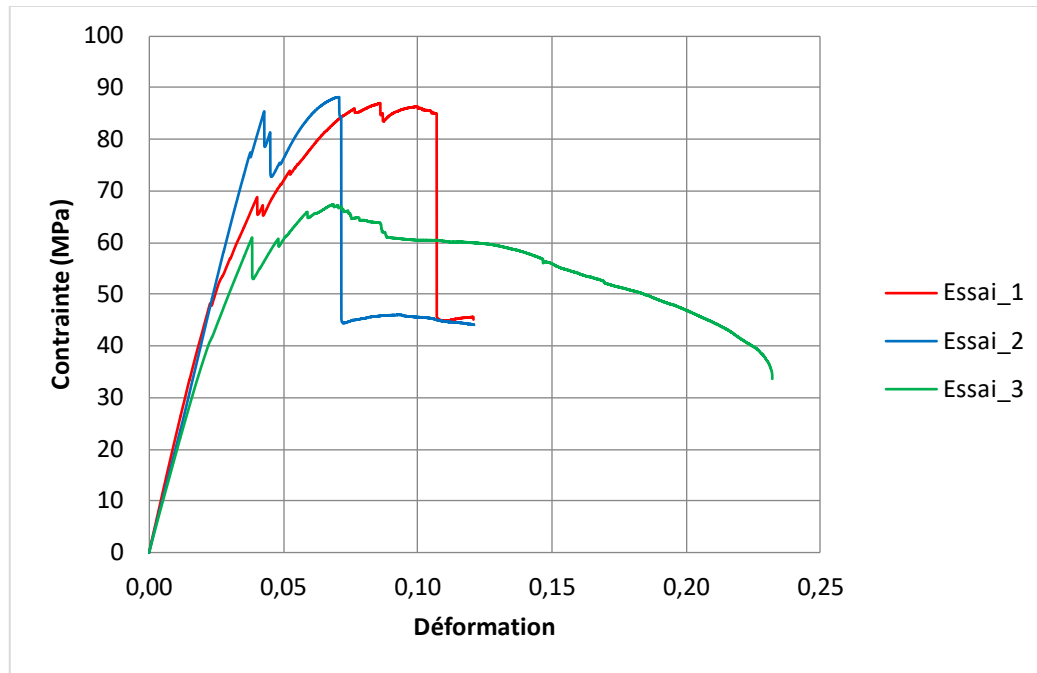


Figure.III.9. les courbes des contrainte-déformation du composite Hybride

Pour ce composite, d'après la figure III.9 on remarque qu'à la fin du domaine élastique, une chute de la résistance. Elle passe de 85,30 MPa à 72 MPa. Par la suite, la résistance augmente pour atteindre 88,158 MPa puis chute brutalement. La déformation au pic correspondante est de 0,121 %.

En conclusion, on peut formuler ce qui suit :

- **monocouche Epoxy/tissu de verre** : Malgré l'utilisation de fibres continues, la faible section transversale (monocouche) entraîne une flèche importante pour des charges réduites. Ce cas illustre l'influence critique de l'épaisseur du pli sur l'inertie de la section et la résistance globale en flexion .
- **monocouche Epoxy/acier galvanisé** : Le comportement est linéairement élastique jusqu'à une rupture fragile et soudaine, typique des matériaux à faible taux de renfort où la matrice époxy supporte une part importante des efforts.
- **composite Hybride** : Les courbes montrent un comportement stable avec une charge maximale moyenne élevée, bénéficiant de la synergie entre les différents renforts. La rupture est progressive, ce qui indique une bonne résistance à la délamination et une absorption d'énergie optimisée par l'hybridation.

Chapitre IV : Simulation numérique

Chapitre IV : Simulation numérique

IV.1 Introduction :

La simulation numérique par la méthode des éléments finis appliquée aux problèmes de mécanique constitue aujourd'hui un outil scientifique incontournable, permettant de mener des études approfondies tout en réduisant le recours aux approches expérimentales et empiriques de type essai-erreur, généralement plus coûteuses en temps et en moyens. [13 ,14]

Abaqus est une suite de simulation d'ingénierie puissante basée sur la méthode des éléments finis. Il peut traiter des problèmes allant des analyses linéaires simples aux simulations non linéaires complexes. Abaqus offre une bibliothèque étendue d'éléments pour modéliser diverses géométries et une large gamme de modèles de matériaux, y compris les métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, le béton armé, les mousses, les sols et les roches. Conçu comme un outil de simulation polyvalent, Abaqus n'est pas limité aux problèmes structurels mais simule également : Transfert de chaleur, Diffusion de masse, Couplage thermoélectrique (gestion thermique des composants électriques) Acoustique, Mécanique des sols (analyses couplées fluide-pore-contrainte), Analyse piézoélectrique. Cette polyvalence rend Abaqus adapté à de nombreux besoins en simulation d'ingénierie. Il prend en charge une large gamme d'applications de simulation linéaire et non linéaire. Il modélise des problèmes avec plusieurs composants en reliant la géométrie de chaque composant à des modèles de matériaux appropriés et en définissant leurs interactions. Pour les analyses non linéaires,

il sélectionne automatiquement : Les incréments de charge appropriés, Les tolérances de convergence, Ajuste ces paramètres de manière dynamique pendant la simulation, Cela garantit des solutions efficaces et précises tout au long de l'analyse. [13]

Dans ce chapitre, nous présentons d'une part les différentes étapes de modélisation des stratifiés monocouches et hybrides, constitués de deux couches en fibres de verre et de deux couches de grille métallique inoxydable disposées en alternance, soumis aux essais de flexion et de traction jusqu'à rupture. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre. En s'appuyant sur des travaux de recherche et en tenant compte du comportement mécanique des matériaux constitutifs, la démarche adoptée permet de reproduire fidèlement le comportement des structures étudiées. L'interaction entre les différentes couches ainsi que les étapes d'assemblage, de chargement et de simulation des stratifiés sont également mentionnées.

IV.2 Étapes de simulation numérique avec le logiciel ABAQUS

Pour imiter notre tâche, nous avons traversé successivement les neuf modules de ABAQUS, à savoir : Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job et Visualisation. Il est important de noter que le logiciel ABAQUS n'assure pas la gestion des unités. Il incombe donc à l'utilisateur de sélectionner un système d'unités approprié [14].

Tableau IV.1. Système d'unités dans Abaqus.

Longueur	mm
Force	Newton
Masse	kg
Contrainte	Mpa
Densité	Kg/m ³

Abaqus comprend deux produits distincts : Abaqus /Standard et Abaqus /Explicit.

- Le solveur Abaqus /Standard est un solveur polyvalent qui utilise un schéma d'intégration implicite classique.
- Le solveur Abaqus /Explicit utilise une méthode d'intégration explicite pour traiter des problèmes non linéaires dynamiques ou quasi-statiques.
- Abaqus /CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les deux solveurs.
- Abaqus /CFD (Computational Fluid Dynamic) Module dédié pour le couplage fluide-structure.

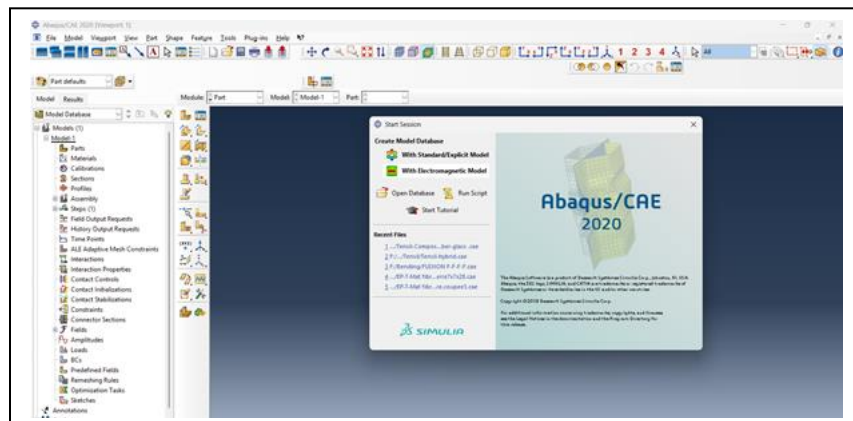


Figure IV.1 : L'interface d'Abaqus/CAE version 2020.

IV.2.1.Premier module : *Part*

Au cours de cette étape initiale, l'utilisateur illustre tous les éléments du problème. Chaque composant est généré via l'instrument Create Part.

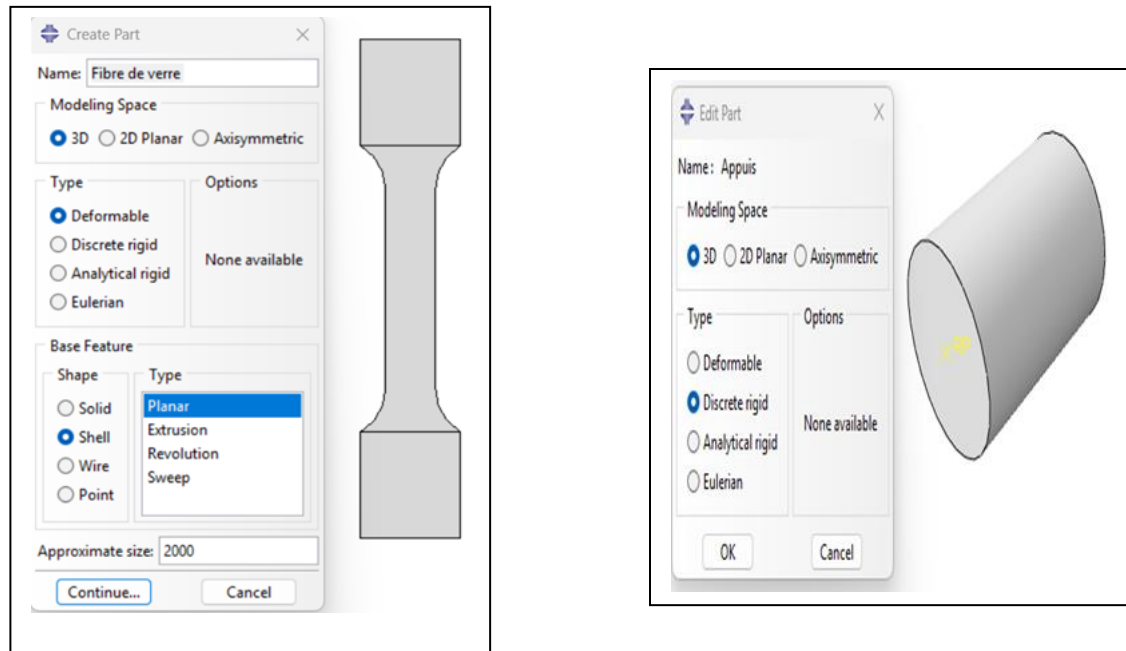


Figure IV.2 : Modélisation des géométries des éléments.

IV.2.2 Deuxième module : *Property*.

Les modèles des matériaux définis dans cette section tiennent en compte du comportement non linéaire et anisotrope des matériaux utilisés pour le stratifié afin de reproduire fidèlement leur réponse mécanique sous chargement.

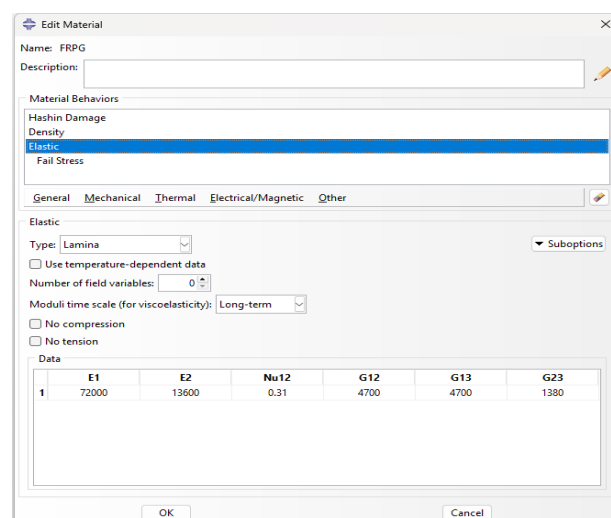


Figure IV.3 : Propriétés mécaniques de chaque matériau.

IV.2.3 Troisième module : *Assembly*

Dans cette étape nous avons rassemblé toutes les pièces avec « create instance » afin de modéliser le phénomène physique.

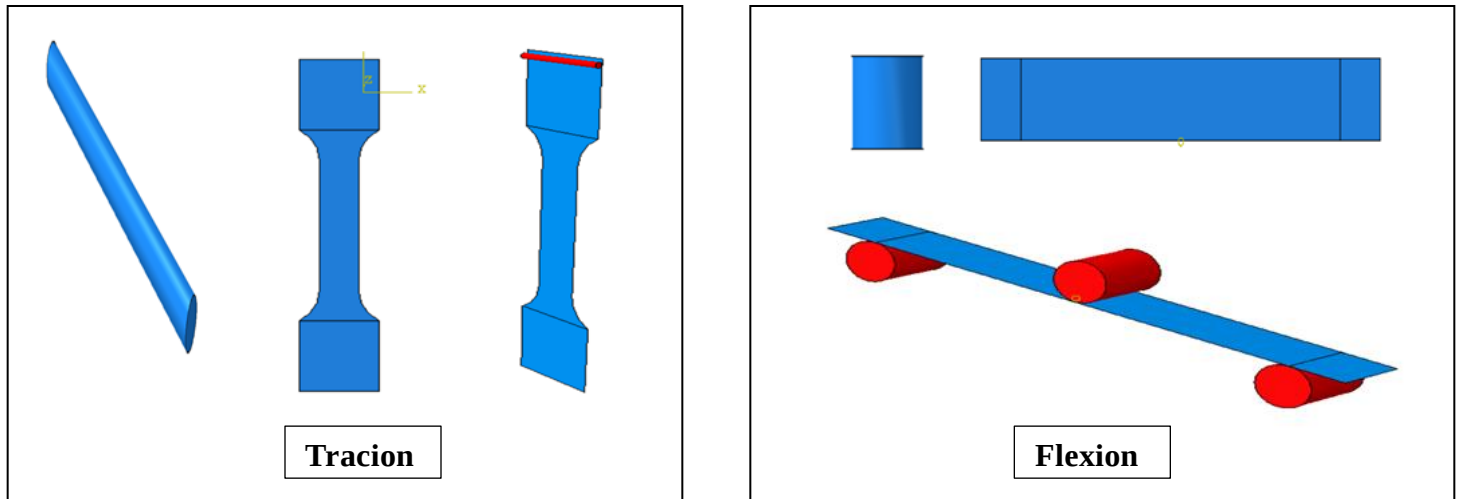


Figure IV.4 : Assemblage des éléments Appuis - Composite.

IV.2.4 Quatrième module : *Step*

Ce module regroupe tous les paramètres de calcul utilisé dans les calculs avec le logiciel Abaqus . il détermine aussi l'incrément et la valeur du temps final, pour notre travail nous avons choisi l'analyse statique générale (Static, General) afin de simuler le comportement mécanique des stratifiés soumis à des chargements quasi-statiques.

Field output nous permet de spécifier les variables qui sont enregistrées au cours de l'analyse afin d'évaluer le comportement du modèle.

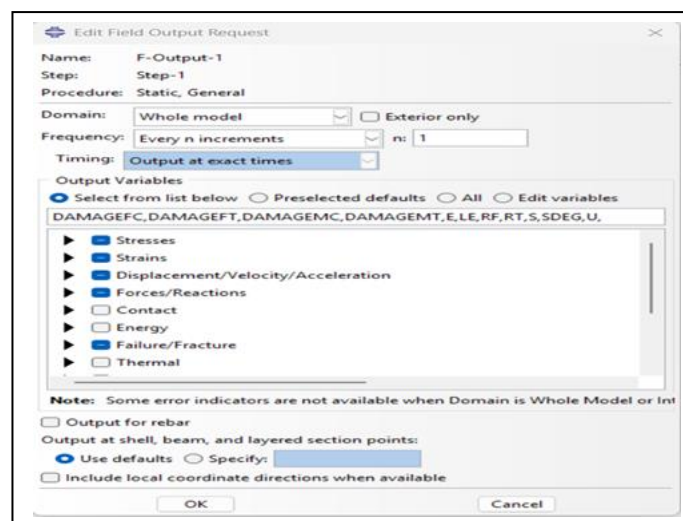


Figure IV.5 : Le module STEP.

