



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Maintenance en Electromécanique
MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industrielle
Spécialité : Maintenance – Fiabilité – Qualité

Thème

***Modélisation Micromécanique de la Rupture
Longitudinale en Traction des Composites
Unidirectionnels***

Présenté et soutenu publiquement par :

✚ Douis Walid

✚ Ahmed Belbachir Rabie

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. ADJELOUA Abdelaziz	MCB	IMSI-UNIV ORAN2	Président
Mme. ABDI Ghezail	MCA	IMSI-UNIV ORAN2	Encadreur
Mr. ACHACHE Habib	MCA	IMSI-UNIV ORAN2	Examineur

Année 2022/2023

Remerciement

Premièrement on tien a remercié avant tout le bon dieu qui nous a donné le courage et la bonne volonté pendant tous nos curseur universitaire.

Aujourd'hui, je voudrais prendre un moment pour exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements sincères à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de mon projet de fin d'études. Ce parcours n'a pas été facile, mais grâce à votre soutien, j'ai pu le mener à bien avec succès.

J'exprime mes profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à mon encadreur professionnel madame **ABDI GHEZAIL** pour sa bonne volonté d'accepter de m'encadrer, pour tout le temps qu'elle m'a accordée et pour tous les conseils qu'elle m'a prodigué.

Je remercie les membres du jury **Mr. ADJELOUA** et **Mr. ACHACHE** qui me font l'honneur d'examiner ce travail.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes collègues, pour nos discussions stimulantes, notre esprit d'équipe et notre entraide. Nous avons partagé des moments inoubliables et je suis fier d'avoir fait partie de cette communauté d'apprentissage.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont participé à mon projet de recherche, que ce soit en fournissant des ressources, en partageant leurs idées ou en contribuant de quelque manière que ce soit. Votre collaboration a été essentielle à la réussite de mon projet.

Dédicas

A Mon cher père LAID, l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et ma source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation

A ma chère maman ZANA, la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, la lumière à mes yeux ma vie et mon bonheur, Ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études. Que Dieu vous procure une bonne santé et une longue vie. Je vous aime.

À mes chères sœurs **Halima, Wafaa** et **Nour el Imane**, aucun mot ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous

A mon chère frère et mon bras droit **Hamza** mon source de courage

À mon chère amie **Nihad** qu'elle n'a pas cessée de m'encourager.

A tous ceux qui m'ont soutenu durant mes études, mon binôme **Rabie**

Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et Mes collègues.

WALID ...

Dédicas

A Mon cher père Lakhdar, l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et ma source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation

A ma chère maman Rachida, la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, la lumière à mes yeux ma vie et mon bonheur, Ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études. Que Dieu vous procure une bonne santé et une longue vie. Je vous aime.

À ma chère sœur **Nour el houda**, aucun mot ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous

A mes chères frères **Abdelhak** et **Mehdi** mes sources de courage

À mes chères amis qu'ils n'a pas cessent de m'encourager.

Et spécialement ma tante **Senouci Antar Mokhtaria** (رحمة الله عليها)

A tous ceux qui m'ont soutenu durant mes études, mon binôme **Walid**

Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et Mes collègues.

RABIE ...

Résumé

Les composites unidirectionnels sont largement utilisés dans l'industrie pour leurs excellentes propriétés mécaniques, telles que leur résistance élevée et leur légèreté. Cependant, la rupture suivant les différents axes est un phénomène critique qui limite les performances des composites. Ainsi, la modélisation micromécanique de ce processus de rupture devient essentielle pour améliorer la compréhension et la prédiction du comportement mécanique des composites unidirectionnels. Nous avons proposé une analyse numérique par la méthode des éléments finis pour prédire la variation de la force en fonction du déplacement en variant plusieurs paramètres tels que l'orientation des fibres, matériaux des fibres et de la matrice, et la direction des fibres. On trouve que les simulations numériques obtenues sont généralement très consistantes avec les observations expérimentales en plus de donner des informations très pertinentes.

Abstract

Unidirectional composites are widely used in industry for their excellent mechanical properties, such as high strength and light weight. However, fracture along the different axes is a critical phenomenon that limits the performance of composites. Thus, the micromechanical modeling of this fracture process becomes essential to improve the understanding and prediction of the mechanical behavior of unidirectional composites. We have proposed a numerical analysis by the finite element method to predict the variation of the force as a function of the displacement by varying several parameters such as the orientation of the fibers, materials of the fibers and of the matrix, and the direction of the fibers. We find that the numerical simulations obtained are generally very consistent with the experimental observations in addition to giving very relevant information.

ملخص

تستخدم المواد المركبة أحاديّات الاتجاه على نطاق واسع في الصناعة لخصائصها الميكانيكية الممتازة، مثل قوتها العالية وخفة الوزن التي تمتاز بها. ومع ذلك، فإن الكسر على طول المحاور المختلفة هو ظاهرة حرجة تحد من أداء المواد المركبة. وبالتالي، فإن النمذجة الميكانيكية الدقيقة لعملية التصدع هذه تصبح ضرورية لتحسين الفهم والتنبؤ بالسلوك الميكانيكي للمواد المركبة أحادية الاتجاه. لقد اقترحنا تحليلًا عدديًا بطريقة العناصر المحدودة للتنبؤ بتغير القوة كدالة للإزاحة عن طريق تغيير العديد من المعلمات مثل اتجاه الألياف ومواد الألياف والمصفوفة واتجاه ألياف. نجد أن المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها تتوافق بشكل عام مع الملاحظات التجريبية بالإضافة إلى تقديم معلومات ذات صلة للغاية.

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des acronymes	

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Organisation du travail	2

CHAPITRE 01 : Généralités sur les matériaux composites

I. Généralités sur les matériaux composites	4
I.1. Introduction	4
I.2. Définition	4
Grande diffusion	5
Hautes performances	5
I. 3. Constituants des matériaux composites	5
I .3.1. La matrice	6
I.3.2 Les renforts	9
I.3.3 Les Charges et additifs	12
I. 4. Les composites Stratifiés	13
I.4.1 Stratifiés hybrides	14
I. 5 Composites sandwiches	14
I.6 Procédé de fabrication	14
I.7 Avantages et inconvénients des matériaux composites	15
I.7.1 Avantage des matériaux composites	15
I.7.2 Inconvénients des matériaux composites	16
I.8 Domaine d'utilisation des matériaux composites	17
I.9 Mécanismes d'endommagement	17
I.9.1 Rupture de fibre	18
I.9.2 Rupture matricielle	18
I.9.3 Décohésion fibre/matrice	19
I.10 Conclusion	19

CHAPITRE 02 : Volume élémentaire représentatif

II .1.INTRODUCTION	21
II.2.Recherche bibliographiques sur le VER	21
II.3. La méthode de monté Carlo	27
II.3.1. Définition.....	27
II.3.2 Principes de la simulation Monte Carlo	28
II.3.3. Domaine d'utilisation	29
II.3.3. Types d'utilisation	30
II.3.4. Conclusion	30
II.4. Conclusion générale	31

CHAPITRE 03 : Résultats et discussions

III .1 Introduction.....	33
III .2. Modèle géométrique	34
III .3 Maillage	34
III .4 Résultats Discussions	35
III .4.1. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe X.....	35
III.4.1.1 L'effet du matériau	35
III.4.1.2 L'effet de l'orientation des fibres	38
III .4.2. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe Y.....	39
III.4.2.1 L'effet du matériau	39
III.4.2.2 L'effet de l'orientation des fibres	42
III .4.3. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe X.....	43
III.4.3.1 L'effet du matériau	43
III.4.3.2 L'effet de l'orientation des fibres	45
III .4.4. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe Y.....	46
III.4.4.1 L'effet du matériau	46
III.4.4.2 L'effet de l'orientation des fibres	49
IV Conclusion générale	52

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Constituant d'un matériau composite	4
Figure I.2 : Constituants des matériaux composites	5
Figure I.3 : Différent famille de matrices.....	6
Figure I.4 : Les principaux matériaux de renfort.....	9
Figure I.5 Fibre de verre (a), fibre d'aramide (b), fibre céramique (c), fibre naturelle (d), fibre de carbone (e.....	10
Figure I.6 : Structure composite stratifiée.....	13
Figure I.7 : Structure composite sandwich.....	14
Figure I.8 : Type de rupture des composites.....	17
Figure I.9 : Rupture de fibre.....	18
Figure I.10 : Rupture longitudinal de la matrice.....	18
Figure I.11 : Décohésion fibre/matrice.....	19
Figure III.1. Domaine virtuel.....	33
Figure III.2 : le modèle géométrique.....	34
Figure III.3 : le maillage.....	34
Figure III .4. Variation de la force en fonction du déplacement suivant L'axe X pour chaque orientations des fibres : $a_1:(\varphi=0^\circ)$, $a_2:(\varphi=10^\circ)$, $a_3:(\varphi=20^\circ)$, $a_4:(\varphi=30^\circ)$, $a_5:(\varphi=40^\circ)$, $a_6:(\varphi=45^\circ)$, $a_7:(\varphi=50^\circ)$, $a_8:(\varphi=60^\circ)$, $a_9:(\varphi=70^\circ)$, $a_{10}:(\varphi=80^\circ)$, $a_{11}:(\varphi=90^\circ)$ et pour différents matériaux (Verre / PP – Verre Epoxy).....	37
Figure III .5. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque matériaux (A_1 : Verre / PP et A_2 : Verre / Epoxy) Et pour différents orientations des fibres	38

Figure III .6 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque orientations des fibres : $b_1:(\varphi=0^\circ)$, $b_2:(\varphi=10^\circ)$, $b_3:(\varphi=20^\circ)$, $b_4:(\varphi=30^\circ)$, $b_5:(\varphi=40^\circ)$, $b_6:(\varphi=45^\circ)$, $b_7:(\varphi=50^\circ)$, $b_8:(\varphi=60^\circ)$, $b_9:(\varphi=70^\circ)$, $b_{10}:(\varphi=80^\circ)$, $b_{11}:(\varphi=90^\circ)$ et pour différents matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy).....	41
Figure III .7. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque matériaux (B_1 : Verre / PP et B_2 : Verre / Epoxy) et pour différents orientations des fibres.....	42
Figure III .8. (B_3, B_4) Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X et Y pour différents matériaux (B_3 : Verre / PP et B_4 : Verre / Epoxy) et pour $\varphi = 00^\circ$	42
Figure III .9 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque orientations des fibres : $c_1:(\varphi=0^\circ)$, $c_2:(\varphi=10^\circ)$, $c_3:(\varphi=20^\circ)$, $c_4:(\varphi=30^\circ)$, $c_5:(\varphi=40^\circ)$, $c_6:(\varphi=45^\circ)$, $c_7:(\varphi=50^\circ)$, $c_8:(\varphi=60^\circ)$, $c_9:(\varphi=70^\circ)$, $c_{10}:(\varphi=80^\circ)$, $c_{11}:(\varphi=90^\circ)$ et pour différents matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy).....	45
Figure III .10 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque matériaux (C_1 : Alfa / PP et C_2 : Alfa / Epoxy) et pour différents orientations des fibres.....	46
Figure III .11. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque orientations des fibres : $d_1:(\varphi=0^\circ)$, $d_2:(\varphi=10^\circ)$, $d_3:(\varphi=20^\circ)$, $d_4:(\varphi=30^\circ)$, $d_5:(\varphi=40^\circ)$, $d_6:(\varphi=45^\circ)$, $d_7:(\varphi=50^\circ)$, $d_8:(\varphi=60^\circ)$, $d_9:(\varphi=70^\circ)$, $d_{10}:(\varphi=80^\circ)$, $d_{11}:(\varphi=90^\circ)$ et pour différents matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy).....	48
Figure III .12 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque matériaux (D_1 : Alfa / PP et D_2 : Alfa / Epoxy) et pour différents orientations des fibres.....	49
Figure III .13. (D_3, D_4) Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X et Y pour différents matériaux (D_3 : Alfa / PP et D_4 : Alfa / Epoxy) et pour $\varphi = 00^\circ$	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Propriétés des résines polyester	7
Tableau I.2 : Les caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide	8
Tableau I.3 : Propriétés mécaniques des différentes fibres de carbone.....	10
Tableau I.4 : Propriétés mécaniques des fibres	12
Tableau III.1 : caractéristique mécanique des matériaux utilisé	35

Liste des acronymes

HR : Haute résistance

HM : Haut module

PPTA : Paraphénylène téréphtalate amide

UV : Ultra-violet

VER : Volume élémentaire représentatif

MEB : Microscopie électronique à balayage

DMA : Analyse Mécanique Dynamique ou Dynamics Mechanical Analysis

UD : Unidirectionnel

EF : Éléments Finis.

CL : Conditions aux limites.

KUBC : Condition de déformation homogène au contour ou – Kinematic Uniform Boundary Conditions

Vf : Volumiques de fibres

Introduction générale

La modélisation micromécanique de la rupture longitudinale en traction des composites unidirectionnels est un domaine de recherche important dans l'étude des matériaux composites. Cette modélisation cherche à comprendre et à prédire le comportement de rupture des composites unidirectionnels soumis à une charge de traction longitudinale.

Les composites unidirectionnels sont constitués de fibres renforcées, généralement en carbone ou en verre, incorporées dans une matrice polymère. La rupture longitudinale se produit lorsque les fibres se rompent ou se dé laminent le long de la direction de chargement.

La modélisation micromécanique de la rupture longitudinale repose sur l'analyse des interactions entre les différentes phases constitutives du composite, c'est-à-dire les fibres et la matrice. Elle vise à capturer les mécanismes de rupture, tels que la rupture des fibres, l'endommagement de l'interface fibre-matrice et la propagation de fissures.

Différentes approches de modélisation peuvent être utilisées, notamment :

1. Modèles de délaminage : Ces modèles se concentrent sur la prédiction et la propagation des délaminages entre les couches de fibres. Ils utilisent des concepts tels que la mécanique de la rupture et la théorie de la fissuration pour décrire la propagation des délaminages dans le composite.
2. Modèles de rupture des fibres : Ces modèles se focalisent sur la rupture des fibres individuelles. Ils prennent en compte des paramètres tels que la résistance à la traction des fibres, leur distribution de taille, leur orientation et leur adhésion à la matrice. La rupture des fibres peut être modélisée à l'aide de techniques telles que la mécanique de l'endommagement ou la méthode des éléments finis.
3. Modèles d'interface fibre-matrice : Ces modèles analysent l'endommagement de l'interface entre les fibres et la matrice. Ils prennent en compte des facteurs tels que l'adhésion, la décohésion et le cisaillement le long de l'interface. Des approches basées sur la mécanique de l'endommagement ou la mécanique des milieux continus peuvent être utilisées.

La modélisation micromécanique de la rupture longitudinale en traction des composites unidirectionnels vise à améliorer la compréhension du comportement de rupture et à prédire les performances mécaniques des composites. Ces modèles peuvent être utilisés pour optimiser la conception des composites en fonction des propriétés des matériaux constitutifs et des paramètres de fabrication, afin d'améliorer leur résistance et leur durabilité.

Il convient de noter que la modélisation micromécanique est un domaine de recherche actif, et diverses approches et modèles spécifiques peuvent être utilisés en fonction du type de composite, des conditions de chargement et des objectifs de l'étude.

Organisation du travail :

Ce mémoire est constitué de trois chapitres. En premier lieu, nous présenterons des généralités sur les matériaux composites, en mettant principalement l'accent sur les constituants des matériaux composites nous expliquerons les matériaux stratifiés, sandwiches et leurs procédés de fabrication, on cite leurs avantages, leurs inconvénients et leurs domaines d'utilisations.

Nous verrons ensuite dans le deuxième chapitre la définition de VER (volume élémentaire représentatif). Une partie de ce chapitre est consacrée à une recherche bibliographique sur le VER et la méthode de Monte Carlo.

La présentation des résultats débute aux troisièmes chapitres, la présentation des résultats de calculs sur des configurations interpréter, enfin nous concluons ce mémoire.