IV.2.5 Cinquième module : Interaction

Le module d'interaction permet d'établir les relations entre les différentes composantes du modèle. Il spécifie les interactions entre chaque élément et pose les premières hypothèses concernant les contacts, les contraintes et possibles connexions.

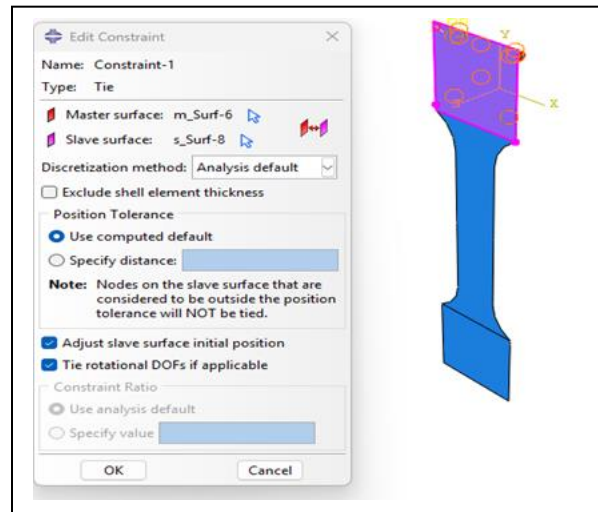
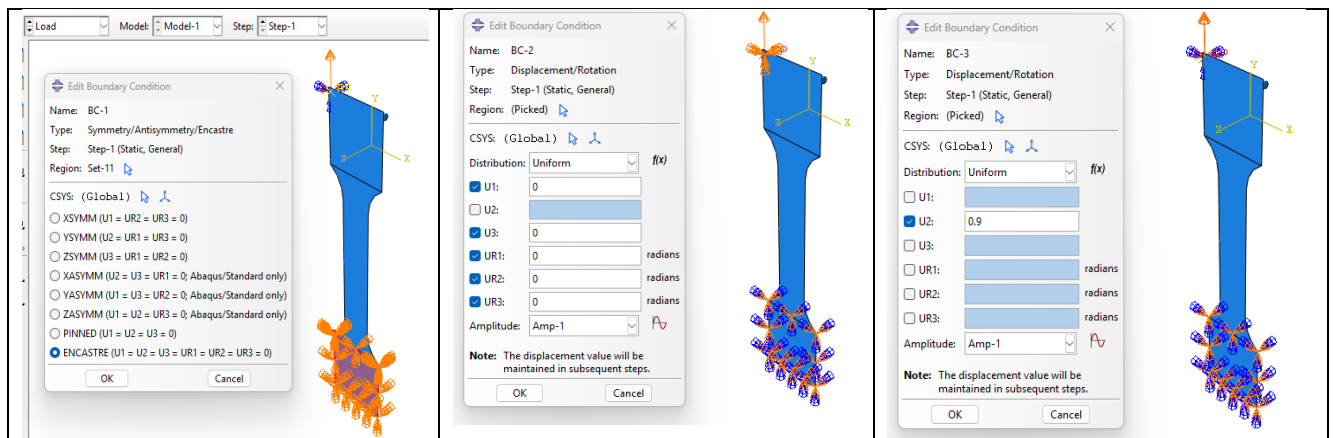


Figure IV.6 : Modélisation des interactions du contact et des conditions d'appui.

IV.2.6 Sixième module : Load

Le module Load permet de définir les conditions aux limites ainsi que les sollicitations mécaniques appliquées aux modèle analytique.



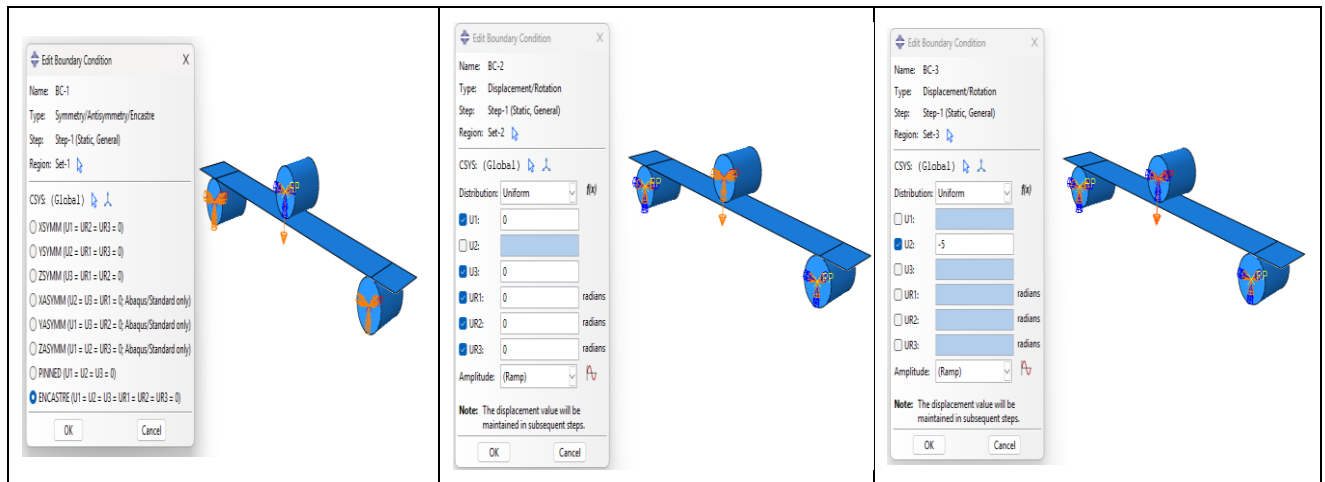


Figure IV.7 : Application des Conditions aux limites et des sollicitations externes

IV.2.7 Septième module : Mesh

Le maillage généré constitue la base des résultats numériques. En général, seules les zones susceptibles de présenter des phénomènes importants sont soumises à un maillage détaillé, tandis que les autres structures sont soumises à un maillage plus grossier. Cependant, en recourant à des éléments de dimension uniforme, nous sommes en mesure d'ignorer l'impact de leur taille sur les résultats numériques. En outre, il est crucial que la densité de notre maillage soit optimale pour minimiser au maximum la taille du problème et le temps d'exécution. La Figure V.8 présente le maillage utilisé pendant les diverses simulations.

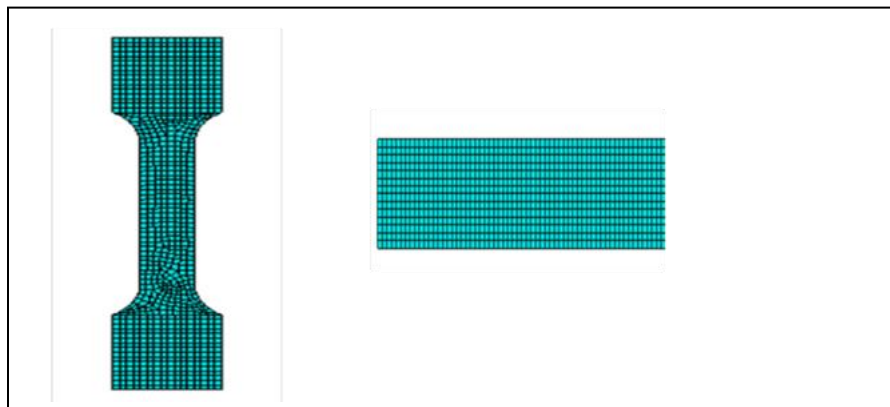


Figure IV.8 : Maillage du composite.

Pour les éprouvettes nous avons choisi, La forme quasi-quadratique de type « Hexhedra », le nombre total de nœuds pour la poutre est de 1959 nœuds.

IV.2.8 Huitième module : Job

Le module 'Job' intègre les propriétés de calcul présentes dans le module 'Step'.

Il est possible d'exécuter différentes opérations de calcul.

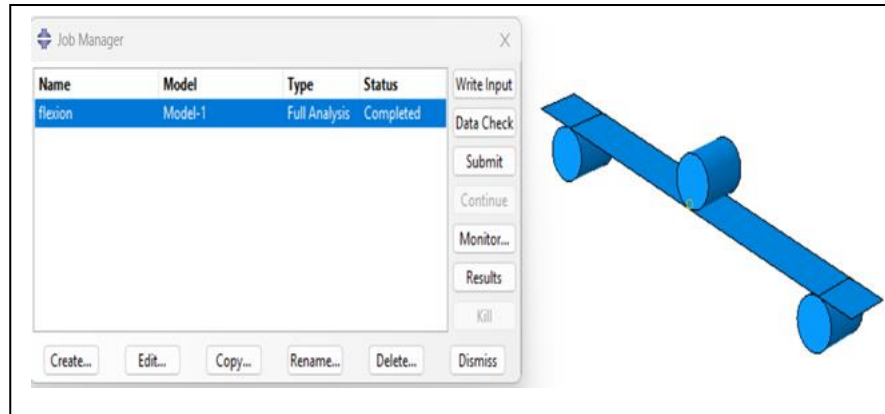


Figure IV.9 : Module Job.

IV.2.9 Neuvième module : Visualisation

Les résultats du calcul numérique sont représentés dans 'Result' et dans 'Field output' on visualise les déformations, les contraintes, les forces nodales et l'endommagement.

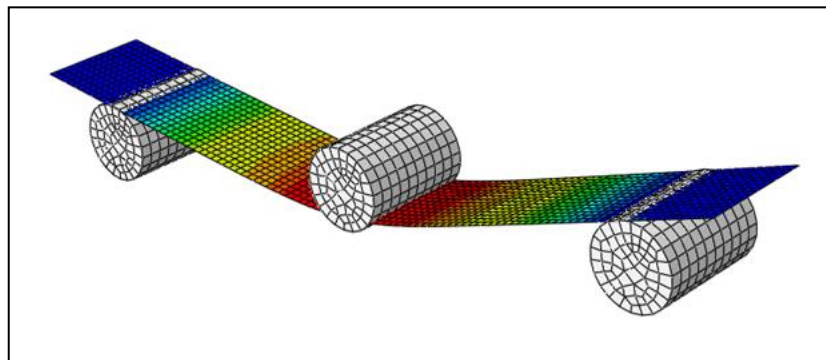


Figure IV.10 : Module Visualisation.

IV.3. Présentation des modèles à simuler :

Les différentes variantes de notre travail est présenté sur la figure IV.1. les éprouvette ont été soumises à différents essais de mécanique notamment des essais en traction et des essais en flexion.

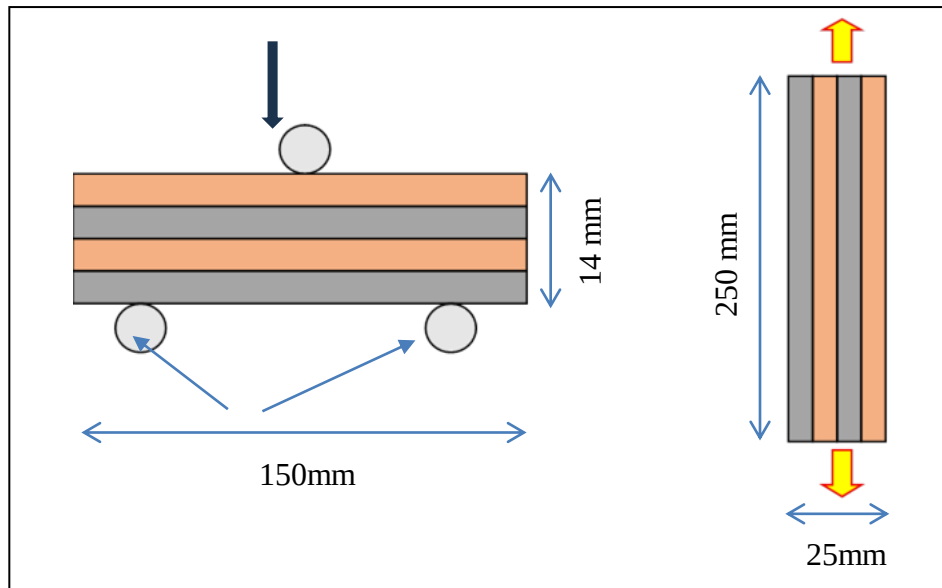


Figure IV.11: Essai de flexion et de traction du procédé étudié.

Le procédé proposé consiste à simuler des poutres en multicouches en modifiant la disposition des matériaux de renforcement (fibre de verre et grille en acier inoxydable) et d'analyser leur influence sur la résistance et la rigidité de la structure.

IV.3.1 Dimensions et géométrie :

La simulation porte sur six (06) stratifiés multicouches de dimensions 250 x 25 x 3,8mm, soumis aux essais de traction ainsi que d'éprouvettes de dimensions 150 x 14 x 3,8mm, Destinées aux essais de flexion.

1. Essai de traction :

- **Variante 1 :** Une éprouvette mono couche en fibre de verre.

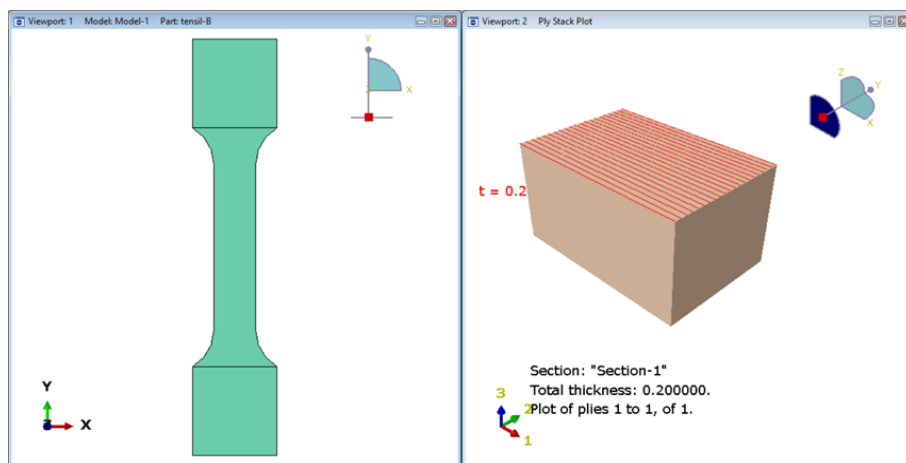


Figure IV.12: Epreuve monocouche en fibre de verre.

- **Variante 2 :** Une éprouvette mono couche en grille métallique inoxydable.

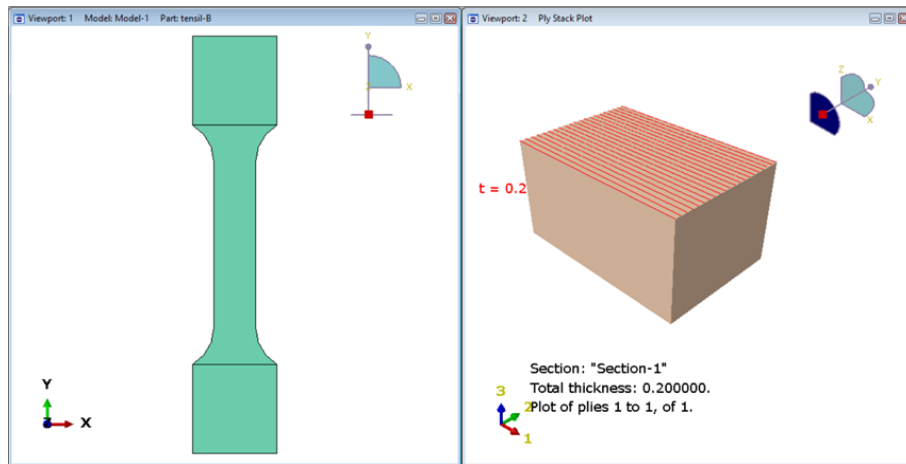


Figure IV.13: Epreuve mono couche en grille métallique inoxydable.

- **Variante 3 :** Un stratifié multicouche composé de 2 couches en fibre de verre et 2 couches en grille en inox.

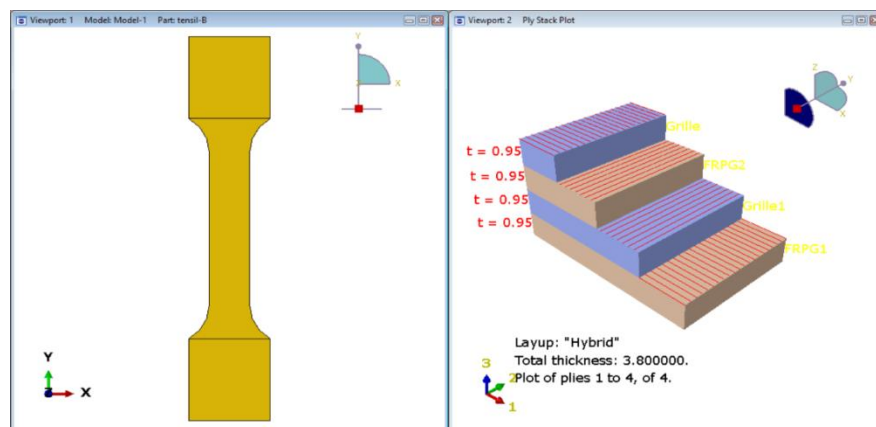


Figure IV.14: Stratifié multicouche en fibre de verre et grille métallique.

2. Essai de flexion :

- **Variante 1 :** Une Epreuve en epoxy renforcé par des fibres de verres GFRP.

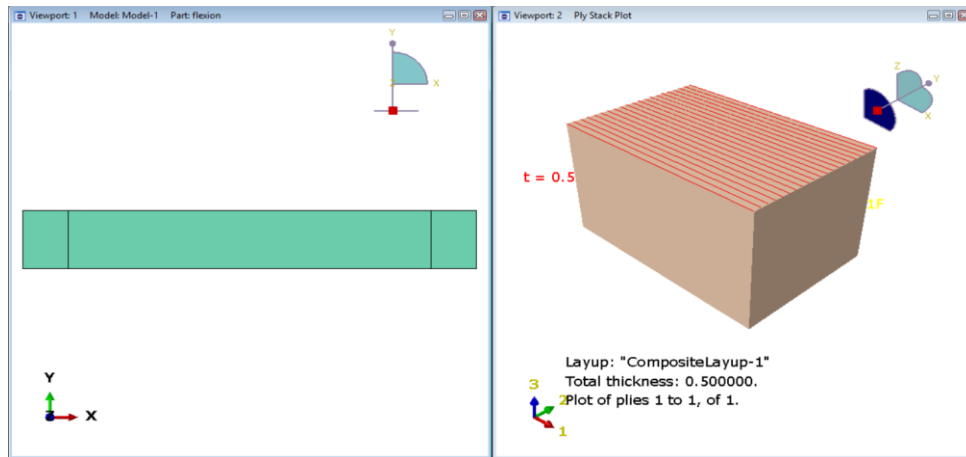


Figure IV.15: Epreuve en époxy renforcé par des fibres de verres GFRP.

- **Variante 2 :** Une Epreuve en epoxy renforcé par une grille métallique.

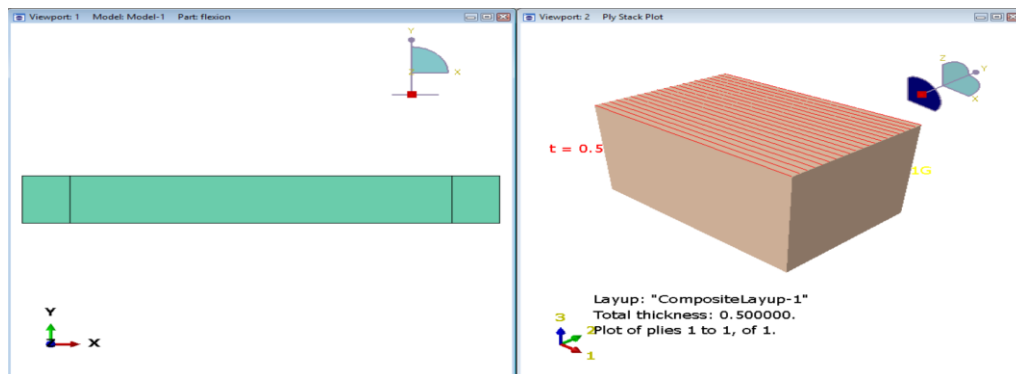


Figure IV.16: Epreuve en époxy renforcé par une grille métallique.

- **Variante 3 :** Un stratifié multicouche F-F-F-F.

Cette variante est constituée de 4 couches en époxy renforcées uniquement par des fibres de verres.

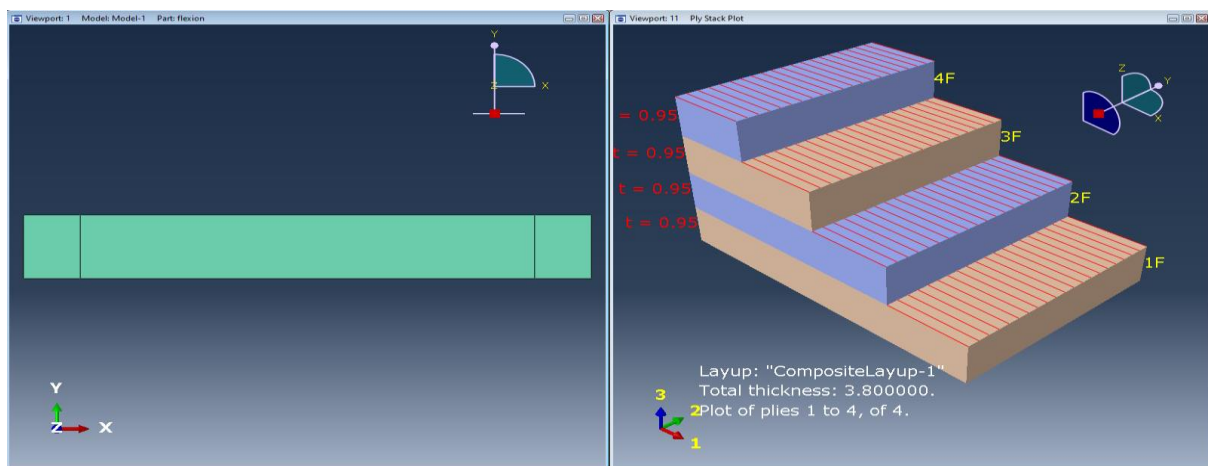


Figure IV.17: Stratifié multicouche F-F-F-F.

➤ **Variante 4 :** Un stratifié multicouche G-G-G-G.

Cette variante est constituée de 4 couches en époxy renforcées par des grilles métalliques inoxydables.

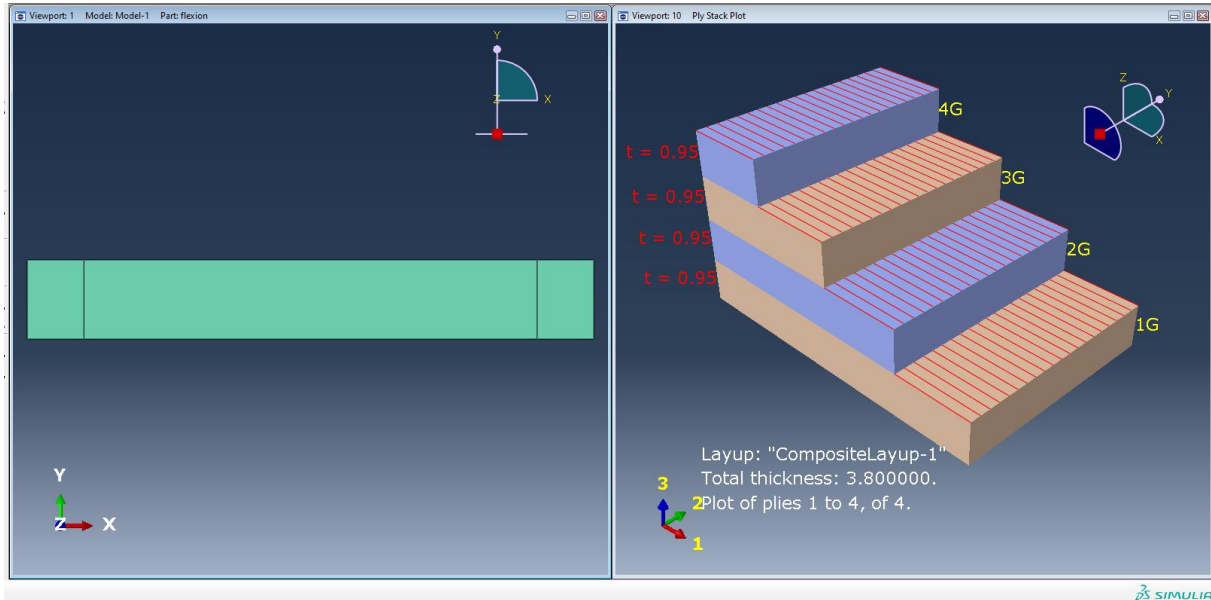


Figure IV.18: Stratifié multicouche G-G-G-G.

➤ **Variante 5 :** Un stratifié multicouche F-F-G-G.

Cette variante est constituée de deux couches d'époxy renforcées par des fibres de verres et de deux couches d'époxy renforcées par des grilles métalliques inoxydables.

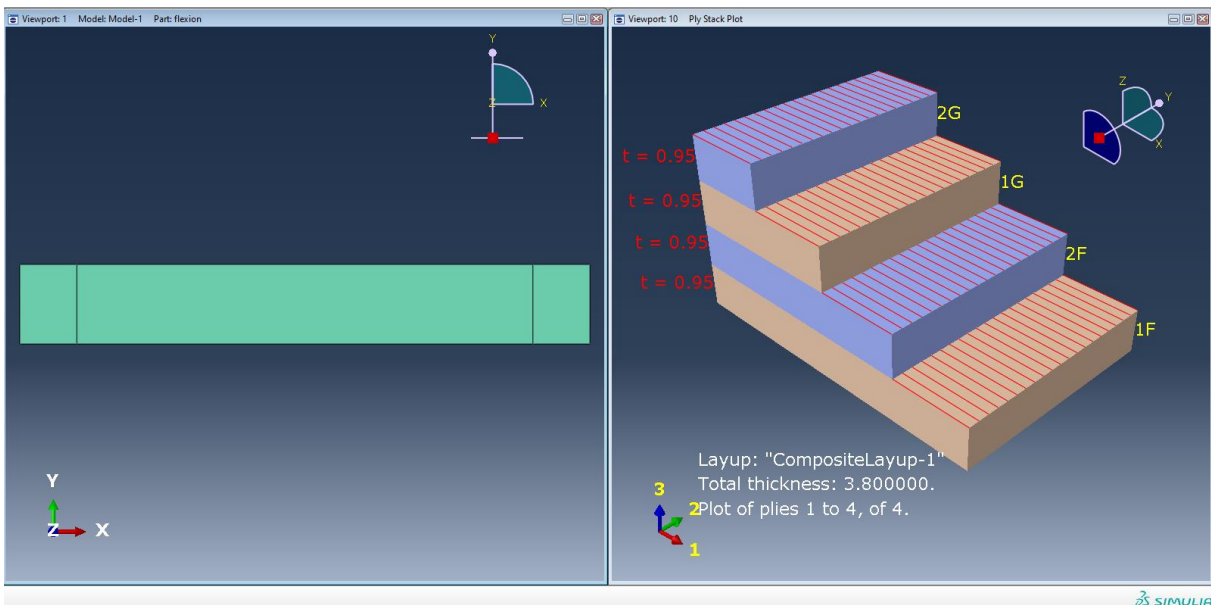


Figure IV.19: Stratifié multicouche F-F-G-G.

➤ **Variante 6 :** Un stratifié multicouche G-G-F-F

Cette variante est constituée de deux couches d'époxy renforcées par des grilles métalliques inoxydables et de deux couches d'époxy renforcées par des fibres de verres.

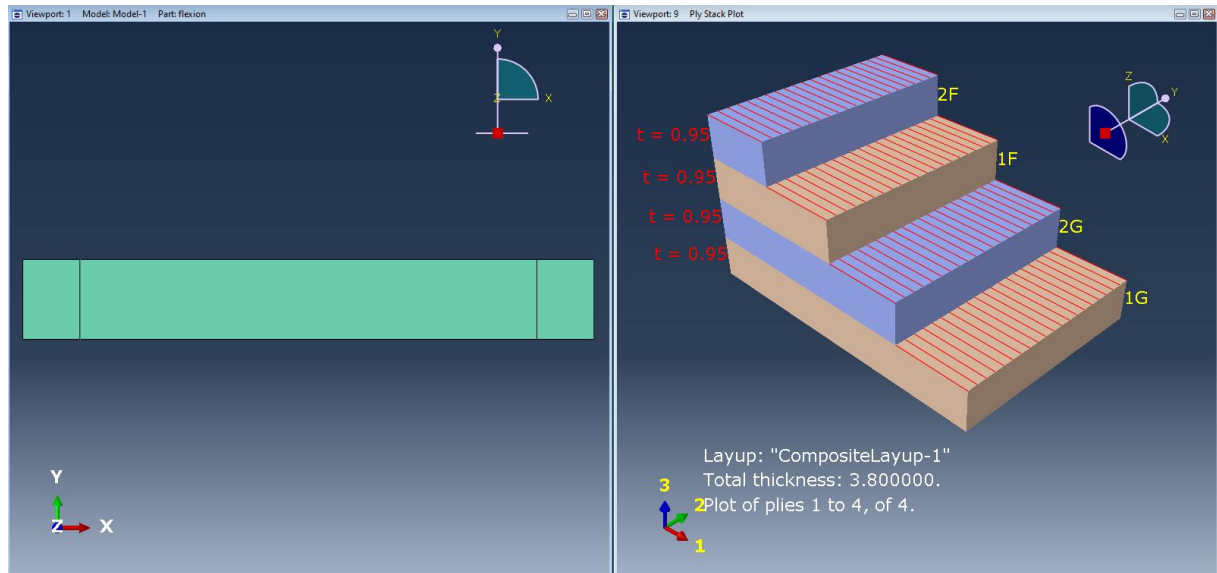


Figure IV.20: Stratifié multicouche G-G-F-F.

➤ **Variante 7 :** Un stratifié multicouche F-G-F-G.

Cette variante est constituée de deux couches d'époxy renforcées par des fibres de verres et de deux couches d'époxy renforcées par des grilles métalliques inoxydables, disposées de manière alternée au sein du stratifié comme le montre la figure suivante.

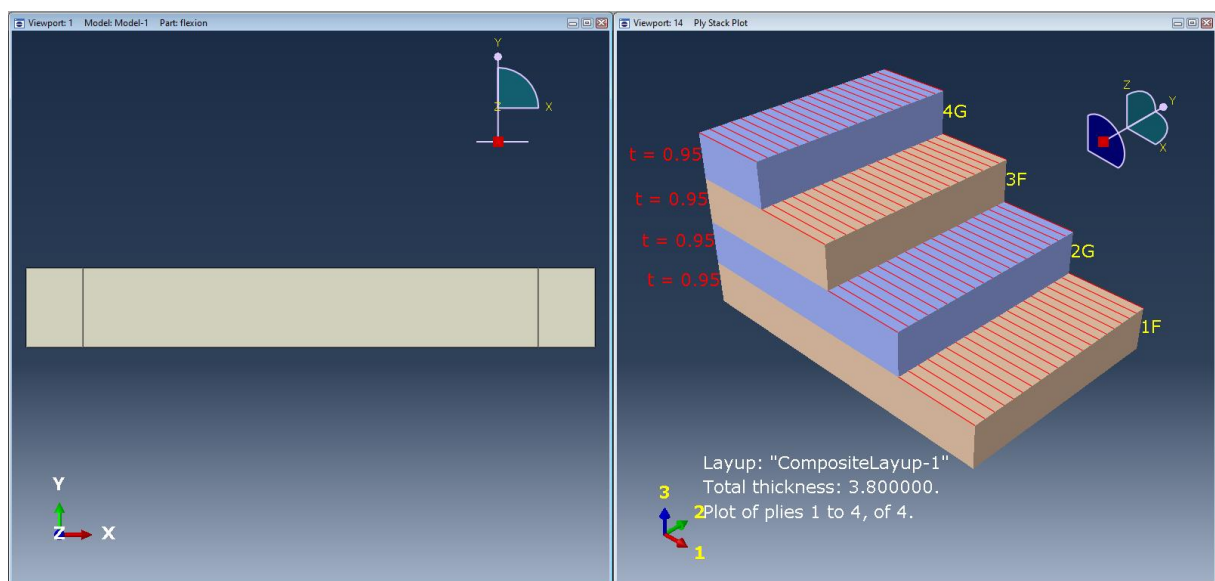


Figure IV.21: Stratifié multicouche F-G-F-G.