CHAPITRE 01

Généralité Sur les Matériaux Composites

I. Généralités sur les matériaux composites :

I.1. Introduction :

Les matériaux composites offrent des avantages significatifs par rapport aux matériaux conventionnels. Ils présentent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, entretien réduit, liberté de forme. En raison de leurs excellentes propriétés, leur utilisation comme matériaux de structure dans l'aviation, l'automobile, la construction navale ou la construction a considérablement augmenté. Ces avantages comprennent leur faible densité, leur haute résistance, leur grande rigidité et leur excellente durabilité

I.2. Définition :

Les matériaux composites sont des matériaux constitués de deux ou plusieurs composants différents, combinés pour produire des propriétés uniques et améliorées. Les composites à matrice céramique, par exemple, sont construits principalement pour la ténacité à la rupture, pas pour la résistance. D'autres types de matériaux composites, tels que les composites à base de tissus tissés, peuvent être utilisés pour leur résistance et leur légèreté. Il existe également des fabricants de pièces et d'assemblages composites moulés. La fabrication de composites avec des matrices de résine et de métal est une technologie en constante évolution, offrant des propriétés supérieures à celles des matériaux traditionnels. Les matériaux composites sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les industries de l'aérospatiale, de l'automobile et de la construction, pour leur résistance, leur durabilité et leur légèreté. [1]

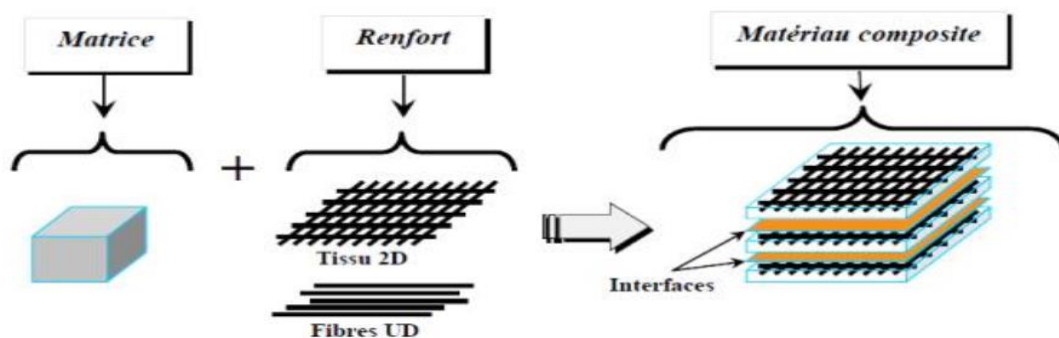


Figure I.1 : Constituant d'un matériau composite

On distingue deux types de composites :

❖ Grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion sont des composites aux performances relativement modestes et aux coûts plus abordables, souvent utilisés dans des applications plus courantes. Ils représentent plus de 95% des applications de matériaux composites. Les matériaux composites à grande diffusion peuvent donc être fabriqués en utilisant différents types de renforts tels que les fibres de verre ou les fibres de carbone, ainsi que différentes matrices telles que les résines époxy ou polyester. [2]

❖ Hautes performances :

Les matériaux composites à hautes performances sont des matériaux qui présentent des propriétés exceptionnelles en termes de résistance, de légèreté et de performance mécanique. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'industrie navale, le sport, et même dans la construction. Et Offrent des avantages significatifs en termes de légèreté, de résistance, de durabilité et de performance mécanique par rapport aux matériaux traditionnels. Cependant, ils peuvent également être plus coûteux à produire et à fabriquer, ce qui limite leur utilisation à des applications nécessitant des performances supérieures. [2]

I. 3. Constituants des matériaux composites :

Les matériaux composites sont composés de trois constituants principaux :

- ✚ La matrice
- ✚ Les renforts et
- ✚ charges et les additifs

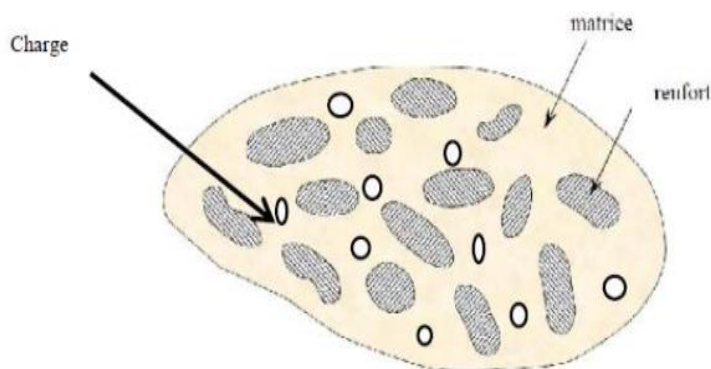


Figure I.2 : Constituants des matériaux composites

La matrice est le matériau qui entoure et maintient les renforts, tandis que les renforts sont les fibres ou les particules qui confèrent au matériau composite ses propriétés mécaniques.

I .3.1. La matrice :

La matrice est le matériau qui assure la cohésion et la tenue mécanique des renforts. Elle peut être constituée d'une variété de polymères, de métaux, de céramiques ou de composites à matrice métallique. Les matrices polymères sont les plus courantes dans les composites, avec des résines telles que l'époxy, le polyester, le poly imide et le polyamide. Les matrices métalliques, telles que l'aluminium ou le titane, sont utilisées dans les composites à matrice métallique. Les matrices céramiques sont souvent utilisées dans les composites à haute température. [3]

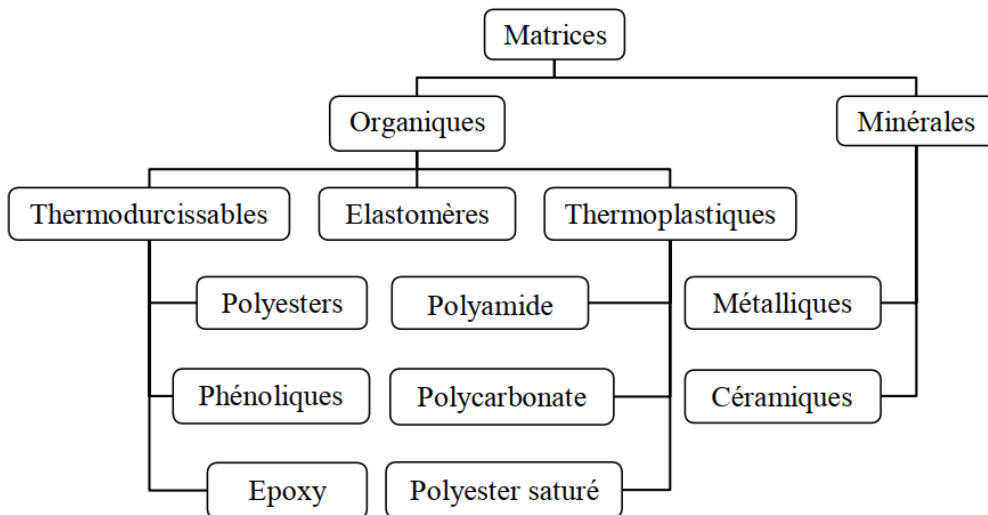


Figure I.3 : Différent famille de matrices

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques

a) - Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont des types de matrices polymères largement utilisées dans la fabrication de matériaux composites. Elles sont caractérisées par leur capacité à durcir de manière permanente Lorsqu'elles sont chauffées, formant ainsi une structure solide et durable. [3]

1) Les résines époxydes :

La résine époxy est l'une des résines thermodurcissables les plus utilisées dans les composites. Elle offre une excellente adhérence, une bonne résistance chimique et des propriétés mécaniques élevées. Les résines époxy sont souvent utilisées dans des applications nécessitant une résistance structurelle, telles que l'aérospatiale, l'automobile, les sports de haut niveau et les applications industrielles.

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- ❖ Masse volumique 1100 à 1500 kg/m³
- ❖ Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa
- ❖ Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa
- ❖ Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa
- ❖ Allongement à la rupture 2 à 5 %
- ❖ Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa
- ❖ Température de fléchissement sous charge 290 °C

2) Les résines polyesters :

Les résines polyesters sont un type de résine thermoset utilisée dans la fabrication de matériaux composites. Elles sont largement utilisées dans diverses industries en raison de leur coût abordable, de leur facilité de traitement et de leurs propriétés mécaniques adaptées à certaines applications.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none">- Bon accrochage sur la fibre de verre- Facilité de mise en œuvre- Assez bonne tenue chimique- Prix faible	<ul style="list-style-type: none">- Retrait important (6 à 7% en volume)- Inflammable- Durée de conservation limitée- Temps de travail limité

Tableau I.1 : Propriétés des résines polyester

3) Les résines de condensation :

Les résines de condensation sont un type de résine synthétique utilisée dans divers domaines, tels que la chimie, les revêtements, les adhésifs, la dentisterie et l'ingénierie des polymères. Elles sont obtenues par une réaction de condensation, qui est une réaction chimique dans laquelle deux substances réagissent pour former une seule substance avec l'élimination d'une molécule d'eau ou d'un autre petit composé.

Les résines de condensation sont généralement fabriquées à partir de deux types de composés chimiques : un composé contenant des groupes fonctionnels réactifs, tels que des groupes amines ou hydroxyles, et un composé contenant des groupes fonctionnels réactifs complémentaires, tels que des groupes isocyanates ou des groupes époxy. Lorsqu'ils sont mélangés ensemble, ces composés réagissent entre eux pour former des liaisons chimiques, créant ainsi un réseau tridimensionnel solide.

Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Masse volumique 1 200 kg/m³

Module d'élasticité en flexion 3 GPa

Contrainte à la rupture en traction 40 MPa

GENERALITES SUR LES MATRIAUX COMPOSITES

Allongement à la rupture en traction 2,5 %

Contrainte à la rupture en flexion 90 MPa

Résistance à la compression 250 MPa

Température de fléchissement sous charge 120 °C

b) Les Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques sont un type de polymères qui se ramollissent lorsqu'ils sont chauffés et peuvent être façonnés et reformés à plusieurs reprises. Contrairement aux résines thermodurcissables, qui se solidifient de manière permanente lorsqu'elles sont chauffées, les résines thermoplastiques conservent leur structure chimique et peuvent être fondues et refroidies plusieurs fois sans subir de changements chimiques irréversibles.

Les résines thermoplastiques sont largement utilisées dans de nombreux domaines en raison de leurs propriétés et avantages distincts. Parmi les avantages clés, on trouve leur capacité à être fondus et moulés à plusieurs reprises, ce qui permet des opérations de mise en forme efficaces et une recyclabilité élevée. Elles présentent également une bonne résistance chimique, une faible absorption d'humidité, une résistance à la fatigue et une bonne résistance aux chocs.

L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication (injection, extrusion). Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide [3]

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m ³)	900	1 140
Contrainte à la rupture (MPa)	20–35	60–85
Module d'élasticité (GPa)	1,1–1,4	1,2–2,5
sous charge (°C)	50–60	65–100

Tableau I.2 : Les caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide

c) Les résines thermostables :

Les résines thermostables sont généralement fabriquées à partir de monomères liquides ou solides qui subissent une réaction de polymérisation, généralement appelée réticulation ou réticulation en réseau. Cette réaction de réticulation crée des liaisons chimiques fortes entre les molécules de monomère, formant un réseau tridimensionnel stable et rigide. Les résines thermostables peuvent être durcies par chauffage à des températures élevées et/ou par l'ajout de catalyseurs chimiques.

Ces résines présentent plusieurs propriétés avantageuses, telles qu'une excellente résistance à la chaleur, à la flamme et aux produits chimiques, ainsi qu'une stabilité dimensionnelle élevée. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines où des propriétés thermiques et mécaniques

élevées sont requises, tels que l'aérospatiale, l'industrie automobile, l'électronique, les composites hautes performances, les revêtements résistants à l'abrasion, les adhésifs structurels, etc.

I.3.2 Les renforts :

Les renforts, dans le contexte des matériaux composites, font référence à des matériaux utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques d'une matrice polymère. Ils sont incorporés dans la matrice pour renforcer sa structure et augmenter sa résistance, sa rigidité et d'autres caractéristiques souhaitées.

Les renforts les plus couramment utilisés dans les composites sont les fibres. Les fibres peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, tels que le verre, le carbone, l'aramide (par exemple, le Kevlar) et les polymères renforcés de fibres naturelles (par exemple, le lin ou le chanvre). Ces fibres sont souvent disponibles sous forme de fils continus, de tissus, de nattes ou de pré imprégnés (prépregs).

Lorsqu'elles sont incorporées dans une matrice polymère, les fibres fournissent une résistance en tension élevée et une rigidité élevée, ce qui permet aux composites renforcés de supporter des charges importantes. Les fibres de carbone, en particulier, offrent une résistance spécifique exceptionnelle, ce qui signifie qu'elles sont très résistantes pour leur poids. [4]

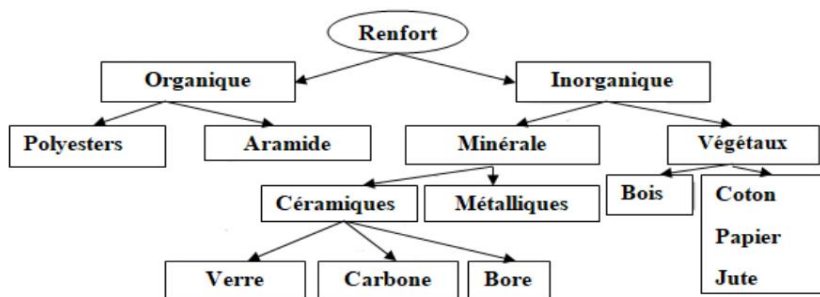


Figure I.4 : Les principaux matériaux de renfort

I.3.2.1 Les Fibres :

Les fibres sont des matériaux allongés et fins, souvent utilisés comme renforts dans les composites pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux composites. Elles sont généralement fabriquées à partir de différents types de matériaux :

- Fibre de carbone
- Fibre de verre
- Fibre d'aramide
- Fibre naturelle
- Fibre céramique.

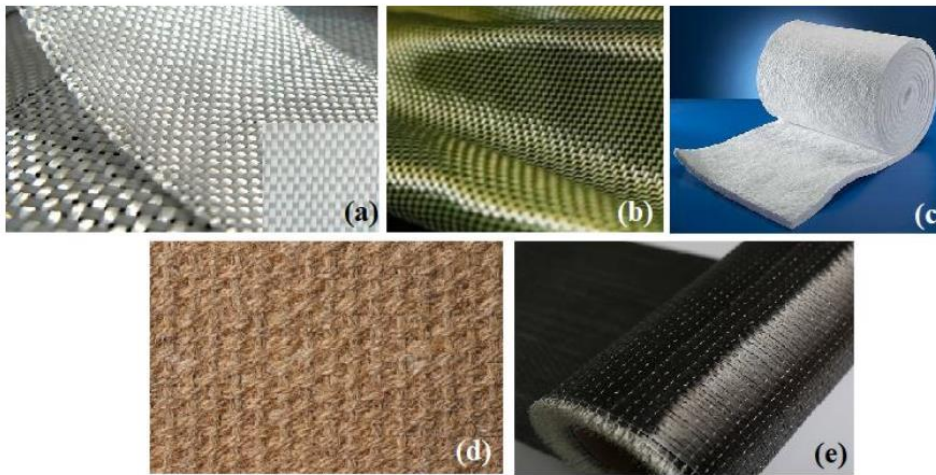


Figure I.5 Fibre de verre (a), fibre d'aramide (b), fibre céramique (c), fibre naturelle (d), fibre de carbone (e).

a) Fibre de carbone :

La fibre de carbone est un type de fibre renfort utilisée dans les matériaux composites. Elle est fabriquée à partir de fibres de carbone hautement cristallines, obtenues par pyrolyse de précurseurs carbonés, tels que le poly acrylonitrile (PAN), le rayon ou le goudron de houille. La fibre de carbone se distingue par sa résistance élevée, sa rigidité exceptionnelle et sa légèreté. [5]

Les propriétés uniques de la fibre de carbone en font un choix populaire dans de nombreuses applications où la performance mécanique est cruciale. Voici quelques caractéristiques de la fibre de carbone :

On distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

Les propriétés des différentes fibres de carbone sont données par le tableau suivant :

Type de fibres	Densité	Module en traction GPA	Résistance à la rupture MPA	Allongement %	Coefficient de dilatation 10-6/°C
Fibre de carbone HR	1.76	230	3290	1,4	3
Fibre de carbone HM	1.81	399	2450	0,5	-0,5

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques des différentes fibres de carbone

b) Fibre de verre :

La fibre de verre est un type de fibre renfort largement utilisée dans les matériaux composites. Elle est fabriquée à partir de verre fondu extrudé en fines fibres continues. Ces fibres sont ensuite regroupées pour former des fils ou des tissus qui serviront de renfort dans la matrice polymère.

Le verre D : à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications, en particulier les radomes;

Le verre C : résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique;

les verres R et S : à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

c) Fibre de d'aramide :

La fibre d'aramide est un type de fibre renfort utilisée dans les matériaux composites. Elle est fabriquée à partir de polymères aromatiques synthétiques, tels que le poly-paraphénylène téréphtalamide (PPTA), communément connu sous le nom de Kevlar®. La fibre d'aramide se caractérise par sa résistance exceptionnelle à la traction, sa légèreté et sa résistance aux produits chimiques.

La fibre d'aramide est utilisée dans une variété d'applications, telles que les gilets pare-balles, les casques de protection, les gants résistants aux coupures, les renforts structurels dans l'industrie aérospatiale et automobile, les câbles résistants au feu, les pneus renforcés, les voiles pour voiliers de compétition, et bien plus encore. Sa combinaison de légèreté, de résistance et de résistance aux produits chimiques en fait un matériau très apprécié dans de nombreux domaines.

d) Fibre de céramique :

La fibre de céramique, également connue sous le nom de fibre réfractaire, est un type de fibre renfort utilisée dans les matériaux composites à base de céramique. Elle est fabriquée à partir de matériaux céramiques tels que l'alumine, la silice, le carbure de silicium ou le nitrure de silicium. Ces fibres sont fabriquées par des techniques de filage spéciales, telles que l'étirage ou l'extrusion. Il convient de noter que les fibres de céramique peuvent être rigides et cassantes, ce qui peut poser des défis lors de leur manipulation et de leur mise en œuvre dans les composites. Des techniques appropriées doivent être utilisées pour garantir une bonne adhérence entre les fibres de céramique et la matrice, afin d'obtenir des performances optimales dans les composites à base de céramique.

e) Fibre naturelle :

Les fibres naturelles sont des fibres d'origine végétale, animale ou minérale qui sont utilisées dans diverses applications, y compris dans la fabrication de matériaux composites. Les fibres naturelles présentent diverses propriétés, telles que la résistance, l'élasticité, la douceur, la légèreté et la durabilité, en fonction de leur source et de leur traitement. Elles sont appréciées pour leur caractère renouvelable, leur aspect écologique et leur apparence naturelle. Les composites à base de fibres naturelles sont utilisés dans des applications telles que les panneaux

GENERALITES SUR LES MATRIAUX COMPOSITES

de construction, les pièces automobiles, les meubles, les emballages et les jouets, offrant une alternative écologique aux fibres synthétiques.