➤ **Variante 8** : Un stratifié multicouche G-F-G-F.

Cette variante est constituée deux couches d'époxy renforcées par des fibres de verres et de deux couches d'époxy renforcées par des grilles métalliques inoxydables, disposées de manière alternée au sein du stratifié comme le montre la figure suivante.

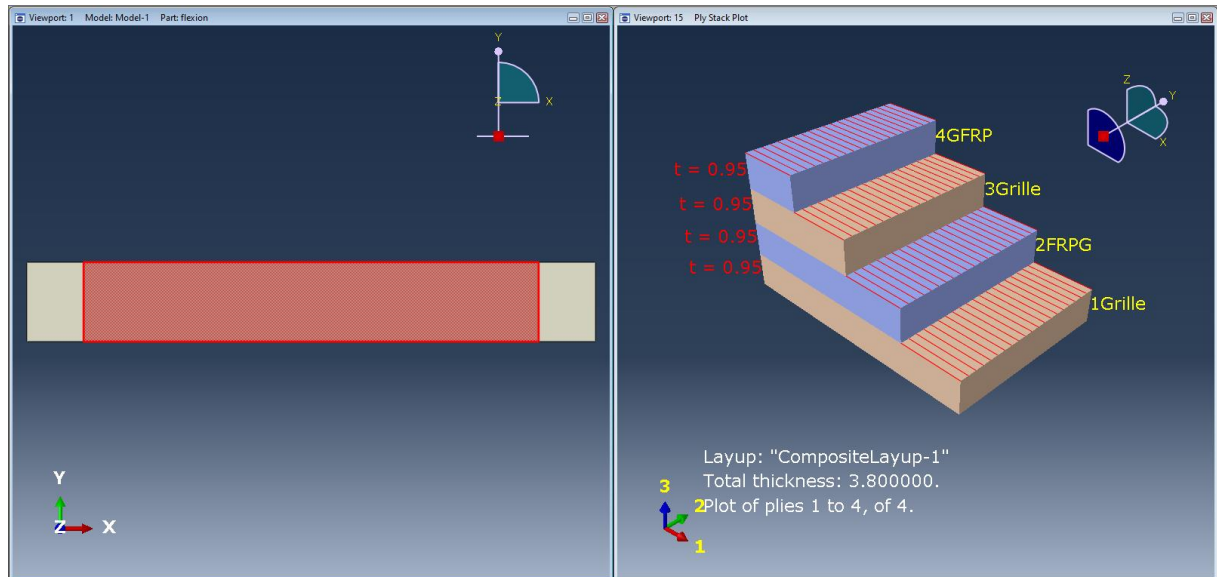


Figure IV.22: Stratifié multicouche G-F-G-F.

Les différentes caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés, Fibres de verres et la grille en acier, sont données dans les tableaux IV.2 et IV.3.

Tableau IV.2. Caractéristiques mécaniques du composite (GFRP).

Paramètres	Valeur	Dénotation
E1(MPa)	72000	Module de Young longitudinal
E2(MPa)	13600	Module de Young transversal
ν_{12}	0.31	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
ν_{13}	0.33	Coefficient de poisson : plan longitudinal/vertical
G12 (MPa)	4700	Module de cisaillement sur le plan transversal
G13 (MPa)	3000	Module de cisaillement
G23 (MPa)	3000	Module de cisaillement

Tableau IV.3 Caractéristiques mécaniques de la grille métallique.

Paramètres	Valeur	Dénotation
$\rho(\text{kg/m}^3)$	7800	Densité
E (MPa)	193000	Module de Young longitudinal
ν_{12}	0.3	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
σ_e (MPa)	250	La limite d'élasticité
σ_{rup} (MPa)	500	Résistance à la traction
G (GPa)	70	Module de cisaillement

IV.4. Résultats et discussions :

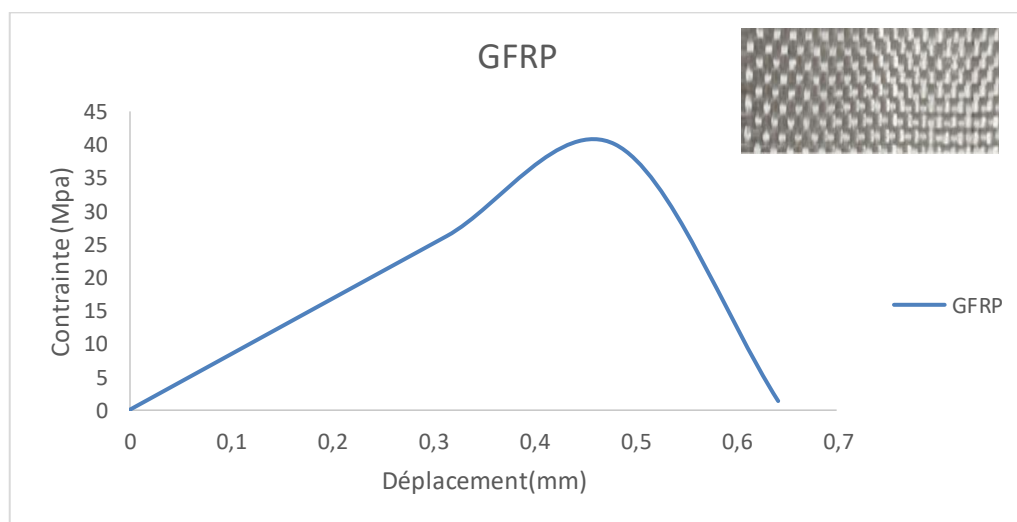
Les différents résultats obtenus par la simulation numérique, illustrent la cartographie des éprouvettes renforcées par des fibres de verres et la grille métallique inoxydable notamment le champ des contraintes, de déformations, de forces et de déplacements qui s'y développent.

IV.4.1. Résultats des essais traction :

a) variante monocouche en Fibre de verre GFRP :

Tableau IV.4 Les caractéristiques du composite Epoxy/fibre de verre.

GFRP	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (%)	σ_e (mpa)	ϵ_e (%)
Valeurs	39,98	3,2	26,17	2

**Figure IV.23 :** les courbes de contrainte-déplacement du composite Epoxy/fibre de verre.

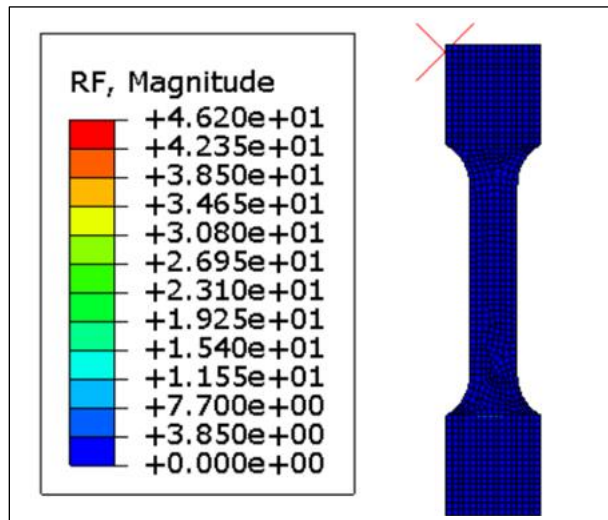


Figure IV.24: Evolution de La force (N).

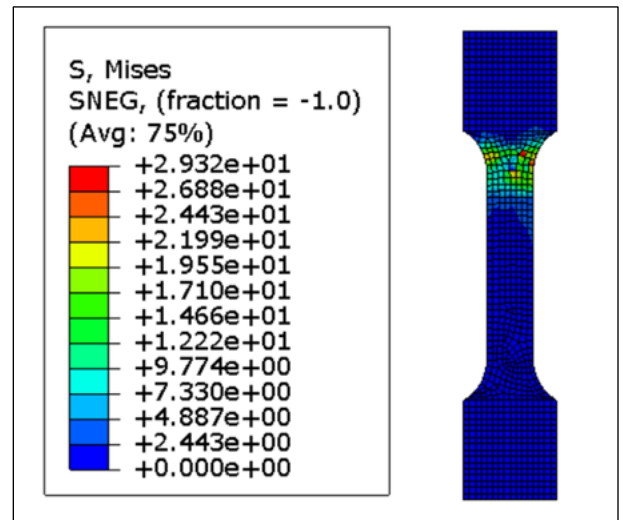


Figure IV.25: Evolution de La contrainte

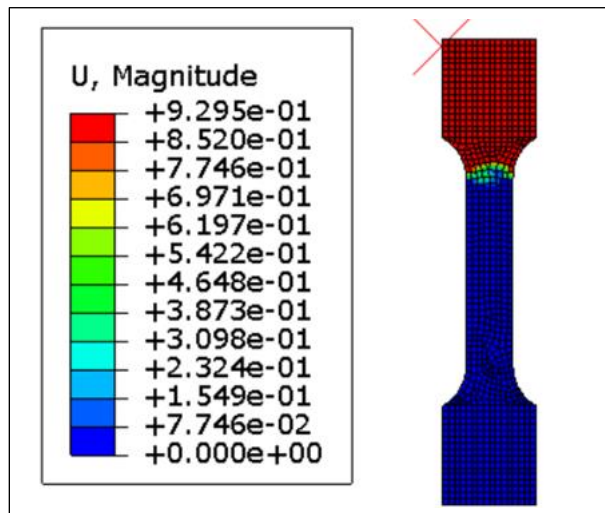


Figure IV.26 : Evolution du déplacement.

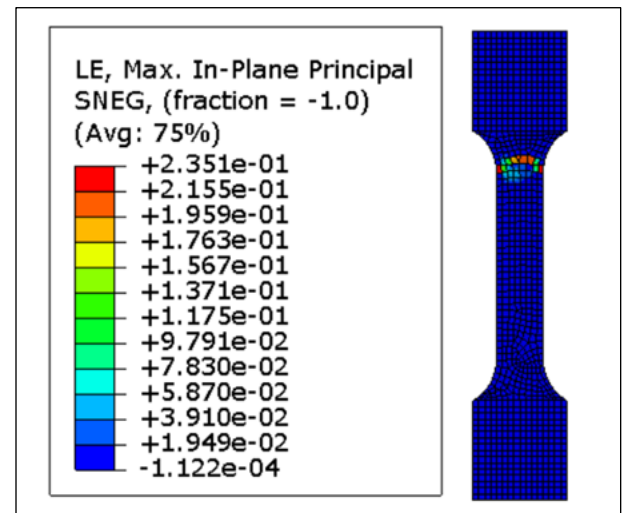


Figure IV.27 : Evolution de la déformation.

La contrainte ultime du mono couche en composite GFRP est de 39,98 MPa avec une déformation au pic correspondante de 3,2%. L'analyse des cartographies montre que le mode de rupture est identique à celui observé lors des essais mécaniques. La rupture est obtenue en tête de l'éprouvette au niveau du gousset.

b) - Variante monocouche en grille métallique :

Tableau IV.5 : Les caractéristiques du composite Epoxy/Tissu de Acier galvanisé.

Grille	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	σ_e (mpa)	ϵ_e (%)
Valeurs	56,68	5,9	53,43	1,3

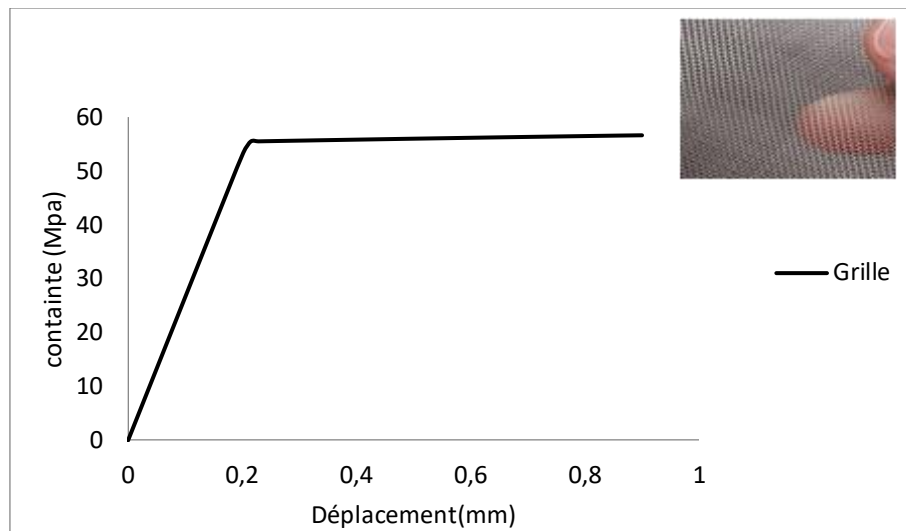


Figure IV.28 : Les courbes de contrainte-déplacement du composite Grille métallique.

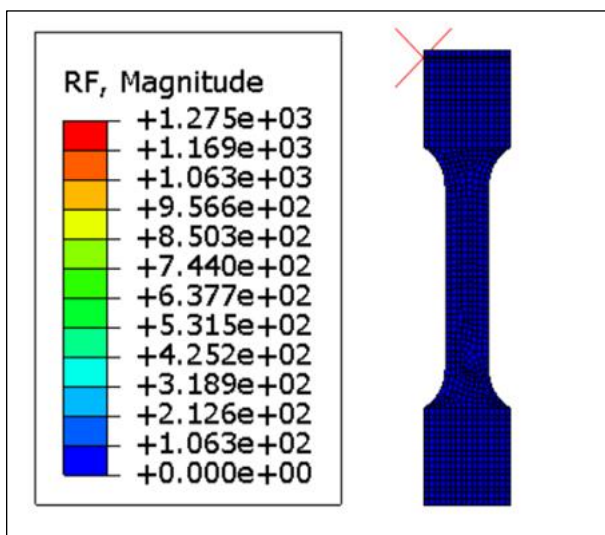


Figure IV.29: Evolution de La force (N).

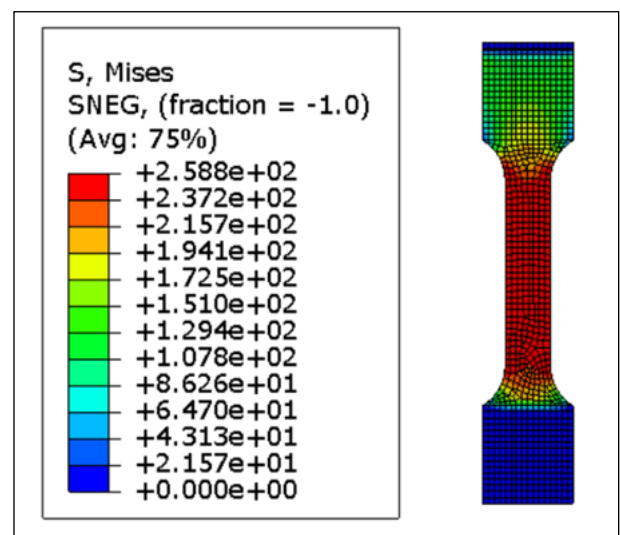


Figure IV.30: Evolution de La contrainte(Mpa).

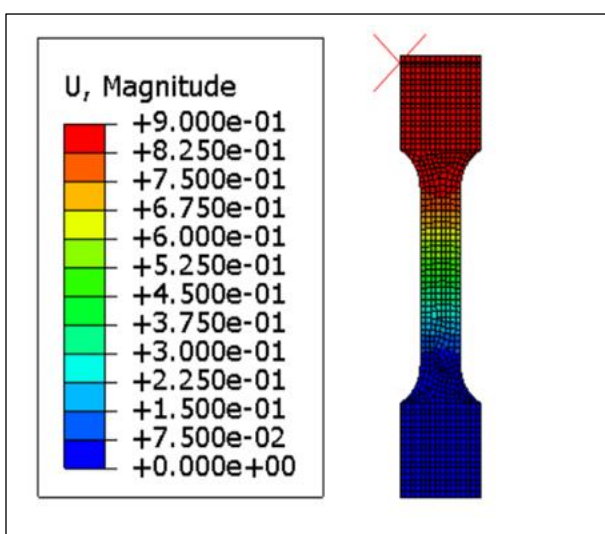


Figure IV.31 : Evolution du déplacement (mm).

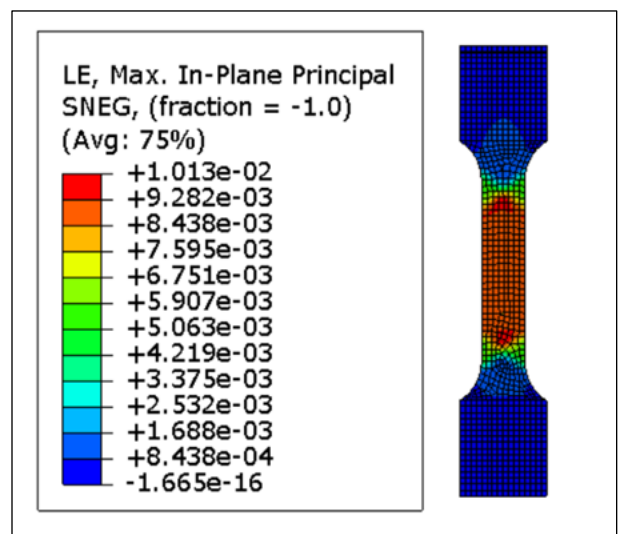


Figure IV.32 : Evolution de la déformation.

D'après les résultats, on remarque que les contraintes sont concentrées dans la partie centrale de l'éprouvette. Cela est dû à la rigidité de la grille métallique. Comparativement au cas du composite mono couche en composite GFRP, la contrainte est améliorée. Sa valeur est de 56,69 MPa pour une déformation ultime de 5,9 %. Le mode de rupture est identique à celui observé lors des essais mécaniques.

c) Variante multicouches Hybride :

Tableau IV.6. Les caractéristiques du composite hybride.

Hybride	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	σ_e (mpa)	ϵ_e (%)
valeur	90,18	3,8	40,28	1,3

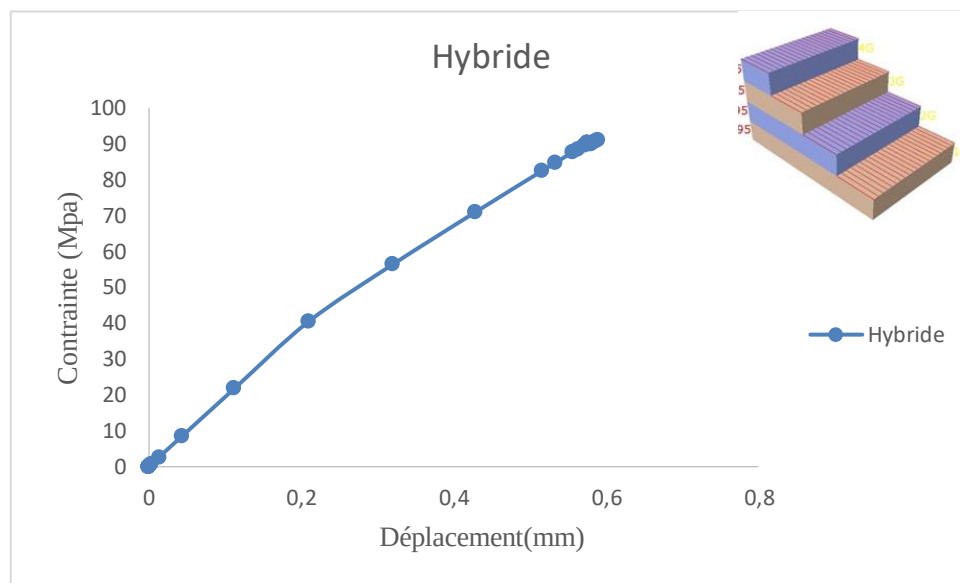


Figure IV.33 : les courbes de contrainte-déplacement du composite hybride

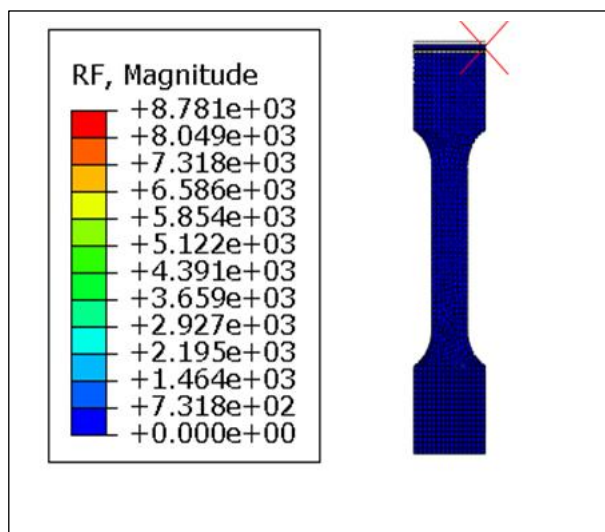


Figure IV.34: Evolution de La force (N).

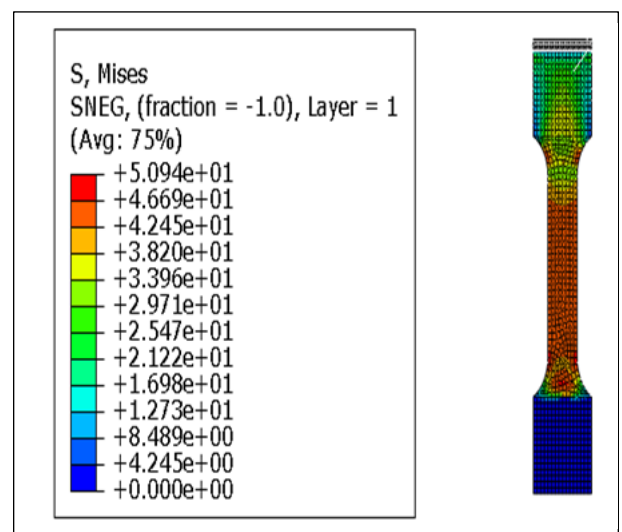


Figure IV.35: Evolution de La contrainte (Mpa).

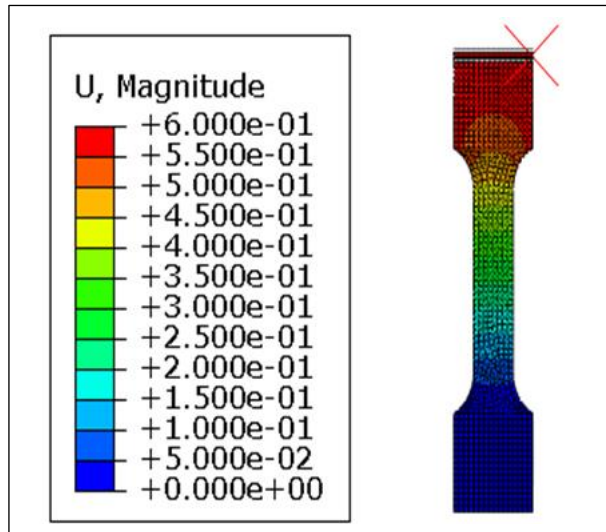


Figure IV.36 : Evolution du déplacement (mm).

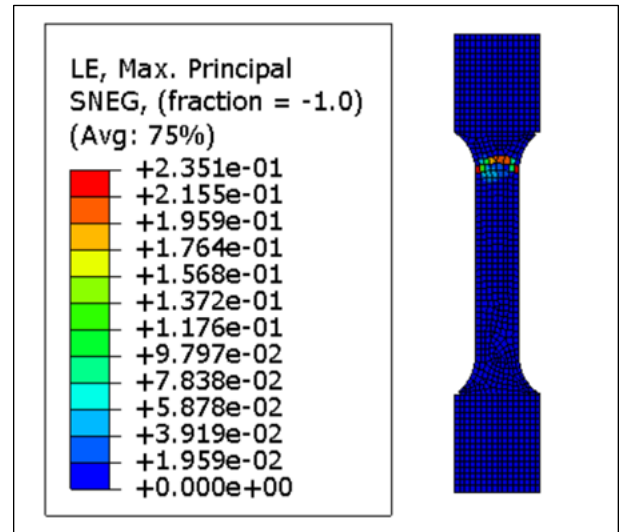


Figure IV.37: Evolution de la déformation.

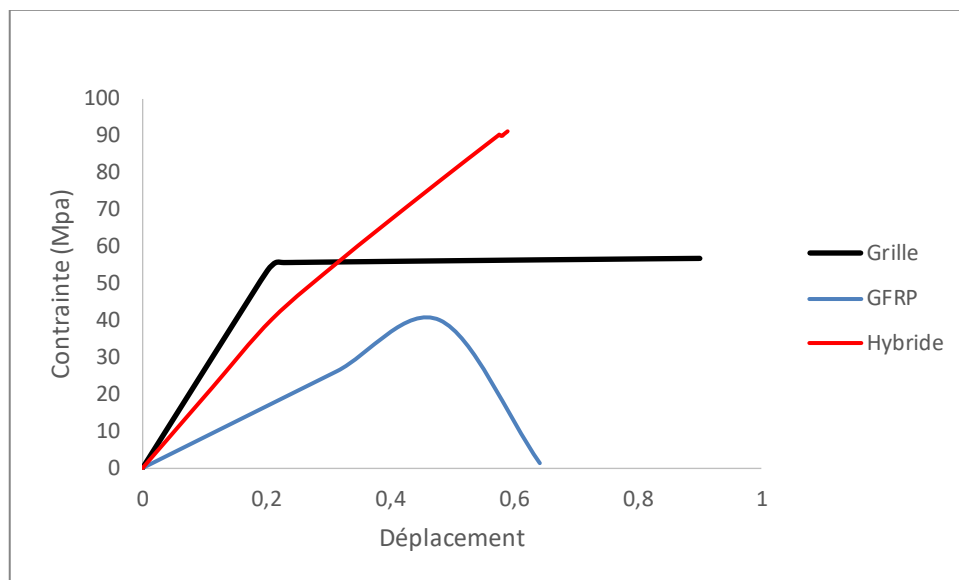


Figure IV.38 : Confrontation des résultats (Essai de Traction).

- **Comparaison Simulation / Expérimental**

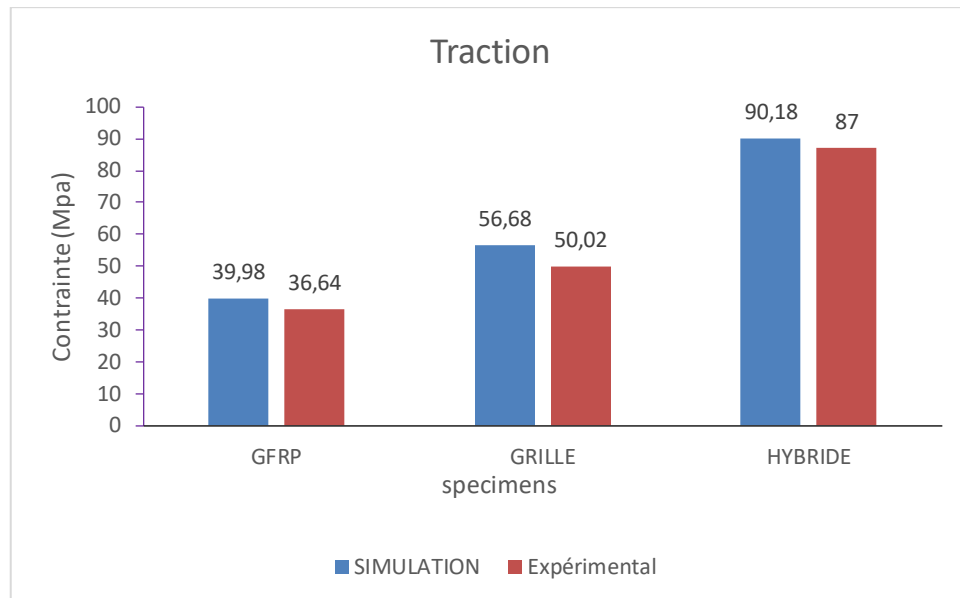
A titre indicatif, on présentera la confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats numériques pour les trois stratifiés :

- monocouche à base de GFRP,
- monocouche à base de grille métallique
- stratifié hybride avec un empilement 'GFGF' (grille -GFRP - grille-GFRP).

Les différents résultats sont résumés dans le tableau IV.7 et illustrés dans la figure IV.39.

Tableau V.7 : Confrontation des résultats EXP /SIM (TRACTION)

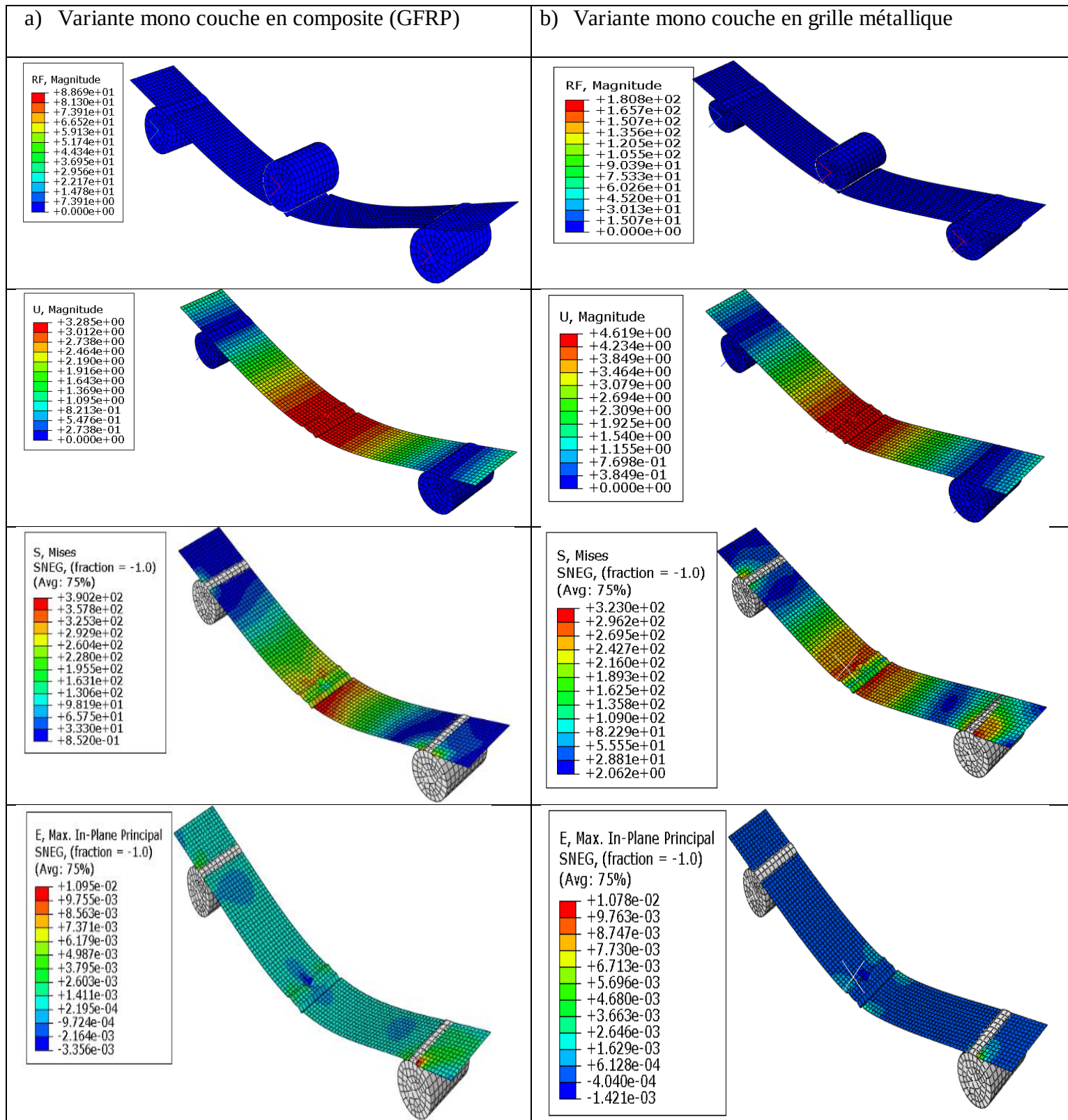
L'essai	$\sigma_{\max}$ FRPG (MPa)	$\sigma_{\max}$ GRILLE (MPa)	$\sigma_{\max}$ HYBRIDE (MPa)
SIMULATION	39,98	56,68	90,18
Expérimental	36,64	50,02	87