I.3.2.2 Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base :

fibre	densité	σ_r (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	E_L (MPa) Longitudinale	Diamètre du filament élémentaire μm
Verre E	2.54	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400000	8
Bore	2.63	3500	0.8	400000	100-200

Tableau I.4 : Propriétés mécaniques des fibres

I.3.3 Les Charges et additifs :

I.3.3 .1 Les charges :

Les charges dans un matériau composite sont des particules ou des fibres ajoutées à la matrice pour renforcer ou améliorer certaines propriétés du matériau. Contrairement aux renforts qui apportent une résistance mécanique, les charges sont souvent utilisées pour modifier d'autres caractéristiques telles que la conductivité électrique, la conductivité thermique, la résistance chimique ou la densité. Les charges sont généralement ajoutées à la matrice lors du processus de fabrication du matériau composite, soit directement sous forme de particules, soit préalablement dispersées ou enrobées pour faciliter leur incorporation. Les proportions et la nature des charges utilisées dépendent des propriétés souhaitées dans le matériau composite final.

Il convient de noter que l'ajout de charges peut également affecter d'autres propriétés du matériau, comme la résistance à la rupture, la ductilité et la résistance aux chocs, en fonction de la quantité, de la forme et des caractéristiques des charges utilisées. On a deux types de charges :

➤ **Les charges renforçant** : Les charges renforçantes sont des particules ou des fibres ajoutées à une matrice dans un matériau composite dans le but d'améliorer sa résistance et ses propriétés mécaniques. Ces charges renforcent la matrice en augmentant sa rigidité, sa résistance à la traction, sa résistance à la compression, ou en améliorant d'autres caractéristiques telles que la résistance aux chocs ou la résistance à l'usure.

➤ **Les charges non renforçantes** : Les charges non renforçantes, également appelées charges fonctionnelles, sont des particules ajoutées à une matrice de matériau composite pour apporter des propriétés spécifiques sans nécessairement renforcer le matériau. Ces charges peuvent avoir des effets sur la conductivité électrique, la conductivité thermique, la résistance chimique, la résistance aux UV, la couleur, la densité, la lubrification, etc. [6]

I.3.3 .2 Les additifs :

Les additifs sont des substances chimiques ajoutées aux matériaux composites pour améliorer certaines propriétés ou pour faciliter le processus de fabrication. Les additifs peuvent être utilisés pour modifier la résistance, la durabilité, la résistance aux UV, la stabilité thermique, la résistance chimique, la résistance au feu, la viscosité, la couleur, la fluidité, l'adhésion et bien d'autres caractéristiques du matériau composite. Les additifs sont sélectionnés en fonction des besoins spécifiques de l'application et sont incorporés à la matrice lors de la fabrication pour améliorer les performances du matériau composite final.

I. 4. Les composites Stratifiés :

Les composites stratifiés, également appelés laminés, sont des matériaux composites constitués de plusieurs couches de renforts, généralement des fibres, et d'une matrice qui les lie ensemble. Ces couches sont disposées de manière stratifiée et sont souvent empilées dans des orientations différentes pour optimiser les propriétés mécaniques du matériau final. [7]

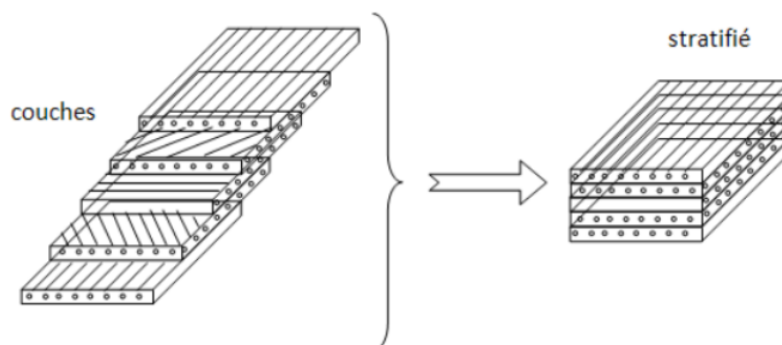


Figure I.6 : Structure composite stratifiée

I.4.1 Stratifiés hybrides :

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes.

Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation et on distingue :

- **Hybrides inter couches** : constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente
- **Hybrides intra couches**: constitués par une séquence de couches identiques. Chaque couche étant constituée de renforts différents

I. 5 Composites sandwiches :

Les composites sandwiches sont une classe spécifique de matériaux composites qui se caractérisent par une structure en sandwich, composée de trois couches principales : une couche centrale appelée âme (core) et deux couches externes appelées peaux (skins). La couche centrale agit comme une structure de soutien légère et rigide, tandis que les peaux fournissent la résistance mécanique et protègent l'âme contre les dommages. [8]

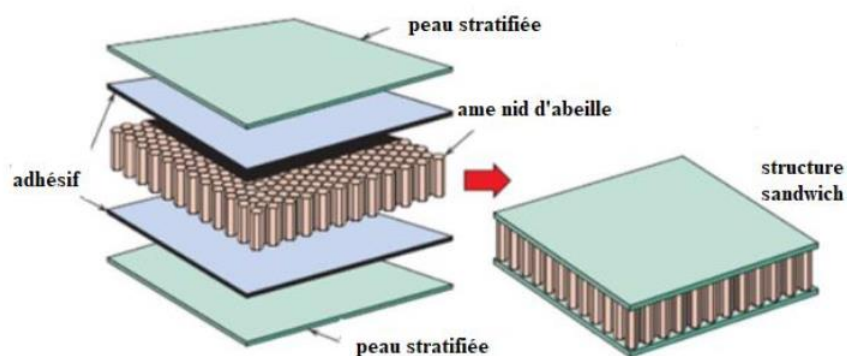


Figure I.7 : Structure composite sandwich

I.6 Procédé de fabrication :

Le procédé de fabrication des composites comprend généralement les étapes suivantes :

- Moulage au contact
- Moulage par projection simultanée
- Moulage par injection de résine
- Moulage sous vide
- Moulage en continue
- Moulage par enroulement filamentaire (ou bobinage). [9].

I.7 Avantages et inconvénients des matériaux composites :

I.7.1 Avantage des matériaux composites :

Les matériaux composites présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux traditionnels tels que les métaux, les céramiques ou les polymères non renforcés. Voici quelques avantages clés des matériaux composites :

1. Résistance et légèreté : Les composites allient une résistance mécanique élevée à un poids relativement faible. Ils offrent une excellente résistance spécifique, ce qui signifie qu'ils peuvent supporter des charges élevées tout en étant légers. Cela les rend idéaux pour les applications nécessitant une résistance structurelle tout en minimisant le poids, comme dans l'aérospatiale, l'automobile et la construction.
2. Résistance à la corrosion : Les composites ne sont pas sensibles à la corrosion, contrairement aux métaux. Cela les rend adaptés aux environnements agressifs tels que les milieux marins, chimiques ou humides, où la corrosion peut réduire considérablement la durée de vie des matériaux.
3. Adaptabilité des propriétés : Les composites permettent de personnaliser les propriétés du matériau en ajustant la composition, l'orientation des fibres, l'épaisseur des couches, etc. Cela permet de répondre aux besoins spécifiques de chaque application en termes de résistance, de rigidité, de conductivité, de résistance aux impacts, etc.
4. Isolation électrique : Les composites présentent généralement une excellente isolation électrique, ce qui les rend adaptés à des applications où une isolation électrique est nécessaire. Ils peuvent également être conçus pour être conducteurs électriques en ajoutant des charges appropriées.
5. Résistance aux températures élevées : Certains composites, notamment ceux à base de fibres de carbone, présentent une excellente résistance aux températures élevées. Ils conservent leurs propriétés mécaniques à des températures bien supérieures à celles des métaux.
6. Design complexe : Les composites offrent une grande flexibilité en termes de design et de forme. Ils peuvent être moulés dans des formes complexes, intégrant des courbures, des angles et des géométries variées, ce qui permet une liberté de conception accrue par rapport à d'autres matériaux.
7. Absorption des vibrations et des chocs : Les composites présentent une bonne capacité d'absorption des vibrations et des chocs, ce qui les rend adaptés à des applications où il est nécessaire de réduire les vibrations, d'amortir les impacts ou de minimiser les nuisances sonores.

Il convient de noter que les avantages spécifiques des matériaux composites peuvent varier en fonction de leur composition, de leur structure et de leur utilisation. Ces avantages en font un choix attrayant dans de nombreux domaines, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la construction, les sports et loisirs, et bien d'autres.

I.7.2 Inconvénients des matériaux composites :

Malgré leurs nombreux avantages, les matériaux composites présentent également quelques inconvénients potentiels. Voici quelques-uns des principaux inconvénients des matériaux composites :

1. Coût élevé : Les matériaux composites peuvent être plus coûteux que les matériaux traditionnels tels que les métaux. Les procédés de fabrication des composites sont souvent plus complexes et nécessitent des équipements spécialisés, ce qui peut contribuer à des coûts plus élevés. De plus, les matériaux de renfort tels que les fibres de carbone ou d'aramide sont généralement coûteux.
2. Difficulté de réparation : En cas de dommages ou de défaillance, les composites peuvent être plus difficiles à réparer que les matériaux traditionnels. Les dommages peuvent être plus difficiles à détecter et à évaluer, et les procédures de réparation peuvent nécessiter une expertise spécifique et des matériaux spécialisés.
3. Sensibilité à certains produits chimiques : Certains composites peuvent être sensibles à certains produits chimiques ou solvants. Ces substances peuvent endommager la matrice polymère et affaiblir les propriétés mécaniques du matériau composite. Il est donc important de prendre en compte la compatibilité chimique lors de l'utilisation de composites dans des environnements exposés à des produits chimiques agressifs.
4. Sensibilité à la chaleur : Bien que certains composites aient une bonne résistance à la chaleur, d'autres peuvent être sensibles aux températures élevées. Une exposition prolongée à des températures élevées peut entraîner une dégradation des propriétés mécaniques du matériau composite.
5. Variabilité des propriétés : Les propriétés des composites peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la qualité de fabrication, les variations dans la distribution des renforts, les variations de température et d'humidité lors de la fabrication, etc. Cela peut rendre la caractérisation et la prévision des performances des composites plus complexes.
6. Impact environnemental : Certains composites peuvent poser des défis en termes d'impact environnemental. Certains renforts, tels que les fibres de carbone, nécessitent des procédés de production énergétiquement intensifs et peuvent générer des déchets difficiles à éliminer. Cependant, des efforts sont en cours pour développer des composites plus durables et des méthodes de recyclage des matériaux composites.

Il est important de noter que ces inconvénients peuvent varier en fonction des spécificités des matériaux composites utilisés, de la conception et de l'application.

I.8 Domaine d'utilisation des matériaux composites :

Les matériaux composites sont utilisés dans une large gamme de domaines et d'applications en raison de leurs propriétés uniques. Voici quelques domaines clés où les matériaux composites sont couramment utilisés :

1. Aérospatiale
2. Automobile
3. Construction et génie
4. Sports et loisirs
5. Industrie maritime
6. Énergie éolienne
7. Secteur médical

Ces exemples ne sont qu'une partie des nombreux domaines d'utilisation des matériaux composites. Les composites sont également utilisés dans l'industrie électrique et électronique, le secteur militaire, l'industrie pétrolière et gazière, l'industrie des produits de consommation, et bien d'autres encore.

I.9 Mécanismes d'endommagement :

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- la rupture des fibres,
- la rupture de la matrice,
- la rupture de l'interface fibre-matrice.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées [10]

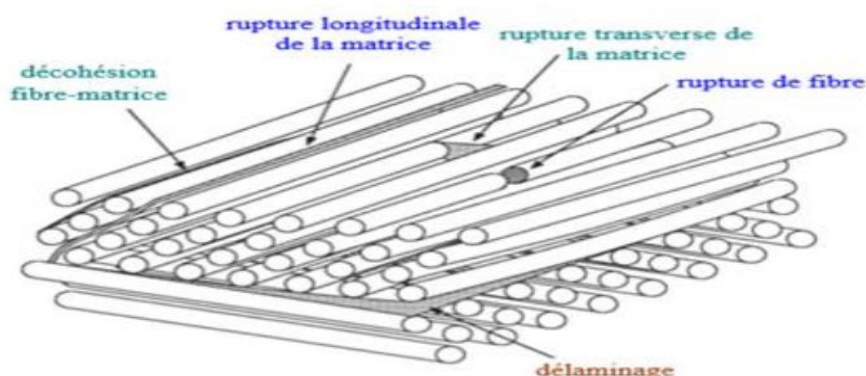


Figure I.8 : Type de rupture des composites

I.9.1 Rupture de fibre :

La rupture de fibre, également connue sous le nom de défaillance de la fibre, se produit lorsqu'une ou plusieurs fibres dans un matériau composite se cassent ou se brisent sous l'effet d'une contrainte appliquée. La rupture de fibre peut avoir des conséquences significatives sur les propriétés mécaniques et la résistance du matériau composite.

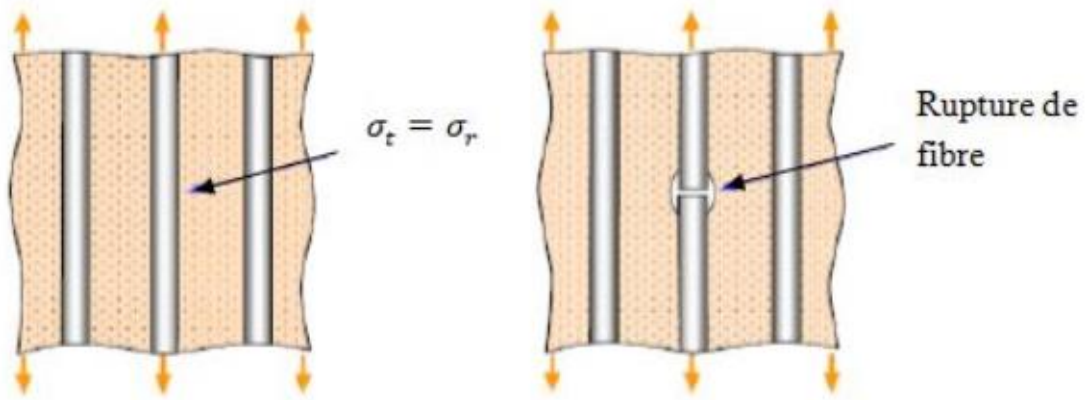


Figure I.9 : Rupture de fibre

I.9.2 Rupture matricielle :

La rupture matricielle, également connue sous le nom de défaillance matricielle, se produit lorsque la matrice polymère d'un matériau composite se brise ou se fissure sous l'effet d'une contrainte appliquée. La rupture matricielle peut avoir des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau composite.

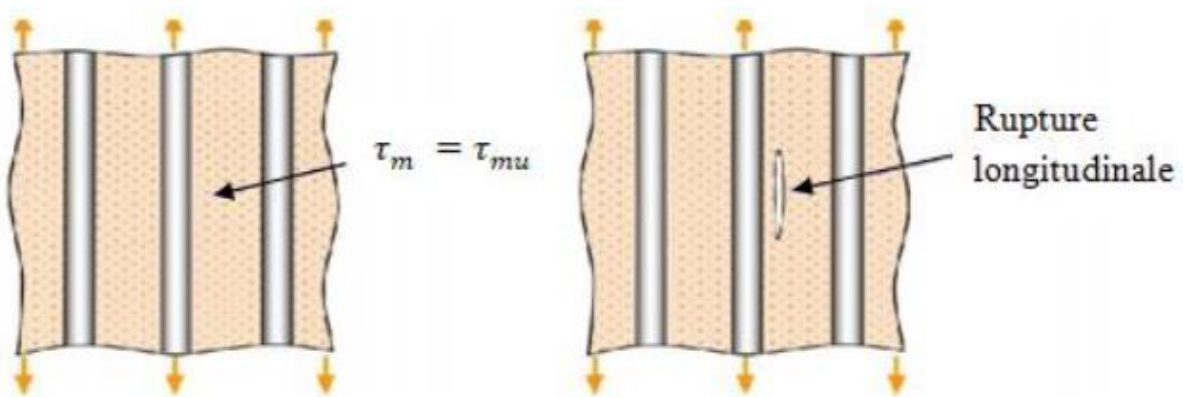


Figure I.10 : Rupture longitudinal de la matrice

I.9.3 Décohésion fibre/matrice :

La décohésion fibre/matrice, également appelée délaminage, se produit lorsqu'il y a une séparation ou un détachement entre les fibres de renfort et la matrice polymère dans un matériau composite. C'est une défaillance critique qui peut considérablement affecter les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau composite. [11]

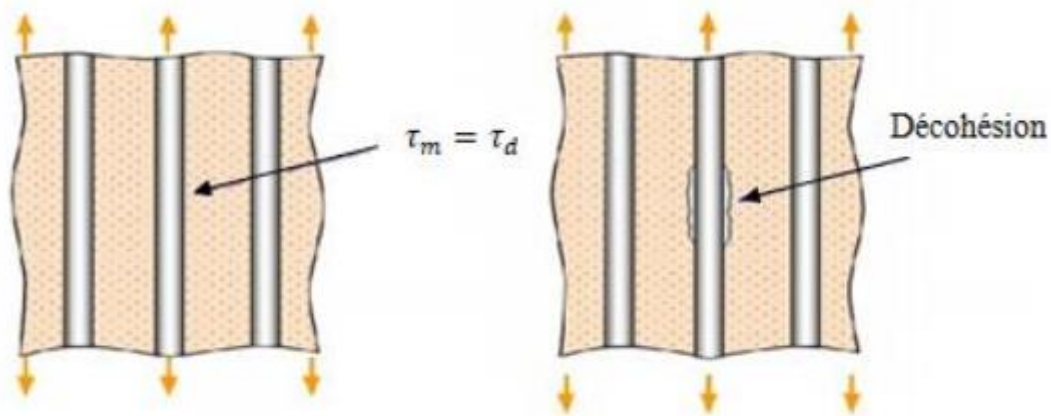


Figure I.11 : Décohésion fibre/matrice

I.10 Conclusion :

En conclusion, les matériaux composites offrent de nombreux avantages et sont largement utilisés dans divers domaines d'application. Leur combinaison de différents renforts et matrices permet d'obtenir des propriétés mécaniques et physiques supérieures par rapport aux matériaux traditionnels et qui représentent une révolution dans le domaine des matériaux, offrant des performances exceptionnelles, une légèreté remarquable et une grande adaptabilité. Leur potentiel est énorme et ils continueront à jouer un rôle essentiel dans l'innovation technologique et l'amélioration des produits, contribuant ainsi à façonner l'avenir de nombreuses industries.

CHAPITRE 02

Volume Élémentaire Représentatif

II.1.INTRODUCTION :

Le volume élémentaire représentatif (VER) est une notion utilisée en science des matériaux pour décrire une unité de base qui représente les propriétés d'un matériau composite à l'échelle macroscopique. Pour les matériaux composites, qui sont des matériaux formés par la combinaison de deux ou plusieurs constituants distincts, le VER est généralement utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques et physiques du matériau à l'échelle globale.

Le choix du VER dépend de la structure et de la nature du matériau composite étudié, ainsi que des propriétés spécifiques à évaluer. En général, le VER est défini de manière à inclure à la fois la matrice (la phase continue qui entoure les renforts) et les renforts (la phase discontinue qui confère au matériau ses propriétés particulières).

Par exemple, pour un matériau composite renforcé de fibres, le VER pourrait être un petit volume contenant une fibre (ou plusieurs fibres) et la matrice environnante. Ce volume doit être suffisamment grand pour capturer les interactions entre la matrice et les fibres, mais suffisamment petit pour être considéré comme homogène à l'échelle macroscopique.

Il convient de noter que la détermination du VER peut être un processus complexe et dépendant du contexte, et qu'il existe différentes approches et techniques pour le définir et le caractériser. Des méthodes expérimentales, telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) et la tomographie aux rayons X, ainsi que des modèles numériques, sont souvent utilisées pour étudier et déterminer les propriétés du VER dans les matériaux composites.

II.2.Recherche bibliographiques sur le VER :

Cet article aussi de (Can. Geotech. J. en 2001) présente une modélisation mathématique des effets de la fabrication initiale sur le comportement mécanique du sable. Un modèle de dilatance sous contrainte qui incorpore les aspects microstructuraux du sable est obtenu ici en écrivant la conservation d'énergie pour un ensemble de particules dans un volume élémentaire représentatif VER aux échelles micro et macro. Le modèle résultant de dilatance sous contrainte, lorsqu'utilisé dans un cadre élastoplastique, reproduit avec succès certains aspects du comportement du sable qui reflètent la microstructure dans des conditions tant drainées que non drainées. Le rôle de la microstructure en rapport avec la caractérisation des états permanent, quasi permanent et de transformation de phase est discuté dans le cadre du modèle. On trouve que les simulations numériques obtenues avec le modèle proposé sont généralement très consistantes avec les observations expérimentales en plus de donner des informations très pertinentes. [12]

D'après l'étude de (V. Pauchard^{1, 2}, H. Boulharts-Campion¹, F. Grosjean¹, P. Odru¹ et A. Chateuminois² en novembre 2001) Les interactions entre le vieillissement humide de composites unidirectionnels verre/époxy et leur tenue en fatigue par flexion sont ici abordées dans le cadre d'un modèle de durabilité fondé sur des notions de corrosion sous contrainte. L'étude est focalisée sur les stades initiaux de l'endommagement par fatigue, qui sont caractérisés par l'accumulation diffuse, à l'échelle microscopique, des ruptures différées des mono filaments de verre constituant le renfort. Ces processus sont décrits à l'aide d'un modèle de corrosion sous contrainte faisant appel, d'une part, à la distribution initiale des défauts de surface des fibres, d'autre part, à la cinétique de croissance sous-critique de ces mêmes défauts sous l'action combinée des contraintes et de l'humidité. Ces aspects sont validés expérimentalement sur des mèches de fibres non imprégnées, puis à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif de composite. L'existence d'une relation empirique entre la densité de fibres rompues et la raideur en flexion trois points du matériau permet alors d'établir des expressions prédictives de la raideur. Celles-ci sont déduites du calcul de la probabilité de survie des fibres de verre. Le modèle aboutit à la détermination des cinétiques de perte de raideur de poutres de flexion composites en fonction de la nature du chargement mécanique de fatigue (niveau de déformation, fréquence, rapport de sollicitation) et des paramètres environnementaux (température, humidité). Les prédictions sont confrontées à des résultats expérimentaux obtenus sous chargements monotones, quasi statiques (relaxation) et de fatigue cyclique. [13]

D'après l'étude de (K.Komai – K.Minoshima – Tanaka et T.Tokura en Février –Avril 2002) Les influences de la forme d'onde de contrainte et de l'absorption d'eau sur le comportement de rupture de fatigue en traction-tension ont été étudiées dans des stratifiés à plis angulaires de $\pm 45^\circ$ de composite à matrice époxy renforcé de fibres d'aramide. Pour les spécimens secs, la résistance à la fatigue sous la forme d'onde d'impulsion négative était supérieure à celle sous la forme d'onde d'impulsion positive. La rotation des fibres dans le sens longitudinal, résultant de la déformation par fluage causée par la charge cyclique superposée au temps de maintien de la contrainte maximale, a diminué la compliance, augmentant ainsi la durée de vie sous la forme d'onde d'impulsion négative. L'absorption d'eau a dégradé la résistance inter faciale fibre/matrice et provoqué le gonflement de la matrice, ce qui a entraîné une diminution de la résistance à la traction statique et de la résistance à la fatigue. Bien que la force sous la forme d'onde d'impulsion négative soit légèrement supérieure à celle sous la forme d'onde positive, l'influence de la forme d'onde de contrainte sur la résistance à la fatigue était plus faible dans les échantillons humides. [14]

D'après l'étude de (**ZoheirAboura*** **Christiane EL Hage ****, **RafikYounès *****, **MalkBenzeggagh ****, **Mohammed Zoater ****** en septembre 2005) Cette étude concerne la prédiction du comportement élastique en dommageable de matériaux composites à renfort orthogonal 3D carbone. Le modèle proposé est basé sur la technique d'homogénéisation après avoir déterminé les rigidités locales du VER. Deux types de VER font l'objet de cet article. Le premier nommé cellule unitaire est simplifié alors que le second nommé, cellule globale, prend en compte les détails de l'architecture du renfort. La modélisation du comportement élastique est étendue à la prédiction des premiers endommagements avec leur localisation suivie de la prédiction des propriétés ultimes. Une comparaison avec des résultats expérimentaux est effectuée. et qui présente une partie des travaux débutés sur la modélisation du comportement élastique en dommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel (orthogonal 3D, Interlock et tissé cousu). Le renfort présenté est l'architecture orthogonale 3D. L'étude a montré l'importance du choix de VER notamment dans la prédiction des propriétés hors plan. La démarche proposée reste simple et peu onéreuse en temps de calcul mais permet de prédire les propriétés mécaniques de manière satisfaisantes. Une série de tests hors plan doivent être menés afin de poursuivre la validation de la démarche. De plus cette étude a montré que le modèle associé au critère tensoriel 3D de Tsai permettait de prédire convenablement l'avènement et la localisation des premiers endommagements. [15]

Une autre étude de (**Boris Burgarella1**, **Maurel-Pantel Aurelien1** **Lahellec Noell1**, **Bouvard Jean-Luc2**, **Mouline Hervé1**, **Lebon Frédéric1**, **Billion Noelle2** en juin 2017) Que ce soit pour des raisons environnementales ou économiques, la réduction de la masse devient l'un des critères importants de la conception de certaines pièces mécaniques. L'intégration des matériaux composites semble être une bonne solution pour atteindre cet objectif. Les composites thermoplastiques à fibres courtes sont une possibilité intéressante car ils présentent un bon compromis entre facilité de mise en œuvre / caractéristiques mécaniques. L'objectif de cette étude est de modéliser le comportement viscoélastique en petites déformations de composites thermoplastiques renforcés par des fibres courtes de verre. Pour cela, une méthode en champs complets basée sur une résolution des équations dans l'espace de Fourier est utilisée. Des volumes élémentaires représentatifs VER ont été soumis à des chargements de type DMA, ceci permettant de reconstituer numériquement une courbe maîtresse du composite. Ces résultats ont ensuite été utilisés pour identifier un modèle de comportement macroscopique isotrope transverse du composite. [16]

D'après l'étude (**compte rendu de A. Del Mastro^{1*}, F. Trivaudey¹, V. Guicheret-Retell¹, V. Placet¹, L. Boubakarlen 2017**) qu'as présenté une méthodologie pour l'analyse du comportement mécanique des composites à fibres végétales basée sur une approche stochastique multi-échelle.

Les résultats issus d'une première succession de simulations montrent que :

- Les caractéristiques géométriques des microstructures des VER générés respectent les distributions issues de l'observation expérimentale;
- La forme de la non linéarité de comportement reste la même pour tous les VER simulés.
- La rigidité apparente du pli semble indépendante de la taille et de la distribution des fibres au sein du VER, tout du moins lorsque celles-ci ont une section transversale circulaire;[17]

D'après le projet de doctorat de (**Lina RIAÑO VÉLEZ en décembre 2018**) Le comportement mécanique d'un composite UD à matrice polymère renforcée par les fibres de verre soumis à une traction monotone transverse a été simulé à l'aide d'un modèle VER et d'une méthode d'homogénéisation basée sur l'analyse par EF. Une géométrie réaliste a été attribuée aux modèles grâce à l'utilisation du plug-in "RVE for composites" développé en interne pour ce travail. Des micro-modèles 2D à distribution aléatoire de fibres ont été obtenus. Une approche avec des CL basées sur KUBC a été faite. Le but de cette étude était de trouver les caractéristiques appropriées pour un VER afin qu'il puisse prédire correctement le comportement élastique de son équivalent macroscopique avec un temps de simulation raisonnable. En partant de ce fait, une étude paramétrique a été menée pour identifier l'espace de simulation, les caractéristiques de-la maille, les CL et les dimensions du VER. La taille de la maille et le type d'éléments affectent le résultat de la simulation. Pour ce cas, les éléments les plus adéquats sont les quadrangles à 4 nœuds sous l'hypothèse de déformations planes -CPE4-. La simulation avec ce type d'éléments a duré 130s ce qui semble favorable. Par ailleurs, la distribution aléatoire des fibres et les CL ne présentent pas une influence critique sur le comportement mécanique, contrairement au ratio taille VER/diamètre des fibres qui a clairement un effet sur la réponse globale du composite [18]

Les hypothèses faites pour une analyse micromécanique typique peuvent être vues dans les travaux de Horiet Nemat-Nasser Un arrangement carré de fibres et de matrices est un modèle couramment utilisé pour représenter le à micro-échelle des composites à fibres continues .En raison de la symétrie et de la disposition périodique des fibres, un seul réseau rectangulaire peut être utilisé pour analyser le matériau à l'échelle microscopique, appelé élément de volume représentatif (RVE) .Le comportement des fibres végétales a été récemment étudié dans la littérature .Amerri E. L. et ali (2016) ont utilisé un nouveau type de renfort unidirectionnel lin/papier .Le composite lin-papier/époxy est supérieur, tant en résistance spécifique qu'en module ,à un autre composite lin/époxy (sans la couche de papier). Il surpasse également la rigidité spécifique d'un composite unidirectionnel verre E/époxy. [19]

Baley et ali ont étudié les propriétés mécaniques des fibres de lin à l'aide d'expressions micromécaniques, il a été démontré que le module d'Young longitudinal est de l'ordre de 59 GPa et que son module transverse est de l'ordre de 8 GPa [20]

Maligno A. R et ali ont étudié à l'aide d'un modèle d'élément de volume représentatif micromécanique tridimensionnel (RVE) avec un garnissage hexagonal la géométrie et le fini méthode des éléments l'effet de la contrainte résiduelle due au processus de durcissement sur l'évolution des dommages dans les composites polymère-matrice renforcés de fibres unidirectionnelles (UD) sous charge longitudinale et transversale. L'étude est basée sur différents critères de rupture et une technique de dégradation de la rigidité a été utilisée pour l'analyse des dommages de la RVE soumise au chargement mécanique après durcissement pour une gamme de fractions volumiques de fibres. L'initiation et l'évolution des dommages prévus sont clairement influencée par la présence de contraintes résiduelles. [21]

Cichocki et Thomason ont utilisé un modèle semi-empirique micromécanique pour estimer l'anisotropie de la fibre de jute. Sur la base de leurs résultats de simulation, le composite renforcé de fibres de Jute a une rigidité longitudinale de 39,4 GPa et un module transversal de Young de 5,5 GPa [22]

Chen, Lili et al ont explorées, par la méthode des éléments finis avec différentes fractions volumiques de fibres (V_f) et tailles RVE, la réponse moyenne et l'isotropie des éléments volumiques représentatifs 3D (RVE) pour les composites élastomères renforcés de fibres courtes aléatoires (SFEC). Les résultats trouvés par Chen, Lili et al montrent que l'anisotropie des RVE diminue avec l'augmentation de la taille des RVE et est plus élevée pour les RVE avec une V_f plus élevée. L'anisotropie des fibres diminue avec l'augmentation de la V_f . Une méthode de moyenne des réponses de chaque (RVE) sur toutes les directions de chargement réduit considérablement la variation de réponse sur différents RVE, ce qui peut être utilisé pour améliorer la précision de la prédiction plus efficacement que d'augmenter la taille de la (RVE) . [23]

Bourmaud et Baley ont utilisé des tests de traction et de nano indentation pour caractériser le comportement anisotrope des composites renforcés de fibres de chanvre et de sisal. Les tests ont montré que les modules longitudinaux et transversaux sont respectivement de 5, GPa et 3,9 GPa. La zone interracial entre la fibre et la matrice est d'une importance primordiale dans la caractérisation des matériaux composites et leur performance, car elle assure le transfert de charge entre les fibres et la matrice et fournit aux matériaux une performance mécanique élevée. Il convient de noter que des nombreux phénomènes complexes, tels que la création de liens, l'inter-diffusion et les interactions physiques, peuvent survenir et interagir dans ce domaine. [24]

Citant aussi le travail de **Mr Achache ; en Mars 2022** ; Les matériaux composites possèdent une structure géométrique spécialement conçue pour leur conférer des propriétés que leurs constituants élémentaires ne possèdent pas individuellement. Au-delà de tous ses avantages, la question autour de son comportement à long terme fut l'objet de plusieurs travaux ces dernières années, puisque l'objectif est de prolonger sa durée de vie ainsi que prévoir les cas échéants de leur rupture. Dans le but de développer d'avantage ces résultats, nous avons proposé une étude afin d'analyser exclusivement le comportement de fissure du VER (volume élémentaire représentatif) composite Alfa-Verre/Epoxy. Pour ceci, on simule le comportement linéaire de ce composite et l'influence de la longueur de la fissure ainsi que l'inter-distance entre les fibres Alfa et Verre, et dans le but de déterminer l'évolution du facteur d'intensité des contraintes K_I , en utilisant le code de calcul "Abaqus". [25]

Ajoutant son dernier travail « **Mr Achache** » ; en **Décembre 2022** ; qui a travaillé sur les composites, comme tout matériau, peuvent se dégrader sous l'action du chargement qui leur est appliqué en provoquant une dégradation mécanique des pièces composites (fissuration). L'étude des dommages existants et de leur comportement est d'une grande importance. En effet, la fissuration résultant de la propagation d'un défaut peut entraîner la rupture d'un composant qui favoriserait la ruine totale de la structure. La mécanique de la rupture est le bon outil pour analyser ce genre de situation en se basant sur les caractéristiques de rupture du matériau qui sont le facteur d'intensité de contrainte critique (K_{IC}) ou le taux de restitution d'énergie critique (G_C) également appelé ténacité. Cette dégradation du composite a été étudiée par de nombreux auteurs. L'objectif de son travail est d'analyser par la méthode des éléments finis l'évolution du paramètre K_I facteur d'intensité de contrainte de deux volumes élémentaires représentatifs (REV) constitués d'une même matrice époxy et avec des fibres de renfort différentes (Alfa et Verre) en fonction de le déplacement des deux fibres (a) et (b). L'étude numérique a montré que la position des fibres a un rôle important sur le matériau composite ainsi que le REV alfa/époxy se comporte mieux que le REV verre/époxy du fait des bonnes caractéristiques mécaniques du REV alfa/époxy. [26]

II.3. La méthode de monté Carlo :

II.3.1. Définition :

La méthode de Monte Carlo est une technique numérique utilisée pour résoudre des problèmes complexes en utilisant des échantillons aléatoires. Elle tire son nom du célèbre casino de Monte Carlo, connu pour ses jeux de hasard.