**Figure IV.39 : Valeurs de la contrainte ultime des spécimens considérés : (GFRP - Grille – Hybride)**

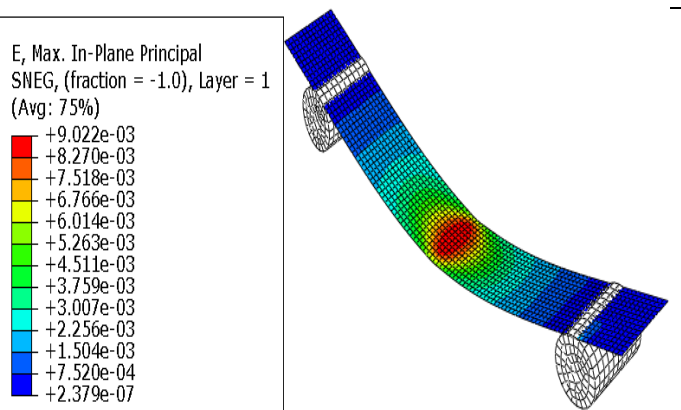
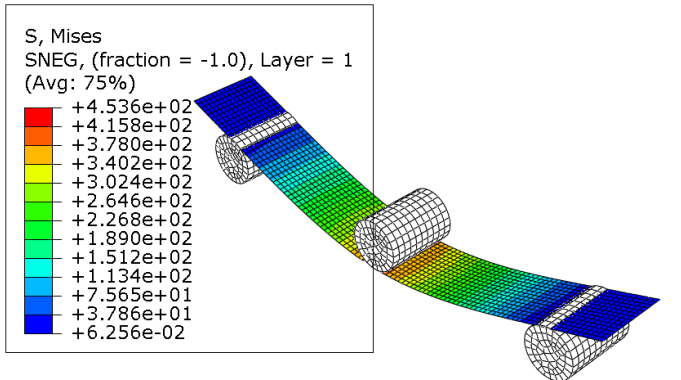
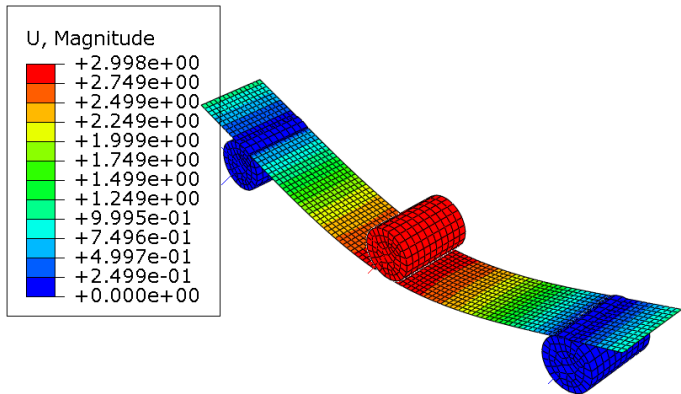
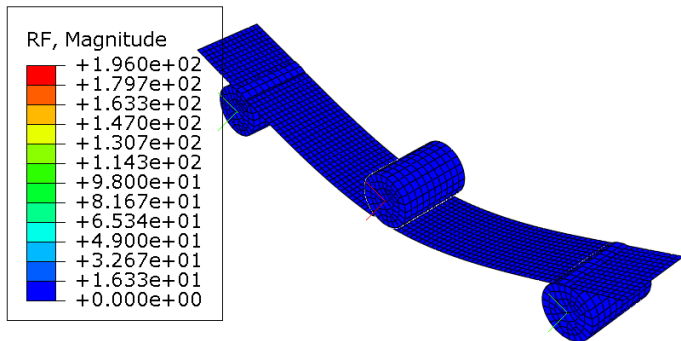
Une très bonne concordance des résultats est obtenue surtout pour le stratifié hybride. L'erreur est de 9% pour le monocouche GFRP, de 13,3% pour le monocouche en Grille et 3,65 pour le stratifié hybride. L'écart entre la contrainte expérimentale et numérique supérieure à 10% pour le monocouche en Grille peut être éventuellement expliqué par les défauts de réalisation des éprouvettes. Il est nécessaire pour réduire cette marge d'utiliser lors de la confection des éprouvettes des pompes sous vide pour éliminer totalement les vides dans le matériau.

IV.4.2. Résultats des essais Flexion :

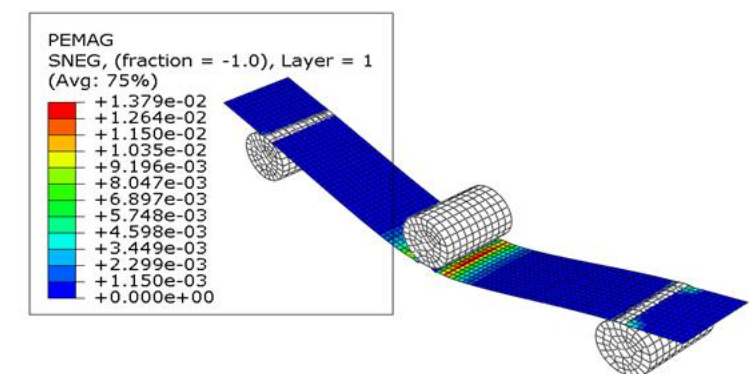
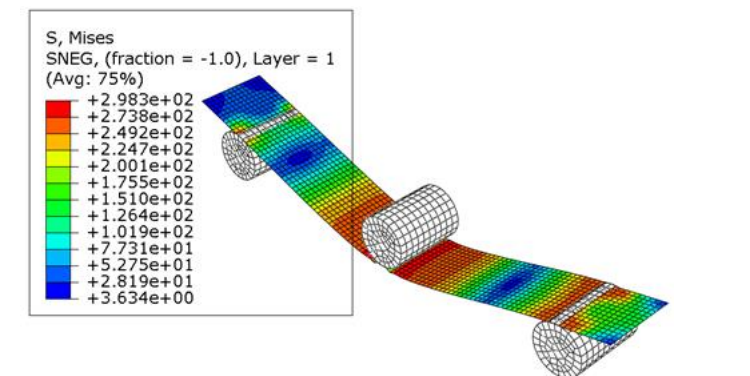
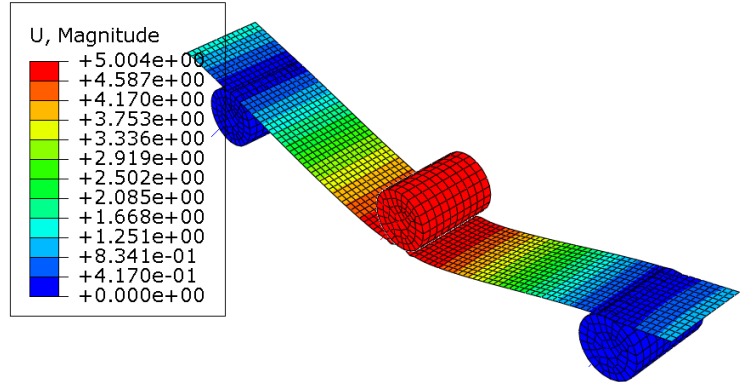
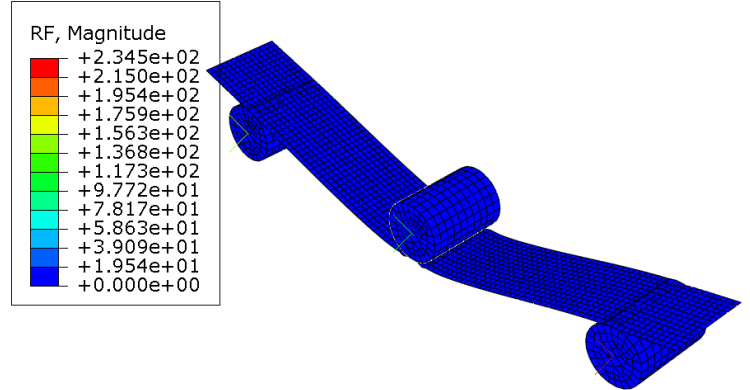
La cartographie des essais de flexion a été établie afin de synthétiser l'ensemble des configurations de simulation étudiées, les résultats présentés concernent les forces, les déplacements, les contraintes et les déformations obtenus.



c) Variante multicouches Hybrid :F-F-F-F

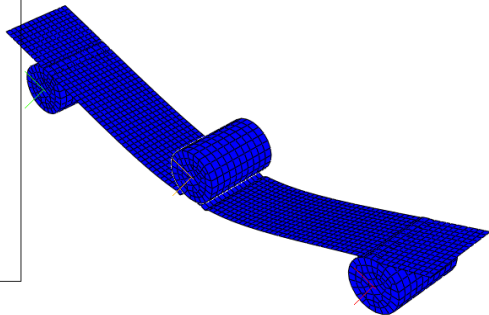
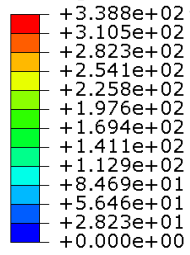


d) Variante multicouches Hybrid : G-G-G-G :



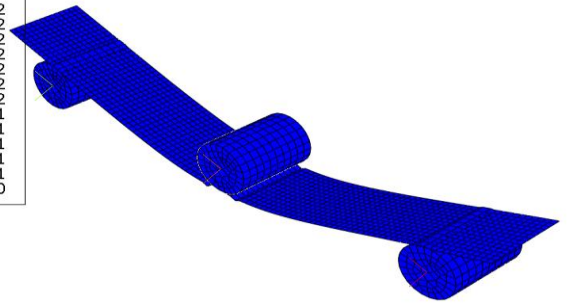
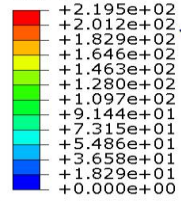
e) Variante multicouches Hybrid : F-F-G-G

RF, Magnitude

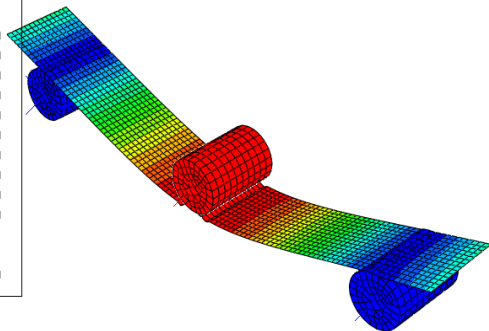
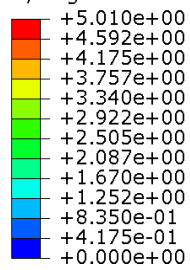


f) Variante multicouches Hybrid : G-G-F-F

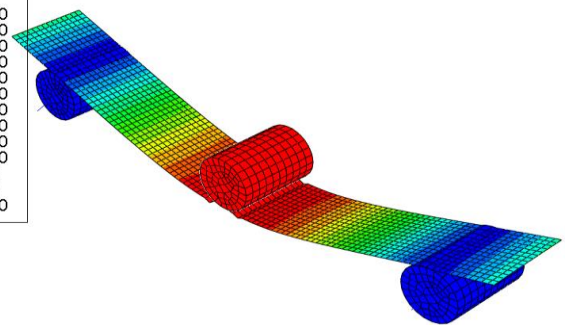
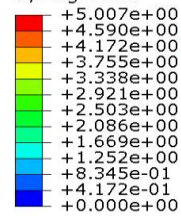
RF, Magnitude



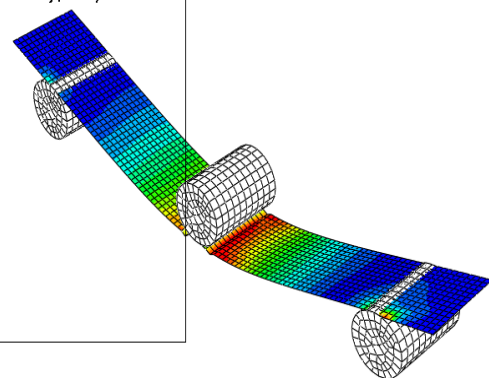
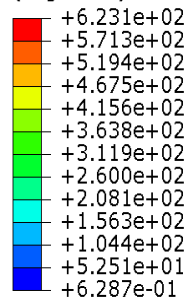
U, Magnitude



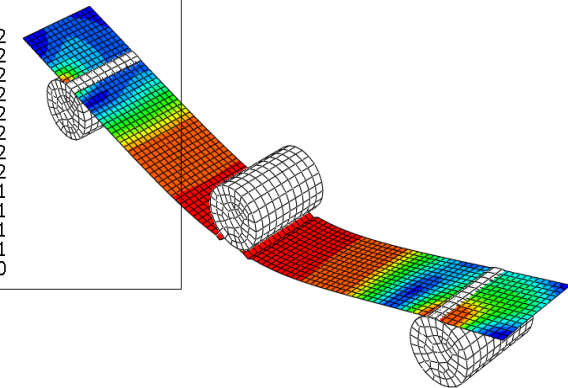
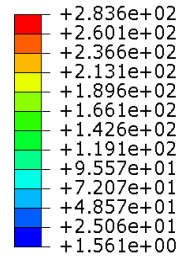
U, Magnitude



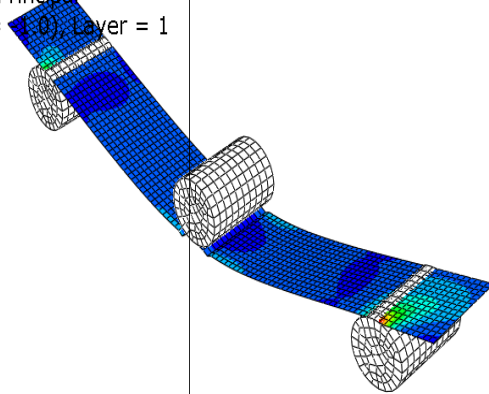
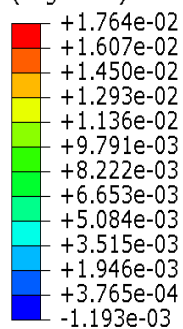
S, Mises

SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)

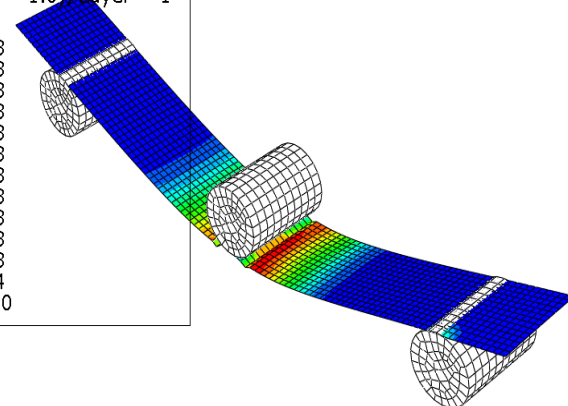
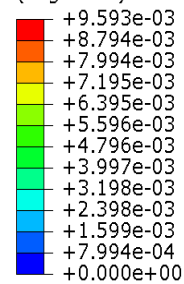
S, Mises

SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)

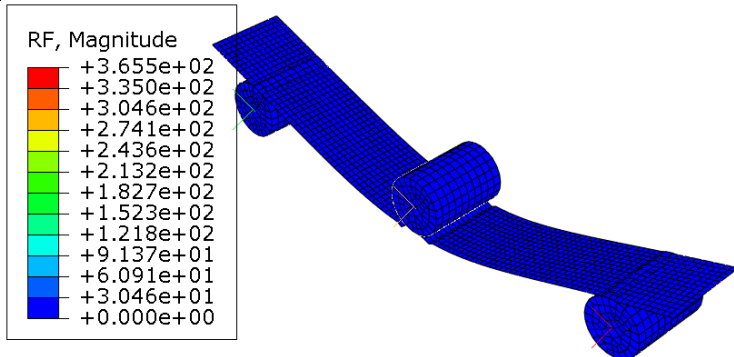
E, Max. In-Plane Principal

SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)