La méthode de Monte Carlo repose sur le principe de la simulation aléatoire. Elle consiste à générer un grand nombre de valeurs aléatoires selon une distribution spécifique, puis à utiliser ces valeurs pour estimer des résultats statistiques. Ces résultats sont obtenus en effectuant des calculs sur les échantillons aléatoires et en les agrégeant pour obtenir une estimation numérique.

La méthode de Monte Carlo est particulièrement utile lorsque les problèmes sont difficiles ou impossibles à résoudre analytiquement. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que les sciences, les mathématiques, la finance, l'ingénierie et la physique.

Le processus de Monte Carlo se déroule généralement en plusieurs étapes :

1. Définition du problème : Il s'agit de préciser le problème à résoudre, les variables impliquées et les objectifs recherchés.
2. Génération des échantillons aléatoires : Des valeurs aléatoires sont générées en fonction de la distribution appropriée pour chaque variable du problème.
3. Calcul des résultats : Les échantillons aléatoires sont utilisés pour effectuer les calculs nécessaires, souvent sous la forme de simulations, d'intégrations numériques ou de résolutions d'équations.
4. Agrégation des résultats : Les résultats obtenus à partir des échantillons aléatoires sont agrégés pour estimer les statistiques souhaitées, telles que la moyenne, la variance, les probabilités, etc.

La méthode de Monte Carlo présente l'avantage de pouvoir traiter des problèmes complexes sans nécessiter de formules mathématiques dérivées. Elle est également capable de fournir des résultats probabilistes, tenant compte de l'incertitude et des variations inhérentes aux modèles. [27]

La méthode de Monte Carlo ne repose pas sur une équation spécifique, mais plutôt sur un concept général qui utilise des échantillons aléatoires pour estimer des résultats statistiques. Cependant, il existe des formules et des algorithmes spécifiques utilisés dans le cadre de la méthode de Monte Carlo pour résoudre certains types de problèmes.

L'une des formules couramment utilisées dans la méthode de Monte Carlo est celle de l'intégration Monte Carlo. Elle permet d'estimer numériquement la valeur d'une intégrale en utilisant des échantillons aléatoires.

L'équation générale pour l'estimation de l'intégrale à l'aide de la méthode de Monte Carlo est la suivante :

$$I \approx V * (f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_n)) / n$$

où :

- **I** est l'estimation de l'intégrale recherchée,
- **V** est le volume de l'espace d'intégration (généralement une aire, un volume ou une mesure),
- **f(x)** est la fonction que l'on souhaite intégrer,
- **x₁, x₂, ..., x_n** sont des échantillons aléatoires générés à partir de la distribution appropriée,
- **n** est le nombre total d'échantillons.

L'idée est de générer un grand nombre d'échantillons aléatoires à partir de la distribution appropriée, d'évaluer la fonction f(x) pour chaque échantillon, puis de les agréger pour obtenir une estimation de l'intégrale.

Il existe également d'autres algorithmes spécifiques basés sur la méthode de Monte Carlo, tels que l'algorithme de simulation de Monte Carlo utilisé pour modéliser des phénomènes stochastiques ou l'algorithme de recherche de Monte Carlo utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation.. [28]

II.3.2 Principes de la simulation Monte Carlo :

La simulation Monte Carlo repose sur trois paramètres importants :

➤ l'échantillon important

La méthode Monte Carlo consiste à choisir un échantillon qui contient les états dominants.

Cette opération s'appelle l'échantillon important

➤ la balance détaillée

La condition de la balance détaillée assure que la distribution de probabilité de Boltzmann

Générée après que le système considéré atteint l'équilibre, est la plus grande de toutes les autres

Distributions

➤ le taux d'acceptation

II.3.3. Domaine d'utilisation :

La méthode de Monte Carlo trouve de nombreuses utilisations dans divers domaines. Voici quelques exemples d'applications courantes de la méthode de Monte Carlo :

- **Intégration numérique** : La méthode de Monte Carlo est souvent utilisée pour estimer numériquement des intégrales, en particulier dans les cas où les méthodes analytiques ne sont pas applicables ou trop complexes. Elle permet d'obtenir une estimation de la valeur d'une intégrale en utilisant des échantillons aléatoires.
- **Simulation de phénomènes stochastiques** : La méthode de Monte Carlo est utilisée pour simuler des systèmes et des phénomènes complexes qui présentent une composante de hasard. Par exemple, elle est utilisée en physique pour simuler des collisions de particules, en finance pour modéliser des mouvements de prix d'actifs ou en météorologie pour simuler des modèles de prévision du temps.
- **Évaluation de risques financiers** : La méthode de Monte Carlo est utilisée pour évaluer les risques financiers, tels que les pertes potentielles d'un portefeuille d'investissements. En utilisant des échantillons aléatoires pour modéliser les variations possibles des prix d'actifs, elle permet d'estimer les distributions de rendements et de calculer des mesures de risque telles que la Value at-Risk (VAR) ou l'Expected Shortfall (ES).
- **Optimisation et recherche opérationnelle** : La méthode de Monte Carlo est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation et de recherche opérationnelle. Elle permet d'explorer de manière stochastique l'espace des solutions et de trouver des solutions approximatives ou des estimations de la meilleure solution possible.
- **Modélisation de phénomènes physiques** : La méthode de Monte Carlo est utilisée pour modéliser des phénomènes physiques complexes tels que la diffusion de particules, les processus de désintégration radioactive ou les propriétés de matériaux. Elle permet d'estimer des grandeurs physiques à partir d'échantillons aléatoires et de caractéristiques spécifiques du système étudié.

Ces exemples ne sont qu'une petite partie des nombreuses applications de la méthode de Monte Carlo. En général, cette méthode est utilisée chaque fois qu'il est nécessaire d'estimer des résultats statistiques ou de simuler des phénomènes aléatoires dans des problèmes complexes où les approches analytiques ou déterministes sont difficiles ou impossibles à appliquer. [28]

II.3.3. Types d'utilisation :

La méthode de Monte Carlo peut être utilisée de différentes manières :

1. Simulation : Elle permet de simuler des phénomènes aléatoires en utilisant des nombres aléatoires. Par exemple, simuler des trajectoires de particules, des processus stochastiques, des fluctuations de marché, etc.
2. Évaluation d'intégrales : Elle est utilisée pour calculer numériquement des intégrales en approximant l'intégrande par des échantillons aléatoires. Cela est particulièrement utile pour les intégrales multidimensionnelles complexes.
3. Optimisation : La méthode de Monte Carlo peut être utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation en cherchant les valeurs optimales dans un espace de recherche en utilisant des échantillons aléatoires. [29]

II.3.4. Conclusion :

La méthode de Monte Carlo est une approche puissante pour résoudre des problèmes complexes et est largement utilisée dans de nombreux domaines. Elle offre une flexibilité et une précision accrues par rapport aux méthodes analytiques traditionnelles. Cependant, son principal inconvénient est sa dépendance aux nombres aléatoires et aux simulations, ce qui peut nécessiter une puissance de calcul importante. Malgré cela, la méthode de Monte Carlo reste un outil essentiel pour l'analyse de systèmes complexes et la prise de décisions éclairées dans de nombreux domaines.

II.4. Conclusion générale :

D'après ces études, le volume élémentaire représentatif (VER) est essentiel pour comprendre les propriétés et le comportement des matériaux à l'échelle microscopique. Voici quelques conclusions générales qui peuvent être tirées de ces études :

1. **Caractérisation structurale** : L'étude du VER permet de caractériser la structure moléculaire d'un matériau, en identifiant les arrangements et les organisations des molécules à l'intérieur de celui-ci. Cela peut fournir des informations sur la présence de régions cristallines ou amorphes, la taille des cristallites, la distribution de taille des grains, etc.
2. **Propriétés physiques** : Le VER joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés physiques des matériaux. Par exemple, dans le cas des polymères, la structure cristalline et la morphologie amorphe peuvent influencer la résistance, la ductilité, la conductivité thermique, etc.
3. **Comportement mécanique** : Étudier le VER permet de comprendre le comportement mécanique d'un matériau, tel que la résistance à la traction, la ténacité, la déformation plastique, etc. Les régions cristallines, par exemple, peuvent contribuer à la résistance mécanique globale, tandis que les régions amorphes peuvent influencer la ductilité.
4. **Propriétés thermiques** : Les propriétés thermiques, telles que la conductivité thermique, la transition vitreuse, la cristallisation, etc., peuvent également être étudiées à travers l'analyse du VER. Les régions cristallines peuvent avoir des températures de fusion et de cristallisation spécifiques, tandis que les régions amorphes peuvent influencer les transitions thermiques.
5. **Modification et optimisation des propriétés** : Comprendre le VER d'un matériau permet d'optimiser ses propriétés par des traitements spécifiques. Par exemple, en modifiant les conditions de refroidissement ou en ajoutant des agents de nucléation, il est possible de contrôler la taille des cristallites et d'améliorer les propriétés du matériau.

En conclusion, l'étude du volume élémentaire représentatif (VER) permet d'obtenir une compréhension approfondie des propriétés et du comportement des matériaux à une échelle microscopique. Cela aide les chercheurs et les ingénieurs à concevoir et à développer des matériaux avec des propriétés spécifiques pour des applications variées.

CHAPITRE 03

Résultats et discussions

III .1 Introduction

Notre travail de modélisation des composites unidirectionnels avec des fibres courbes dans ABAQUS, d'après la vidéo de Dr Michael qui a travaillé sur la modélisation RVE de différents matériaux [30]

On va travailler sur un matériau intéressant, c'est l'idée d'un composite de fibres sculptées commençant par :

- créer le domaine virtuel et l'exécuter dans ABAQUS , et nous examinons également les propriétés effectives que nous pouvons générer à partir de l'étude, c'est donc ce que nous allons faire dans ce travail
- nous commençons maintenant le travail sur les fibres non droites ce sera vraiment utile nous pensons que c'est vraiment un problème passionnant d'essayer de créer un élément de volume représentatif pour un composite unidirectionnel où les fibres ne sont pas droites

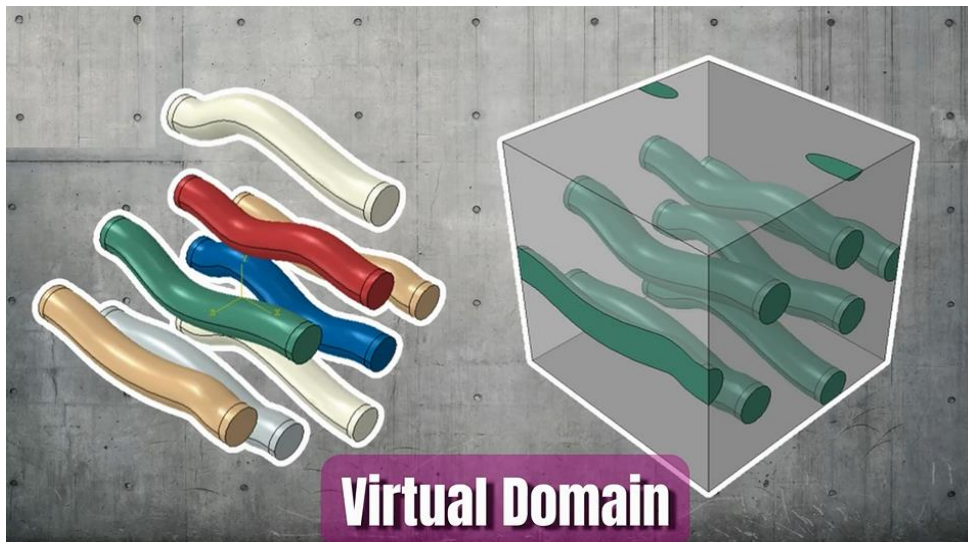


Figure III.1. Domaine virtuel

Le contour avec lequel nous allons travailler est on dira une récompense autour de l'introduction à ce type de composites cultes configurer à ce modèle dans Abaqus, puis nous allons montrer l'examen du résultat de simulation que nous générons à partir de cela, enfin, nous allons extraire les forces, les déplacements et les données de résistance.

III .2. Modèle géométrique :

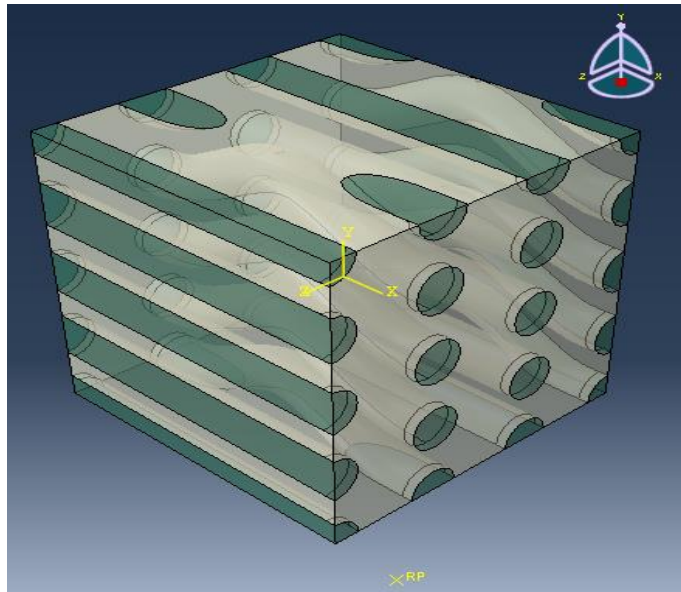


Figure III.2 : le modèle géométrique

III .3 Maillage :

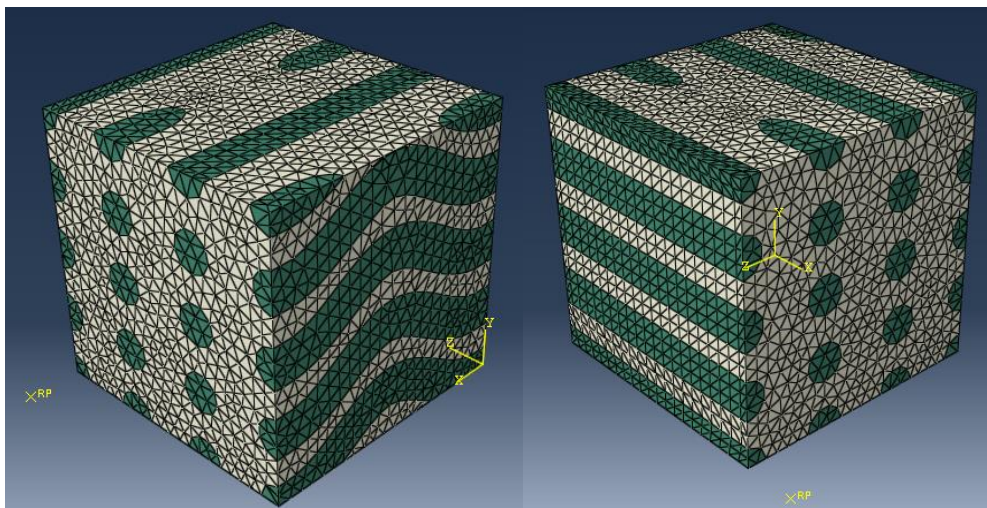


Figure III.3 : le maillage

Propriétés constituants	Densité [g/m3]	Module de Young [Gpa]	Coefficient de poisson
Alfa	1.4	12	0.3
Glass	2.6	73	0.2
Epoxy	-	5	0.33
Polypropylène	-	1.308	0.4

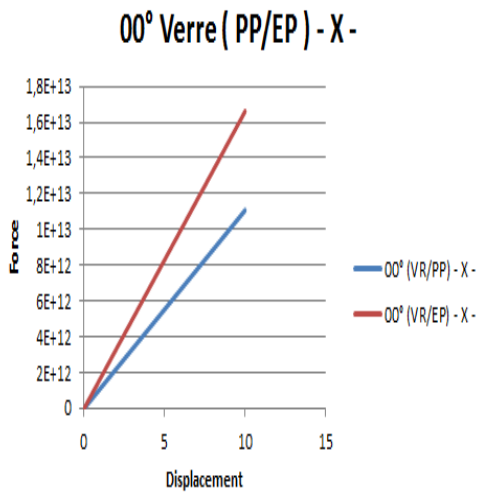
Tableau III.1 : caractéristique mécanique des matériaux utilisé

III .4 Résultats Discussions

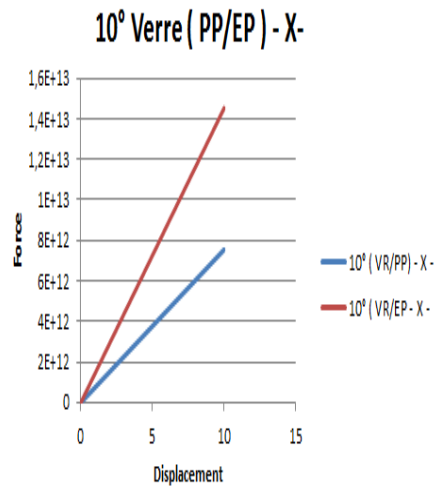
III .4.1. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe X.

III.4.1.1 L'effet du matériau

- Cas de : Verre / PP - Verre/Epoxy



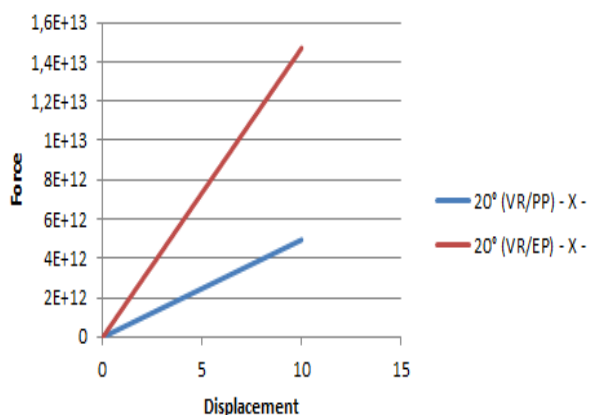
$a_1 (\varphi = 0^\circ)$



$a_2 (\varphi = 10^\circ)$

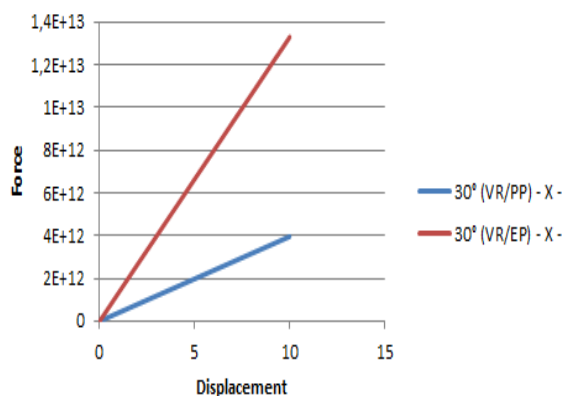
Résultats et discussions

20° Verre (PP/EP) - X -



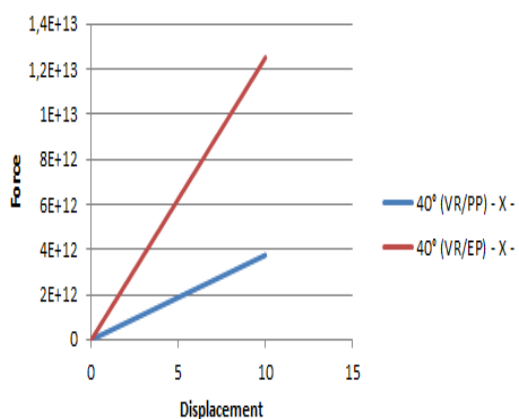
a₃ ($\varphi = 20^\circ$)

30° Verre (PP/EP) - X -



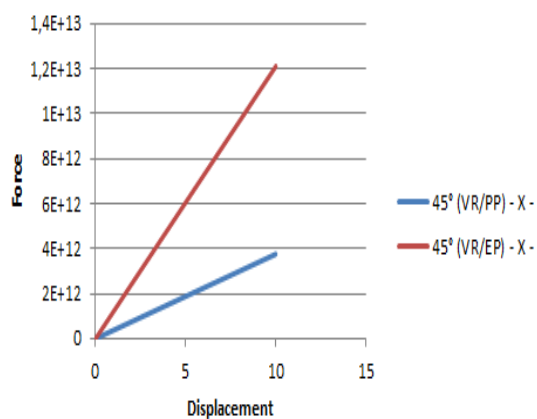
a₄ ($\varphi = 30^\circ$)

40° Verre (PP/EP) - X -



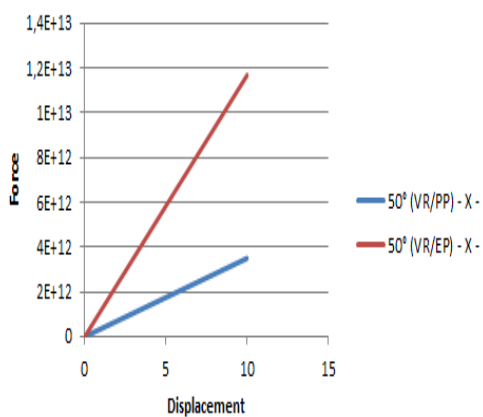
a₅ ($\varphi = 40^\circ$)

45° Verre (PP/EP) - X -



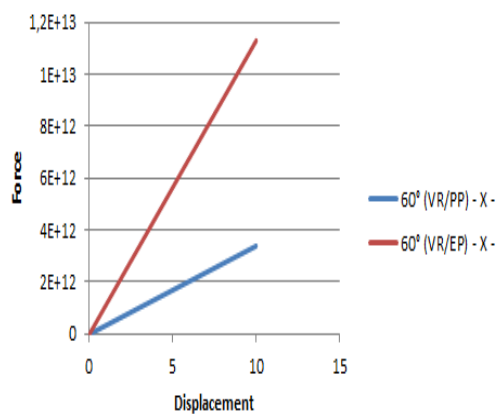
a₆ ($\varphi = 45^\circ$)

50° Verre (PP/EP) - X -



a₇ ($\varphi = 50^\circ$)

60° Verre (PP/EP) - X -



a₈ ($\varphi = 60^\circ$)

Résultats et discussions

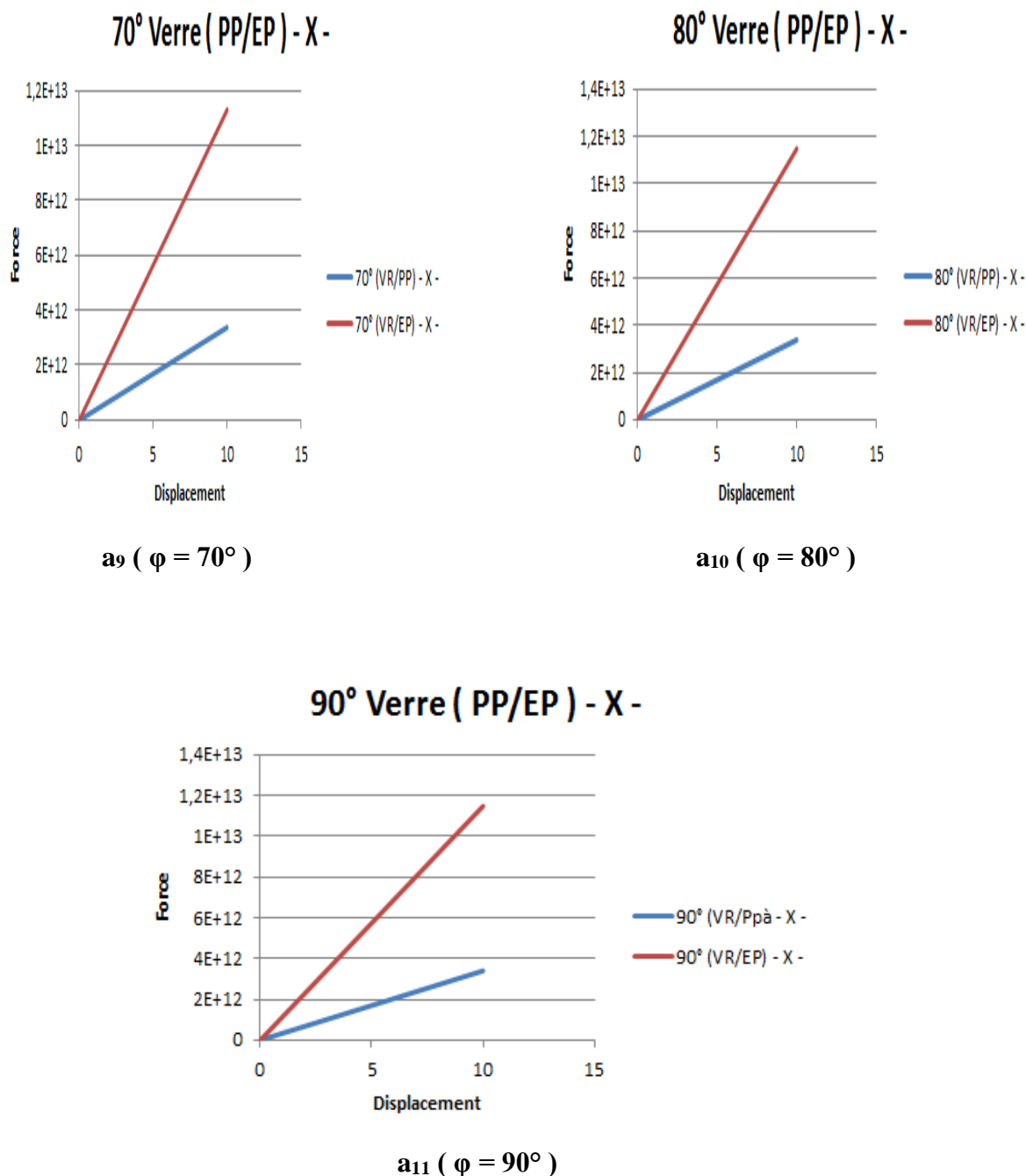
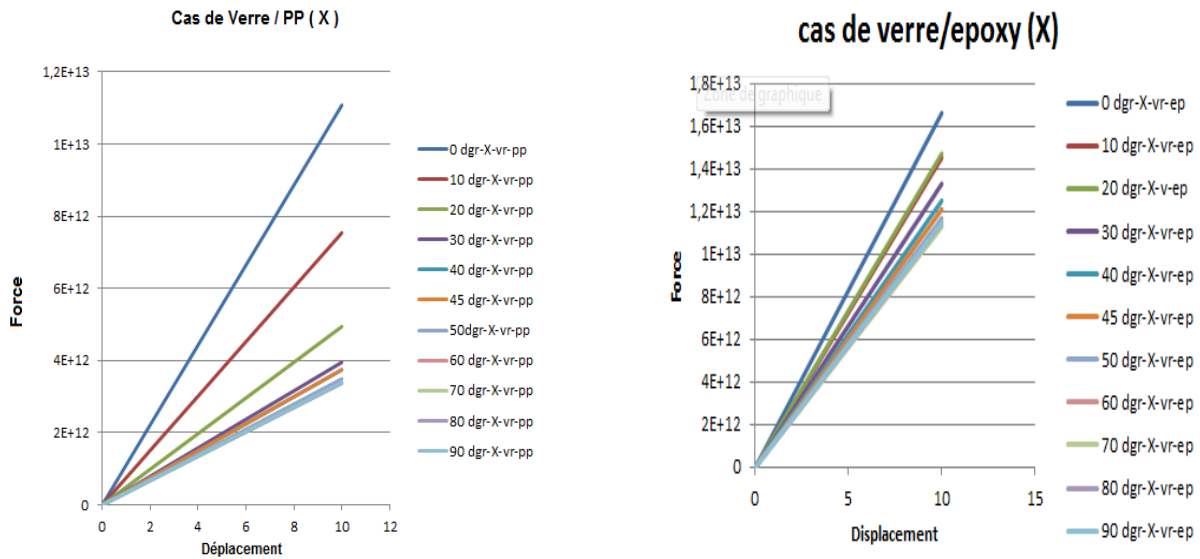


Figure III .4. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque orientations des fibres : a₁:(φ=0°), a₂:(φ=10°), a₃:(φ=20°), a₄:(φ=30°), a₅:(φ=40°), a₆:(φ=45°), a₇:(φ=50°), a₈:(φ=60°), a₉:(φ=70°), a₁₀:(φ=80°), a₁₁:(φ=90°) et pour différents matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy).

Les figures III.4(a₁, a₂, a₃, a₄, a₅, a₆, a₇, a₈, a₉, a₁₀, a₁₁) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque orientations des fibres : (φ=0°, φ=10°, φ=20°, φ=30°, φ=40°, φ=45°, φ=50°, φ=60°, φ=70°, φ=80°, φ=90°) et pour différents matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy). On constate qu'au fur et à mesure l'angle d'orientation des fibres augmente la limite élastique de chaque matériau considéré diminue.

III.4.1.2 L'effet de l'orientation des fibres



A₁ : Les ≠ orientations (verre/pp) selon X

A₂ : Les ≠ orientations (verre/époxy) selon X

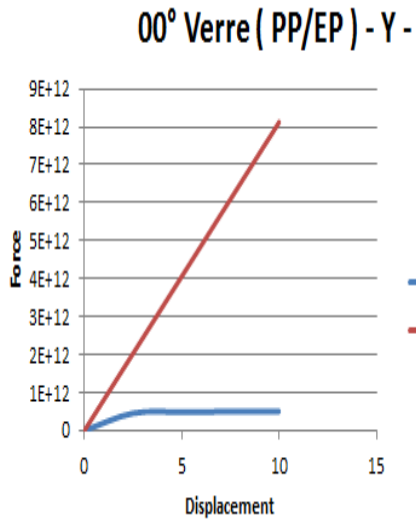
Figure III .5. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque matériaux (A₁ : Verre / PP et A₂ : Verre / Epoxy) et pour différents orientations des fibres

Les figures III.5. (A₁ et A₂) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy) et pour différentes orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$). On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau.

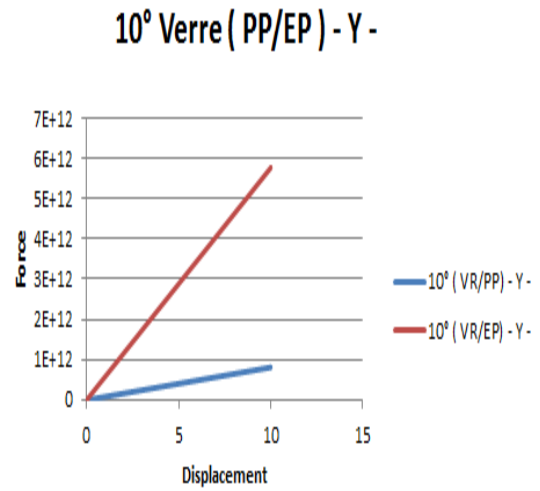
III.4.2. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe Y.

III.4.2.1 L'effet du matériau

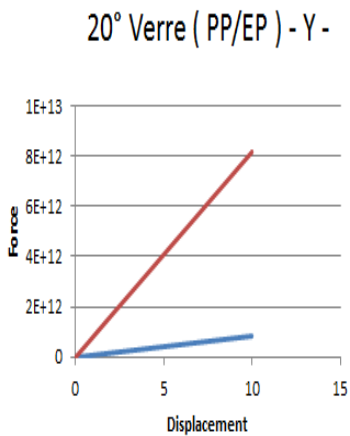
- Cas de : Verre / PP - Verre/Epoxy



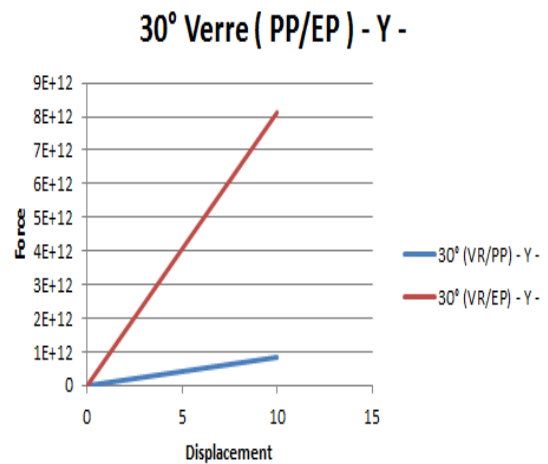
b₁ ($\varphi = 00^\circ$)



b₂ ($\varphi = 10^\circ$)



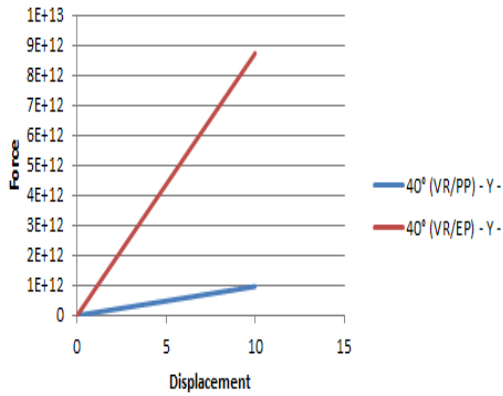
b₃ ($\varphi = 20^\circ$)



b₄ ($\varphi = 30^\circ$)

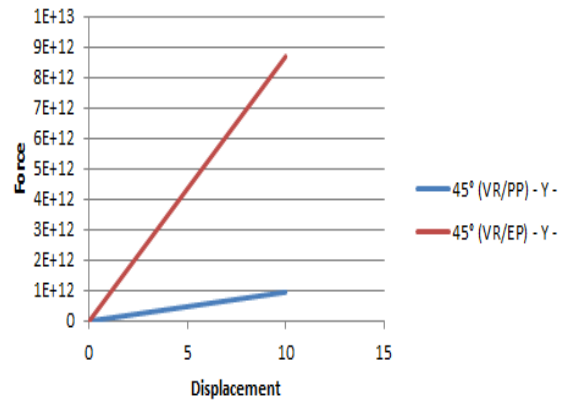
Résultats et discussions

40° Verre (PP/EP) - Y -



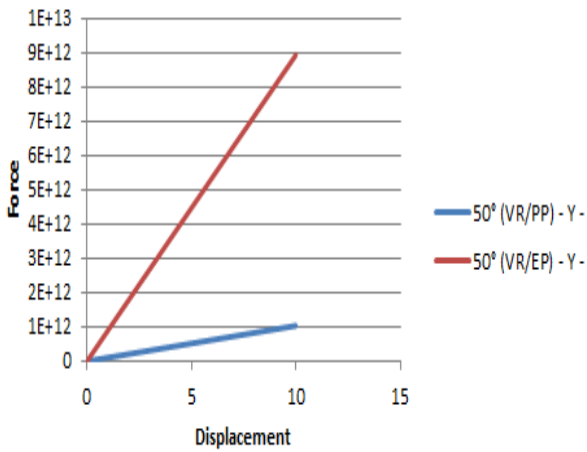
b₅ ($\varphi = 40^\circ$)