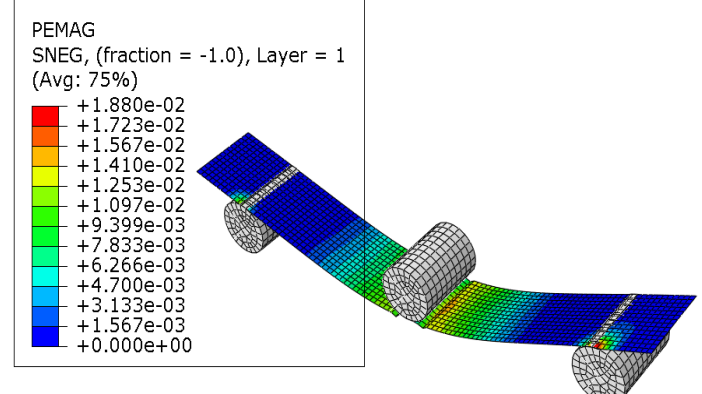
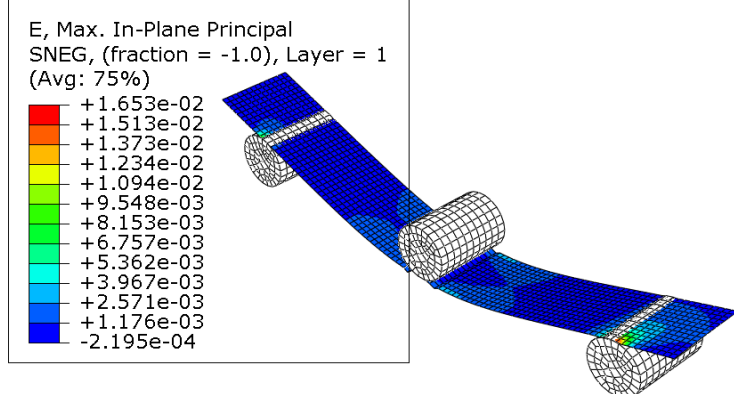
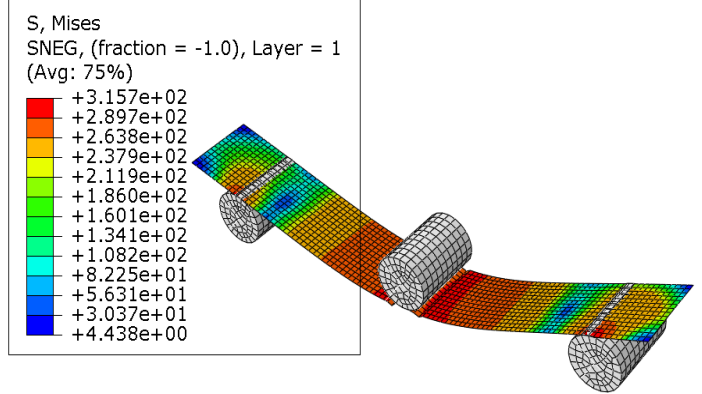
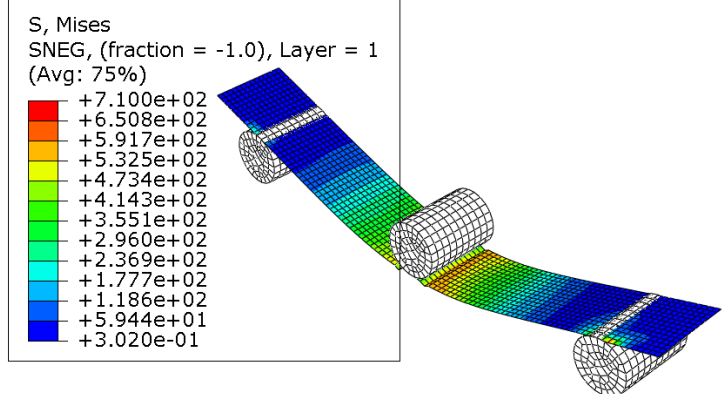
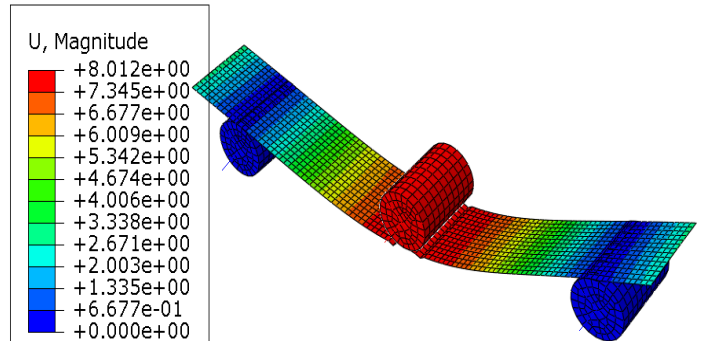
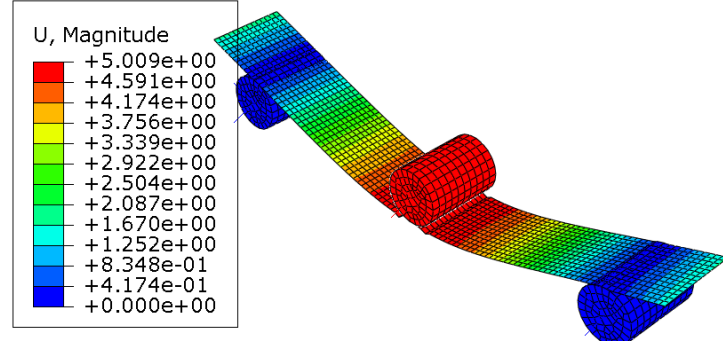
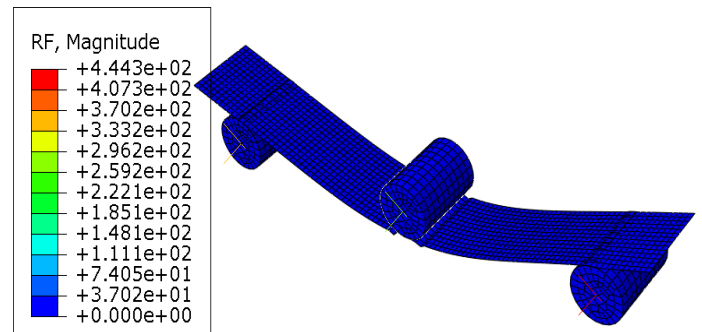
PEMAG

SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)

g) Variante multicouches Hybrid : F-G-F-G



h) Variante multicouches Hybrid : G-F-G-F



IV.4.2.1 Représentation graphique des résultats (flexion) :

1. Composite en Epoxy / fibre de verre :

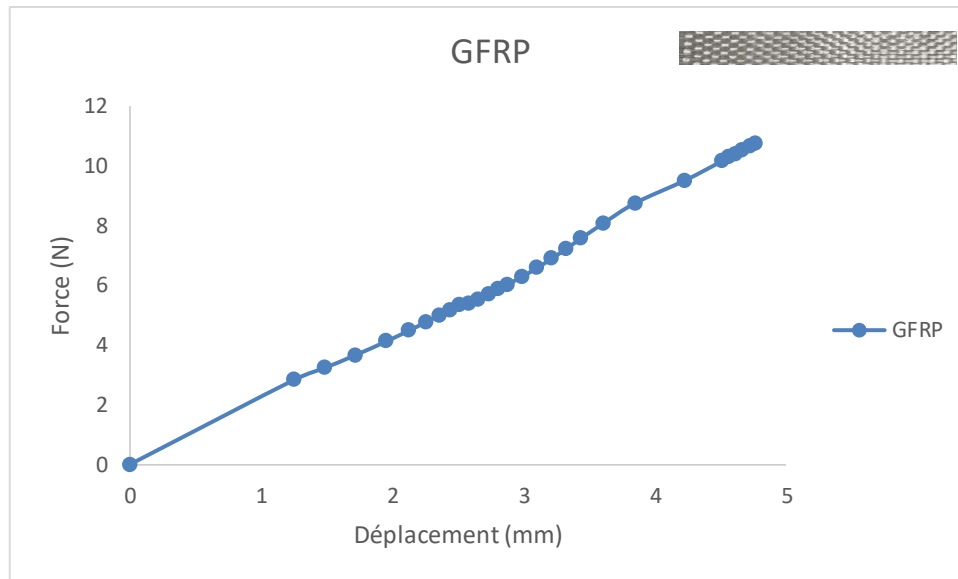


Figure IV.40 : Courbes Force-déplacement du composite en fibre de verre GFRP.

2. Composite en Epoxy /Grille métallique :

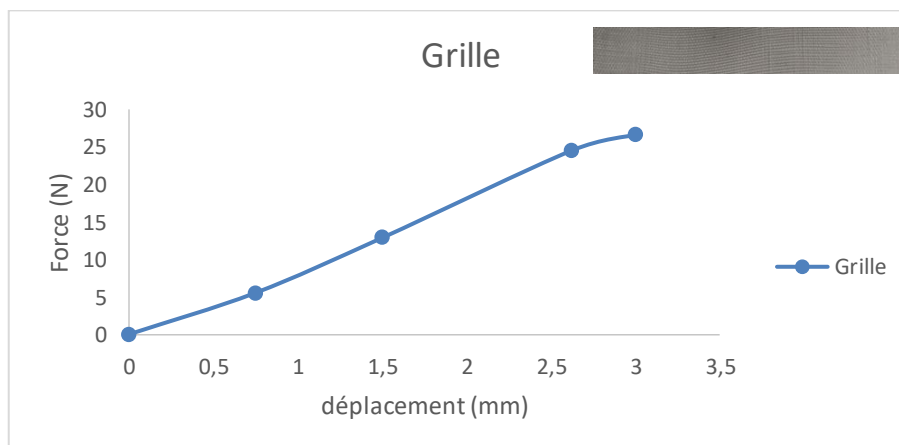


Figure IV.41 : courbes Force-déplacement du composite en Grille métallique.

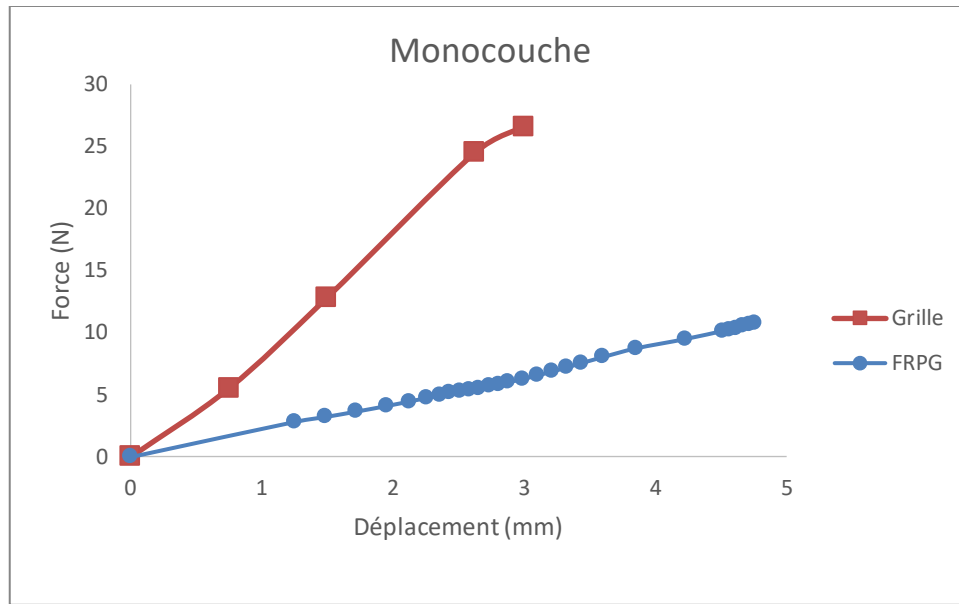


Figure IV.42 : Confrontation des résultats obtenus pour les modèles monocouches (Essai de flexion).

3. Composites hybrides :

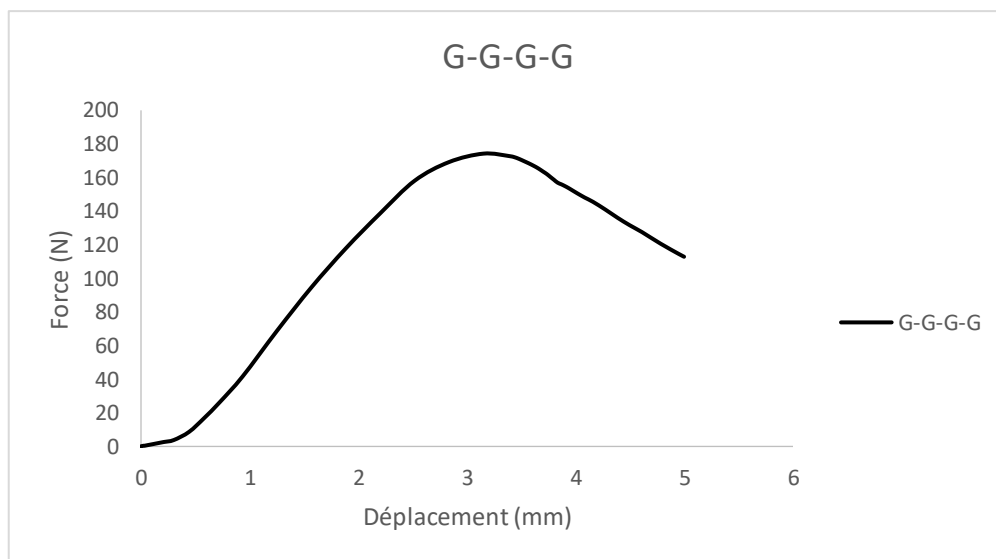


Figure IV.43 : Courbe Force-déplacement du stratifiés G-G-G-G.

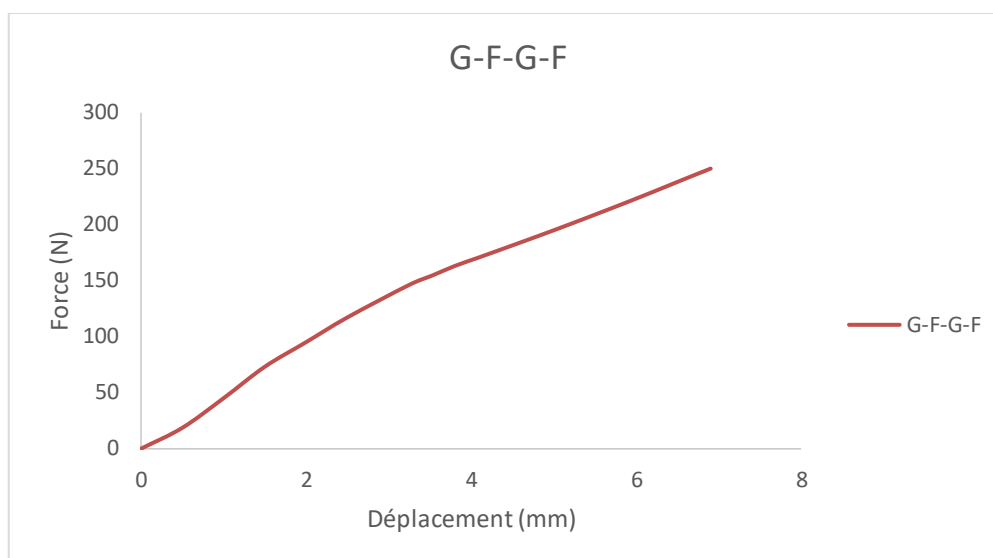


Figure IV.44 : Courbe Force-déplacement du stratifiés G-F-G-F.