45° Verre (PP/EP) - Y -



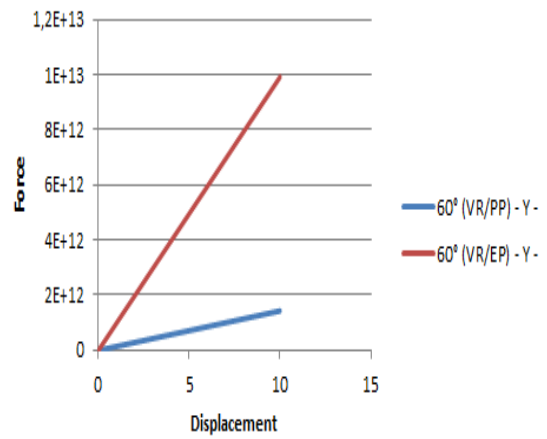
b₆ ($\varphi = 45^\circ$)

50° Verre (PP/EP) - Y -



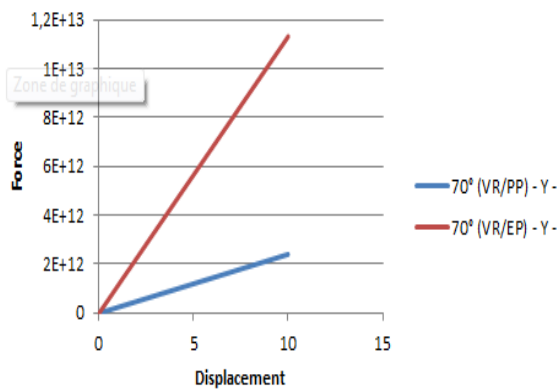
b₇ ($\varphi = 50^\circ$)

60° Verre (PP/EP) - Y -



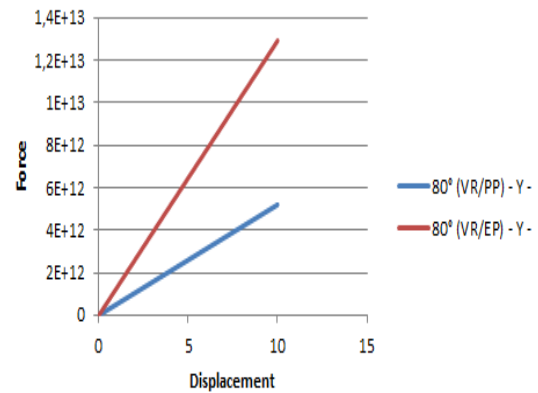
b₈ ($\varphi = 60^\circ$)

70° Verre (PP/EP) - Y -

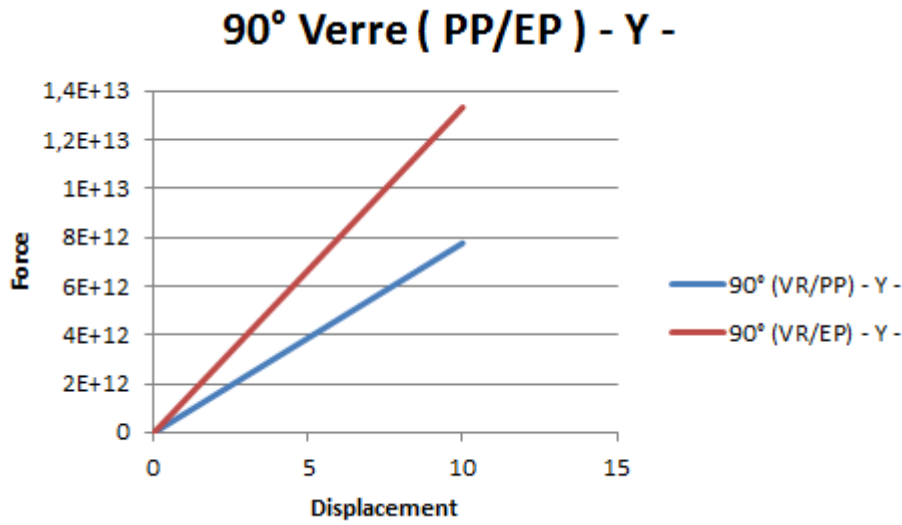


b₉ ($\varphi = 70^\circ$)

80° Verre (PP/EP) - Y -



b₁₀ ($\varphi = 80^\circ$)

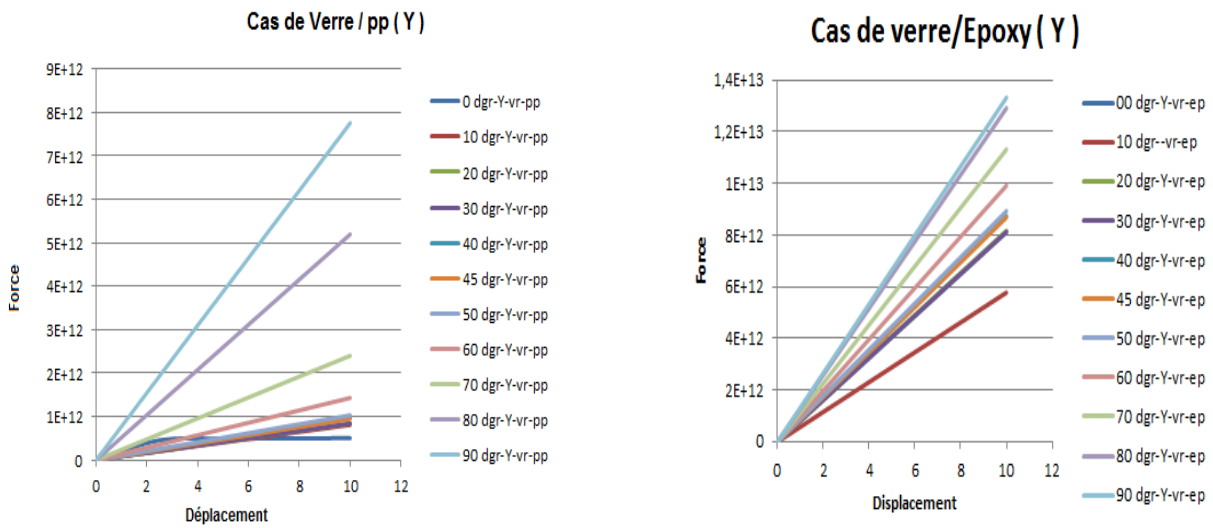


b_{11} ($\varphi = 90^\circ$)

Figure III .6 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque orientations des fibres : b_1 :($\varphi=0^\circ$), b_2 :($\varphi=10^\circ$), b_3 :($\varphi=20^\circ$), b_4 :($\varphi=30^\circ$), b_5 :($\varphi=40^\circ$), b_6 :($\varphi=45^\circ$), b_7 :($\varphi=50^\circ$), b_8 :($\varphi=60^\circ$), b_9 :($\varphi=70^\circ$), b_{10} :($\varphi=80^\circ$), b_{11} :($\varphi=90^\circ$) et pour différents matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy).

Les figures III.6 (b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , b_6 , b_7 , b_8 , b_9 , b_{10} , b_{11}) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$) et pour différents matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy). On constate que la limite élastique de chaque matériau considéré augmente avec l'augmentation de l'angle d'orientation des fibres.

III.4.2.2 L'effet de l'orientation des fibres



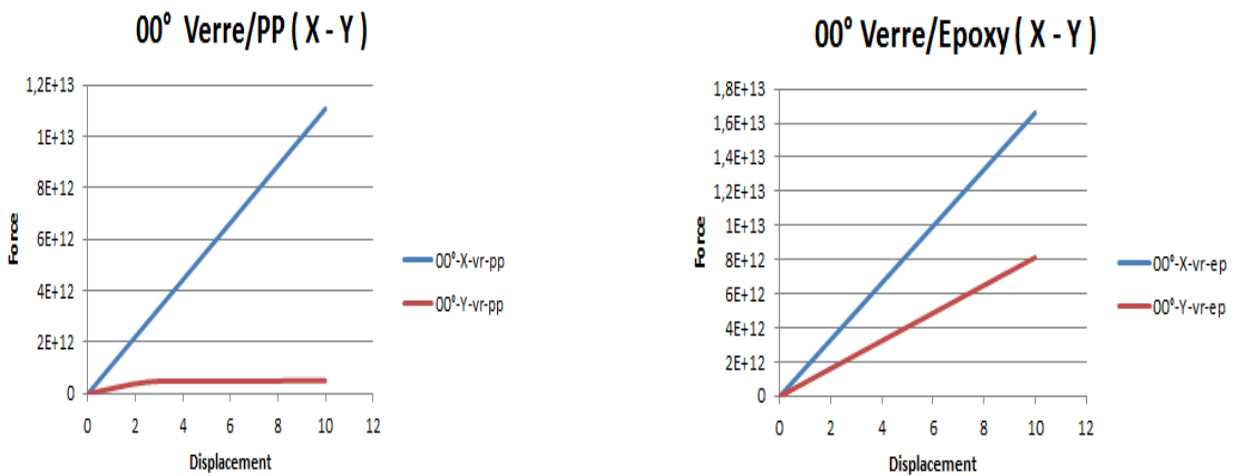
B₁ : Les ≠ orientations (verre/pp) selon Y

B₂ : Les ≠ orientations (verre/époxy) selon Y

Figure III .7. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque matériaux (B₁ : Verre / PP et B₂ : Verre / Epoxy) et pour différents orientations des fibres

Les figures III.7 (B₁ et B₂) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy) et pour différentes orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$). On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On note aussi que l'orientation 90° atteint une limite d'élasticité maximale.

III .4.2.3. L'effet de l'axe de chargement



B₃ : variation de X et Y (verre/pp) en $\varphi = 00^\circ$

B₄ : variation de X et Y (verre/époxy) en $\varphi = 00^\circ$

Figure III .8. (B₃, B₄) Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X et Y pour différents matériaux (B₃ : Verre / PP et B₄ : Verre / Epoxy) et pour $\varphi = 00^\circ$

Résultats et discussions

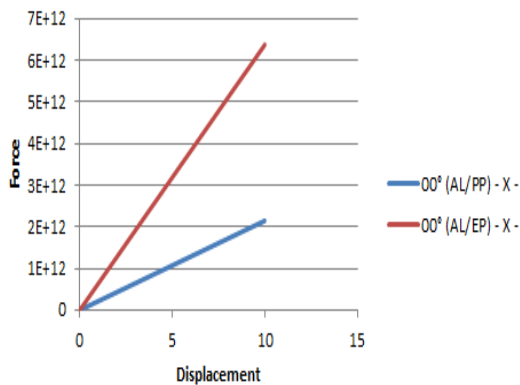
Les figures III.8 (B₃ et B₄) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X et Y pour chaque matériaux (Verre / PP – Verre / Epoxy) et pour l'orientation des fibres : $\varphi=0^\circ$. On constate que l'axe de chargement a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On note aussi que le matériau composite verre/époxy atteint une valeur maximale de la limite d'élasticité comparativement au matériau composite verre/PP.

III.4.3. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe X.

III.4.3.1 L'effet du matériau

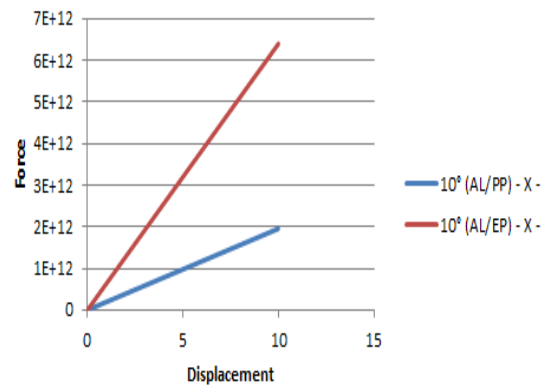
- Cas de : Alfa / PP – Alfa / Epoxy

00° Alfa (PP/EP) - X -



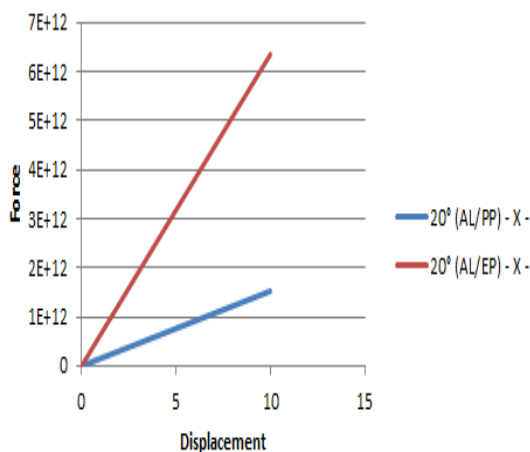
c₁ ($\varphi = 00^\circ$)

10° Alfa (PP/EP) - X -



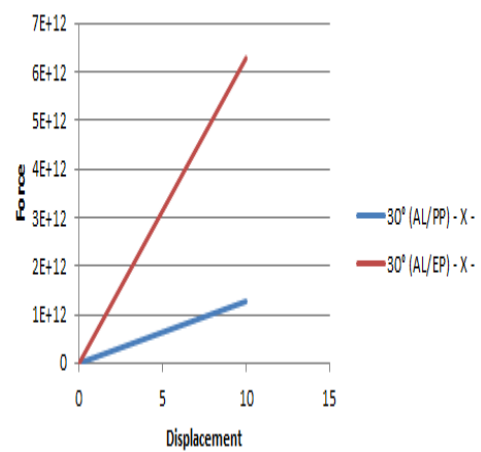
c₂ ($\varphi = 10^\circ$)

20° Alfa (PP/EP) - X -



c₃ ($\varphi = 20^\circ$)

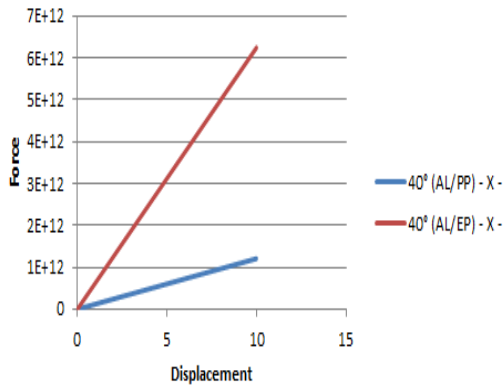
30° Alfa (PP/EP) - X -



c₄ ($\varphi = 30^\circ$)

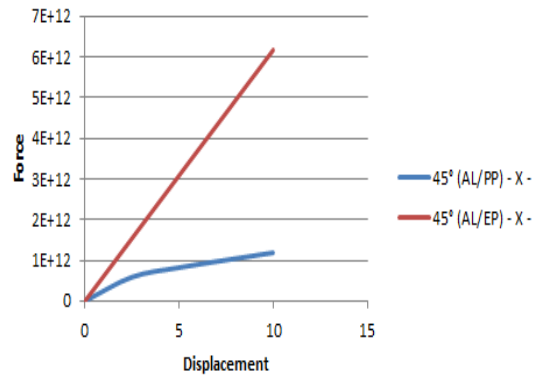
Résultats et discussions

40° Alfa (PP/EP) - X -



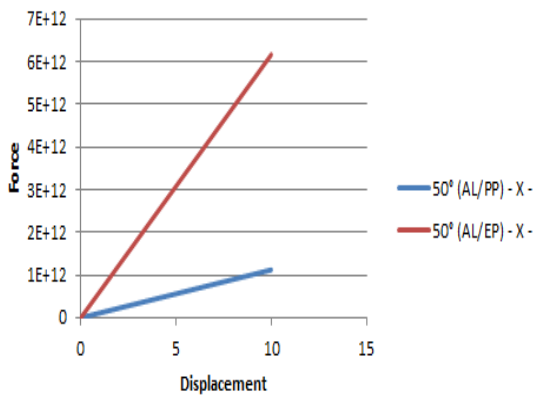
c₅ (φ = 40°)

45° Alfa (PP/EP) - X -



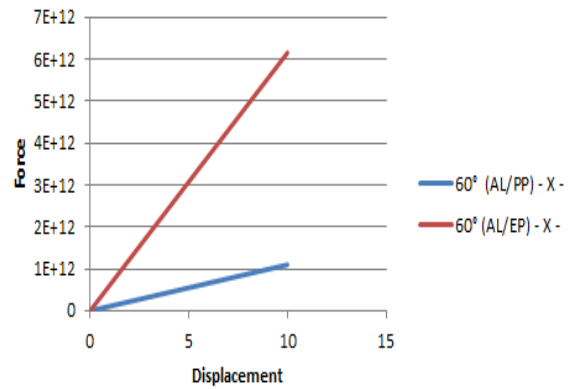
c₆ (φ = 45°)