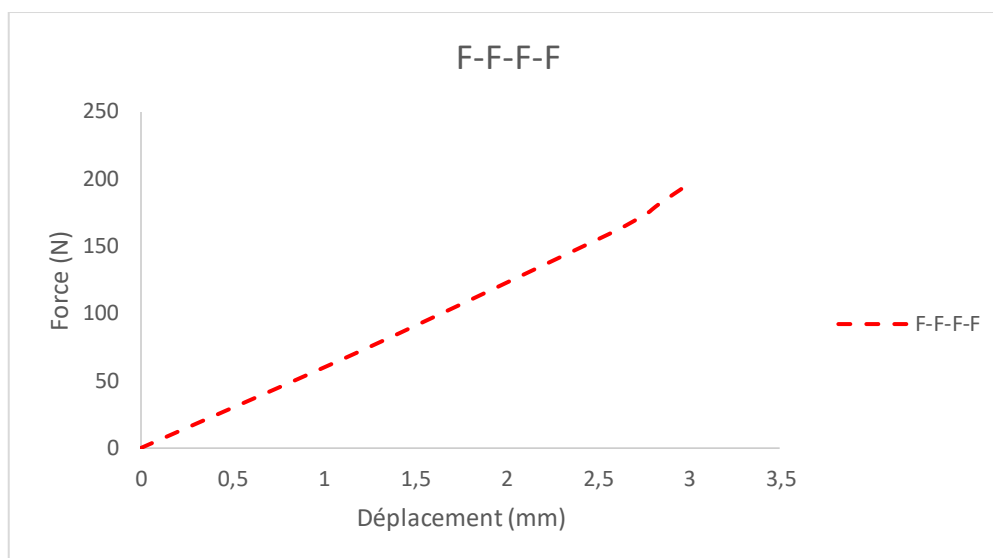


Figure IV.45 : Courbe Force-déplacement du stratifiés F-F-F-F.

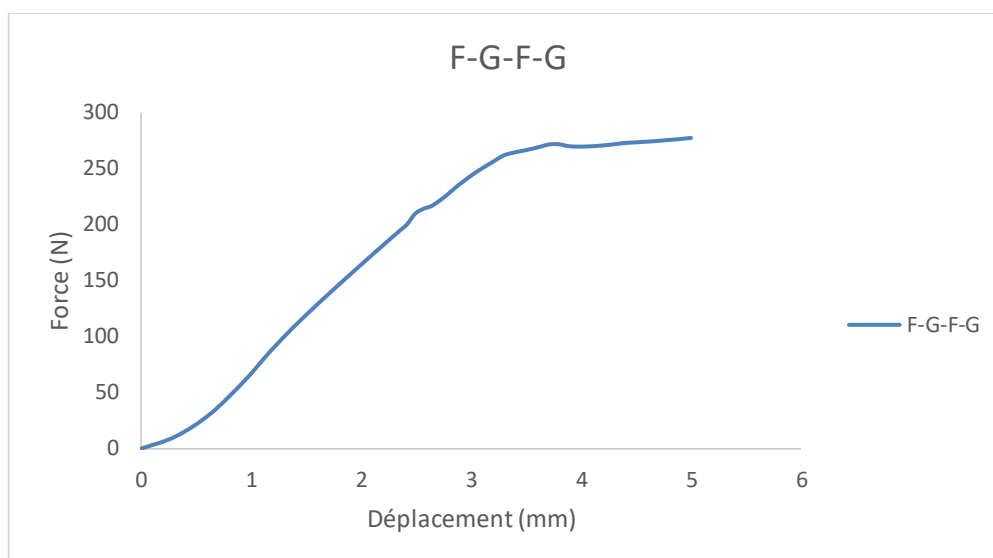


Figure IV.46 : Courbe Force-déplacement du stratifié F-G-F-G.

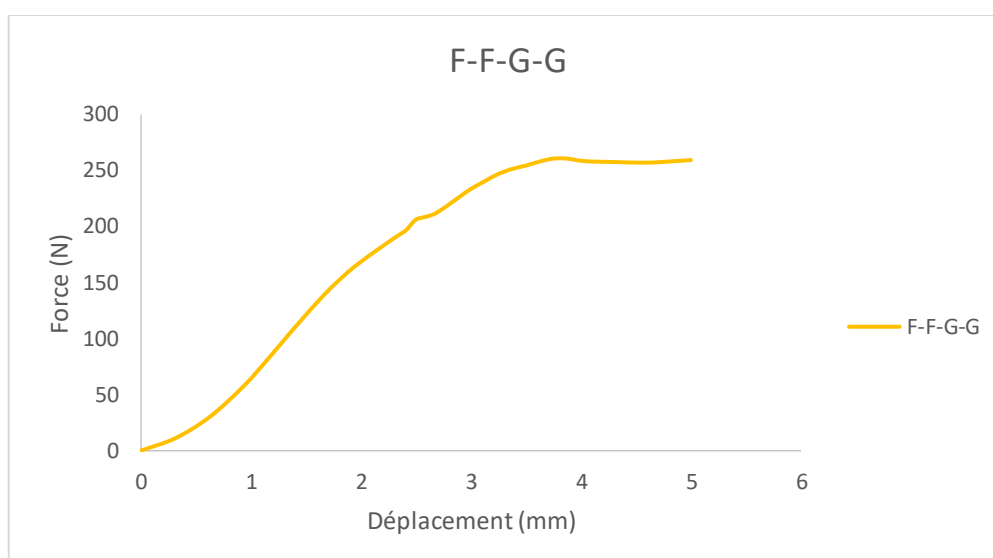


Figure IV.47 : Courbe Force-déplacement du stratifié F-F-G-G.

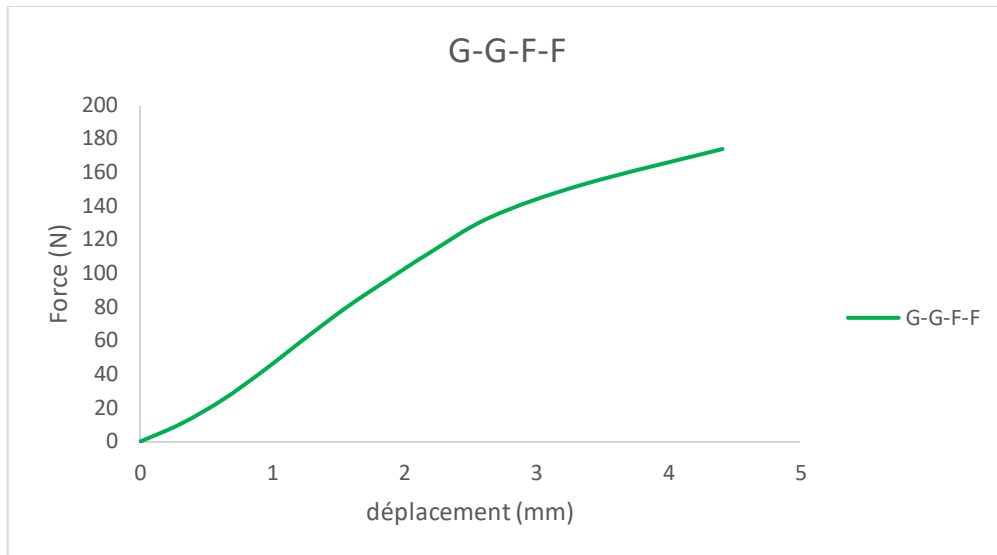


Figure IV.48 : Courbe Force-déplacement du stratifié G-G-F-F.

IV.5 Confrontation des résultats :

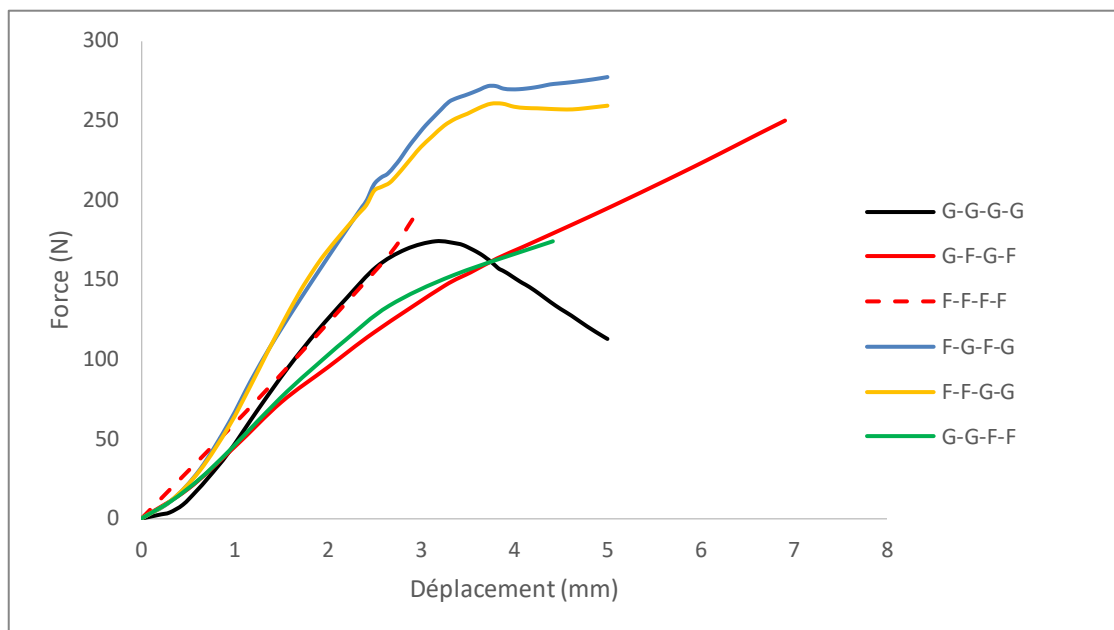


Figure IV.49 : Confrontation des résultats.

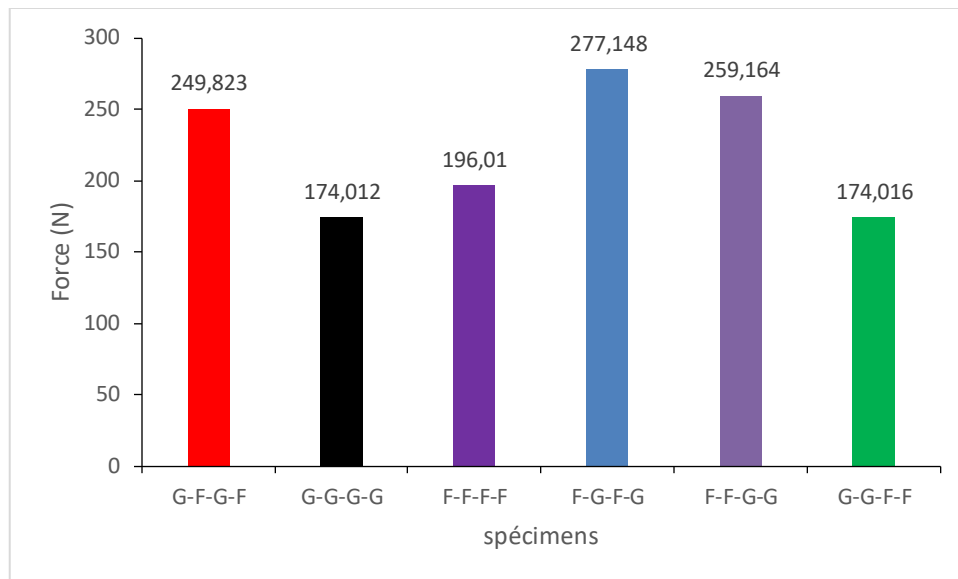


Figure IV.50 : Confrontation des résultats.

L'analyse des résultats permet de formuler les conclusions suivantes :

- La résistance en flexion de monocouche renforcée de grille métallique est largement supérieure à celle développée par le monocouche renforcée de fibres de verre GFRP. En effet, les fibres de verre sont recommandées pour la reprise des efforts de traction ;
- Le comportement des différents stratifiés est fonction de la nature du renfort et de la séquence d'empilement des couches de renfort.
- La composition F-G-F-G donne le meilleur résultat comparativement aux autres combinaisons. Sa résistance en flexion est de l'ordre de 277,2 MPa :
- L'influence du choix de la séquence d'empilement sur la réponse mécanique est montrée par la comparaison des résultats des combinaisons GGFF (R= 174,02 MPa) - GFGF (R= 249,83 MPa) et FFGG (R= 259,16 MPa) ;

IV.6 Conclusion partielle :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une modélisation numérique du composite hybride composé de couches de tissu de fibre de verre et de grilles métalliques assemblées par une résine époxy en utilisant le logiciel Abaqus/CAE. L'objectif principal de cette simulation est de reproduire le comportement mécanique du matériau lorsqu'il est soumis aux sollicitations de traction uni axiale et de flexion trois points.

La démarche de modélisation a comporté plusieurs étapes essentielles, notamment la création de la géométrie, la définition des propriétés mécaniques des différents constituants, la mise en place de la séquence d'empilement (Composite Layup), la définition des interactions entre les couches, le maillage du modèle, l'application des conditions aux limites et des chargements, ainsi que le lancement du calcul et l'exploitation des résultats.

L'utilisation d'une liaison parfaite (Tie Constraint) entre les différentes couches permet de représenter l'adhérence assurée par la résine époxy, tandis que le contact entre les rouleaux et l'éprouvette dans l'essai de flexion est modélisé à l'aide d'un contact de type Hard Contact avec une condition de frottement négligeable. La sélection des éléments finis et des paramètres de calcul assure une représentation satisfaisante du comportement global du composite.

Enfin, le module Visualisation a donné l'opportunité d'obtenir les champs de contraintes, de déformations et de déplacements nécessaires pour analyser le comportement mécanique du matériau.

Conclusion Générale

L'objectif visé dans ce projet est de contribuer à la compréhension du comportement des matériaux composites en particulier les stratifiés monocouches hybrides sous des sollicitations de traction et de flexion 3 points. Le travail consiste en une caractérisation expérimentale et une simulation numérique en utilisant un code de calcul par éléments finis.

Cette étude nous a permis de montrer que, le choix de la séquence d'empilement et la nature des renforts ont une influence directe sur la résistance des stratifiés et leurs comportements globaux. Le bon choix nous offre une amélioration de la rigidité et une augmentation de la résistance. L'analyse des différents résultats donnés par les essais mécaniques réalisés au laboratoire montre une bonne concordance avec ceux obtenus par la simulation numérique, telle qu'illustrée par la confrontation des différents résultats. Dans l'ensemble, l'erreur commise est acceptable.

Enfin, ces résultats sont considérés comme préliminaires, à cet effet, en perspectives, il est recommandé de poursuivre le travail en améliorant la disposition des renforts, tenant compte de l'inclinaison des mailles, considérant d'autres combinaisons de renforts, etc.

Référence bibliographique

- [1]: Jean Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2010
- [2]: Djebbloun Youcef, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [3]: Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. ' Ecole d'ingénieur. 2008. <cel00470296v1>
- [4]: Jean Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2012
- [5] : thèse de doctorat (Synthèse et caractérisation d'un matériau composite à base de fibre de verre) par Mme MOKHTAR Djamilia 2024
- [6]: Soualah Sara (2018). Amélioration des Performances d'un Matériau Composite Stratifié Biomécanique chargé de granulés de noyaux de dattes. Mémoire de master, Université Badri Mokhtar Annaba.
- [7]: Gay, D., Matériaux composites, Éditions Hermès.
- [10]: M. Mezzo Agiles, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.
- [8]: Journal of Matériaux Resarci and Technology Volume 8, Issue 6, November – December 2019, Pages 6354-6374
- [9]: GRANITEX .Catalogue Fiches Techniques GRANITEX [en ligne]. Alger [Consulté le 9 May 2022]. Format PDF.
- [10]: Guerza-Soualah, S., Introduction aux matériaux composites, Éditions OPU.
- [11]: ASTM. Standard Test Méthode for T'ensile Propretés of Polymère Matrix Composite Matériaux. ASTM D 3039/D 3039M – 00e1, Décembre 2000. Conshohocken oust: ASTM, 2000.
- [12] : ASTM. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D 7264/D 7264M – 07, 2007. Conshohocken oust: ASTM, 2007.
- [13]: Dassault Systèmes. Getting Started with Abaqus Interactive Edition Version 6.8 [en ligne]. ETATS-UNIS : Dassault Systèmes, 2008
- [14]: Polycopié de Travaux Pratiques Logiciels de simulation numérique en mécanique ABAQUS Master Génie Mécanique Présenté par : Dr : DEGHBOUDJ Samir
- [15]: Gay, D. (2015). Composite Materials : Design and Applications. (Très complet sur les aspects industriels et de conception).