50° Alfa (PP/EP) - X -



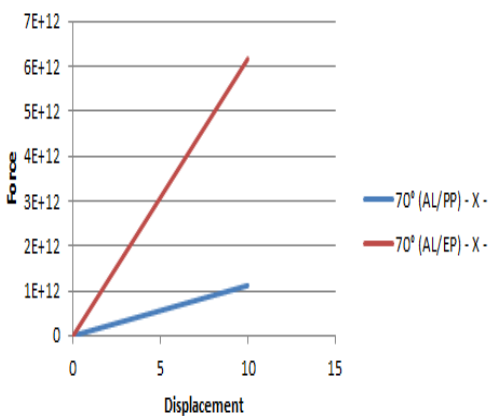
c₇ (φ = 50°)

60° Alfa (PP/EP) - X -



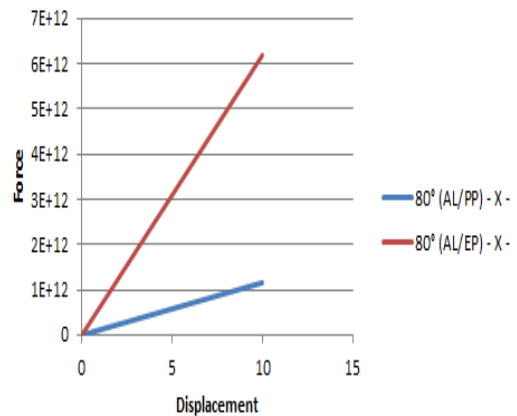
c₈ (φ = 60°)

70° Alfa (PP/EP) - X -

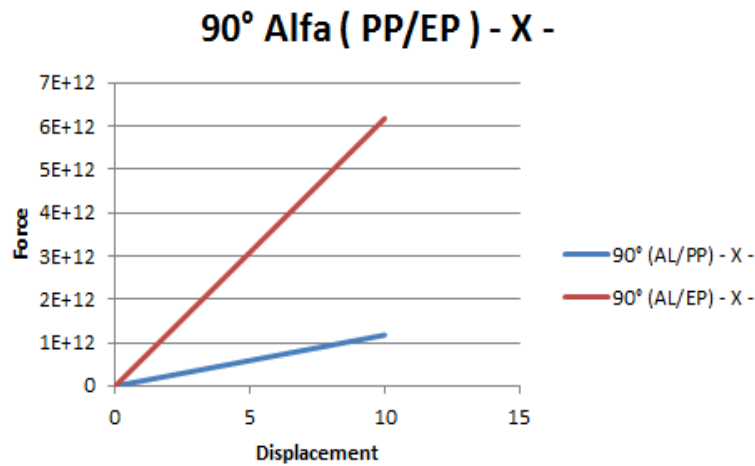


c₉ (φ = 70°)

80° Alfa (PP/EP) - X -



c₁₀ (φ = 80°)

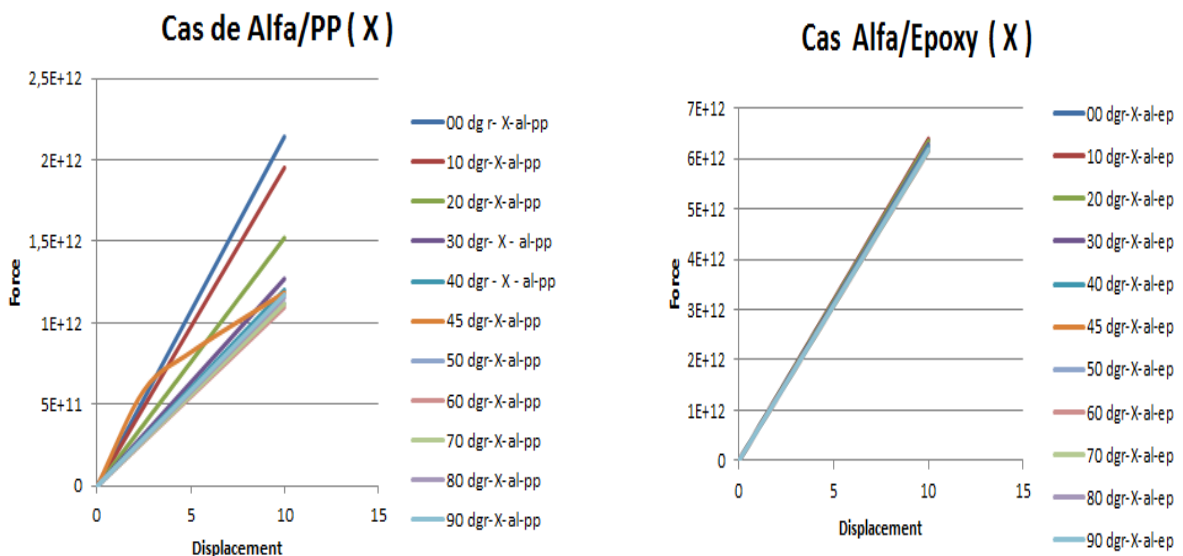


$$c_{11} (\varphi = 90^\circ)$$

Figure III.9 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque orientations des fibres : c_1 :($\varphi=0^\circ$), c_2 :($\varphi=10^\circ$), c_3 :($\varphi=20^\circ$), c_4 :($\varphi=30^\circ$), c_5 :($\varphi=40^\circ$), c_6 :($\varphi=45^\circ$), c_7 :($\varphi=50^\circ$), c_8 :($\varphi=60^\circ$), c_9 :($\varphi=70^\circ$), c_{10} :($\varphi=80^\circ$), c_{11} :($\varphi=90^\circ$) et pour différents matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy).

Les figures III.9 (c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 , c_7 , c_8 , c_9 , c_{10} , c_{11}) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$) et pour différents matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy). On constate qu'au fur et à mesure l'angle d'orientation des fibres augmente la limite élastique de chaque matériau considéré diminue.

III.4.3.2 L'effet de l'orientation des fibres



C_1 : Les \neq orientations (alfa/pp) selon X

C_2 : Les \neq orientations (alfa/époxy) selon X

Résultats et discussions

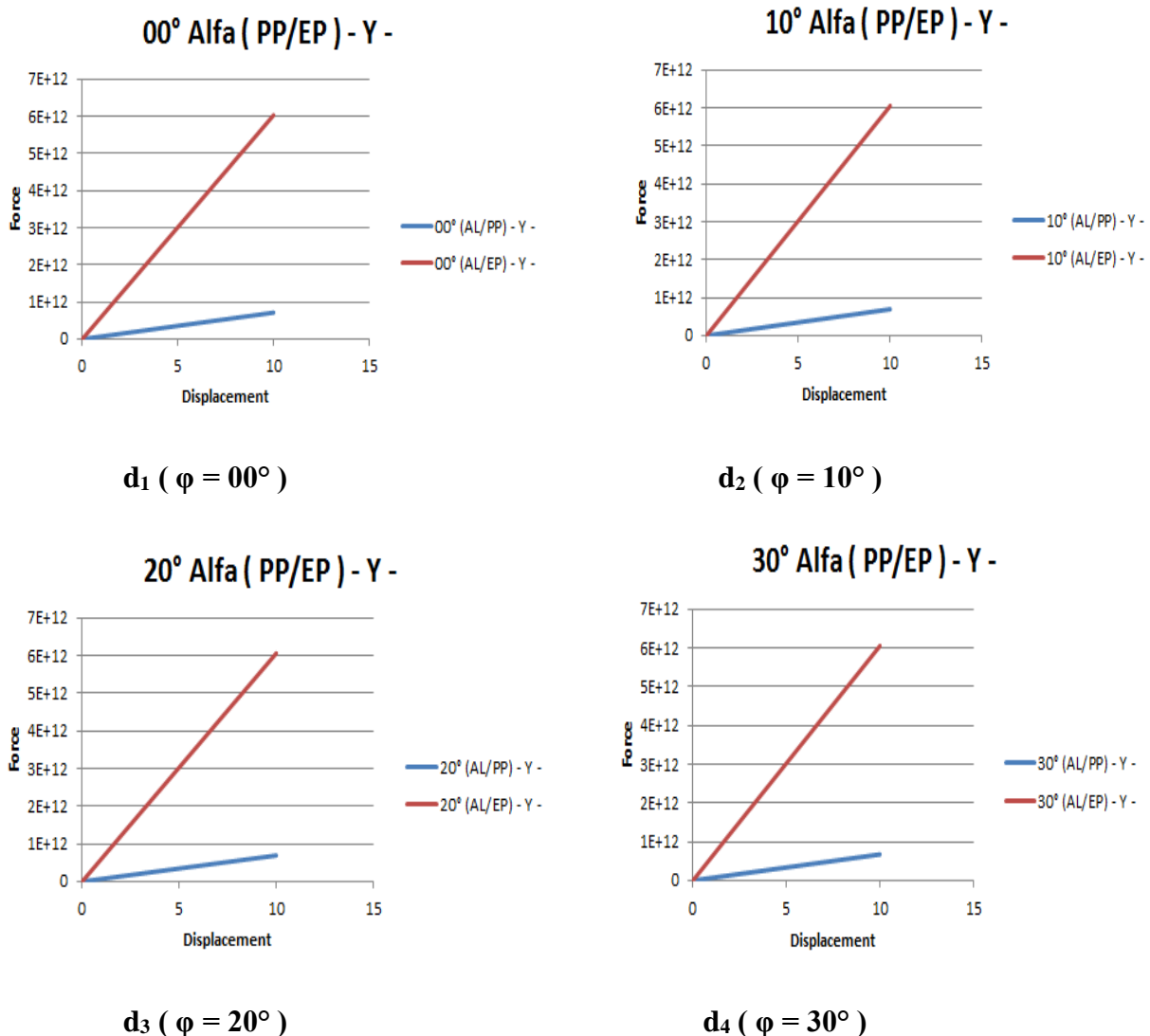
Figure III .10 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque matériaux (C_1 : Alfa / PP et C_2 : Alfa / Epoxy) et pour différents orientations des fibres

Les figures III.10 (C_1 et C_2) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X pour chaque matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy) et pour différentes orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$). On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On constate que les courbes dans le cas du matériau alfa/époxy sont confondus et quel que soit l'orientation des fibres.

III .4.4. L'effet de l'orientation des fibres sur la courbe force-déplacement dans le domaine élastique selon l'axe Y.

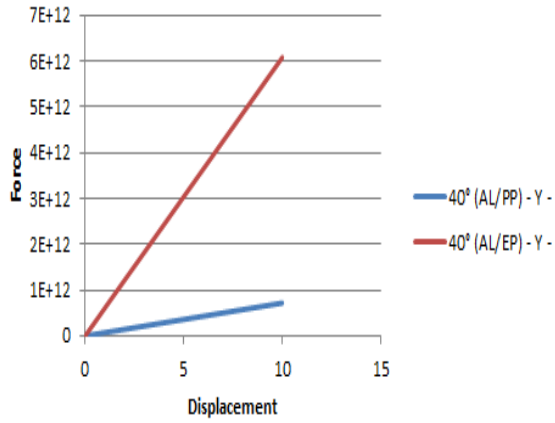
III.4.4.1 L'effet du matériau

- Cas de : Alfa / PP – Alfa / Epoxy



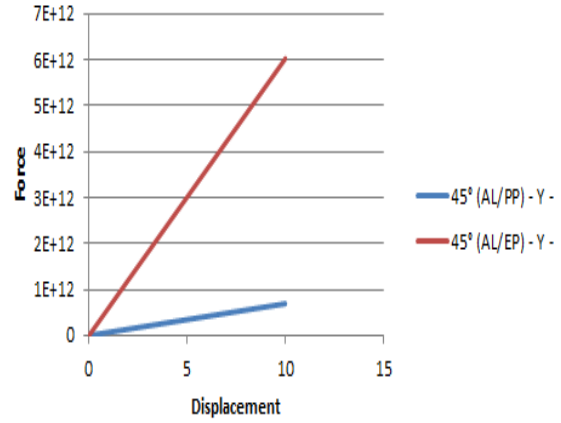
Résultats et discussions

40° Alfa (PP/EP) - Y -



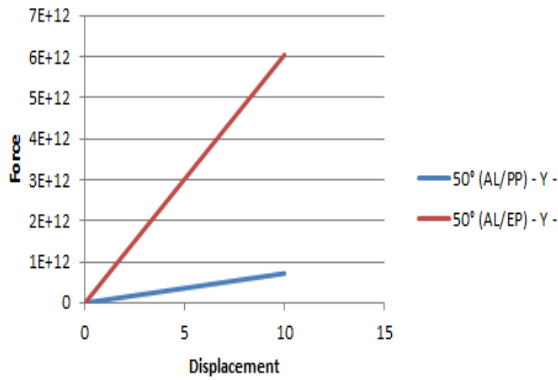
d₅ ($\varphi = 40^\circ$)

45° Alfa (PP/EP) - Y -



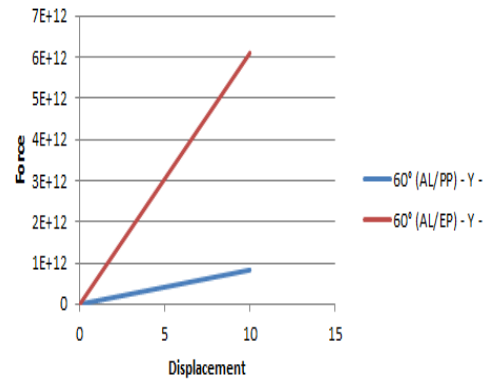
d₆ ($\varphi = 45^\circ$)

50° Alfa (PP/EP) - Y -



d₇ ($\varphi = 50^\circ$)

60° Alfa (PP/EP) - Y -



d₈ ($\varphi = 60^\circ$)

Résultats et discussions

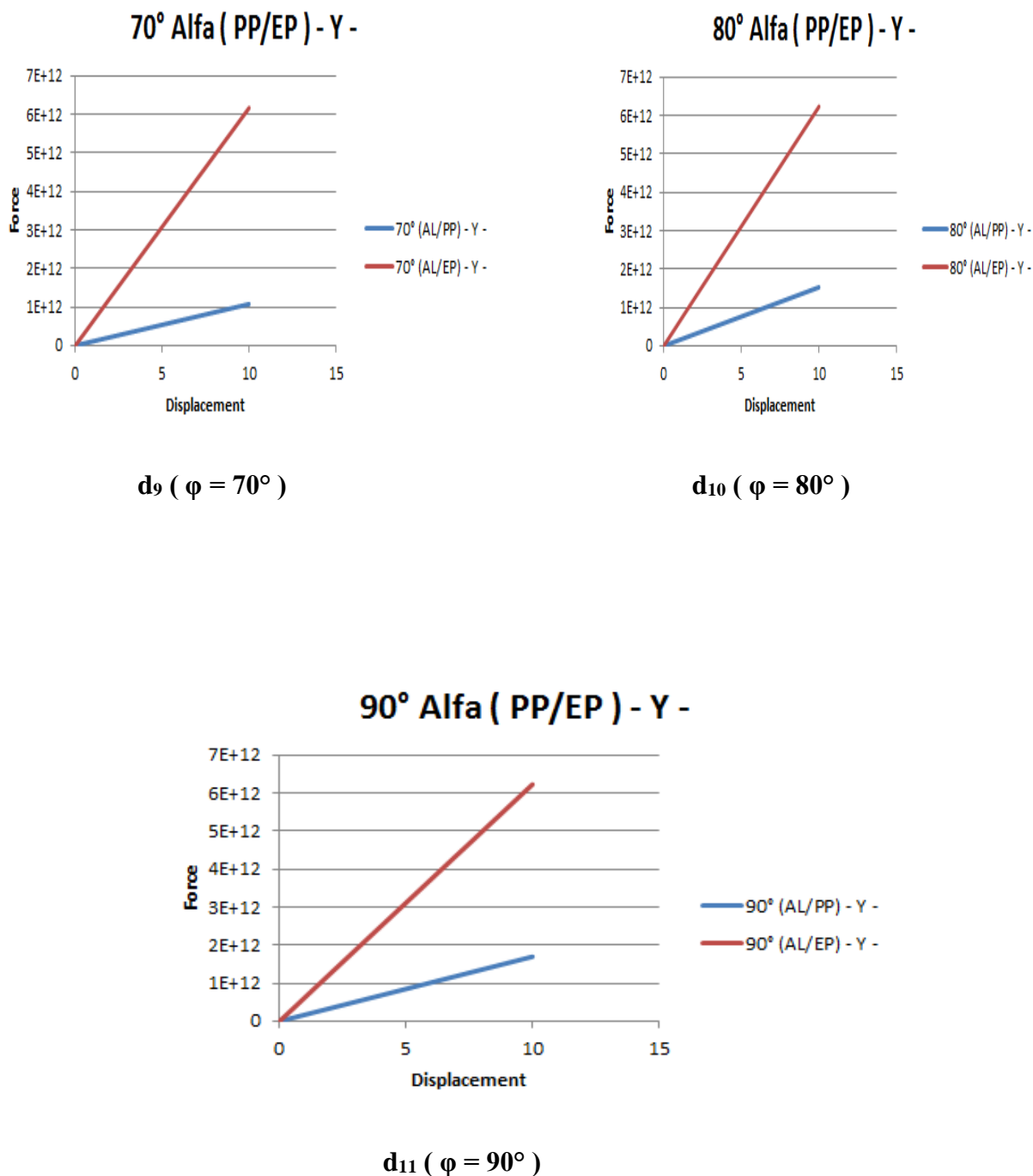
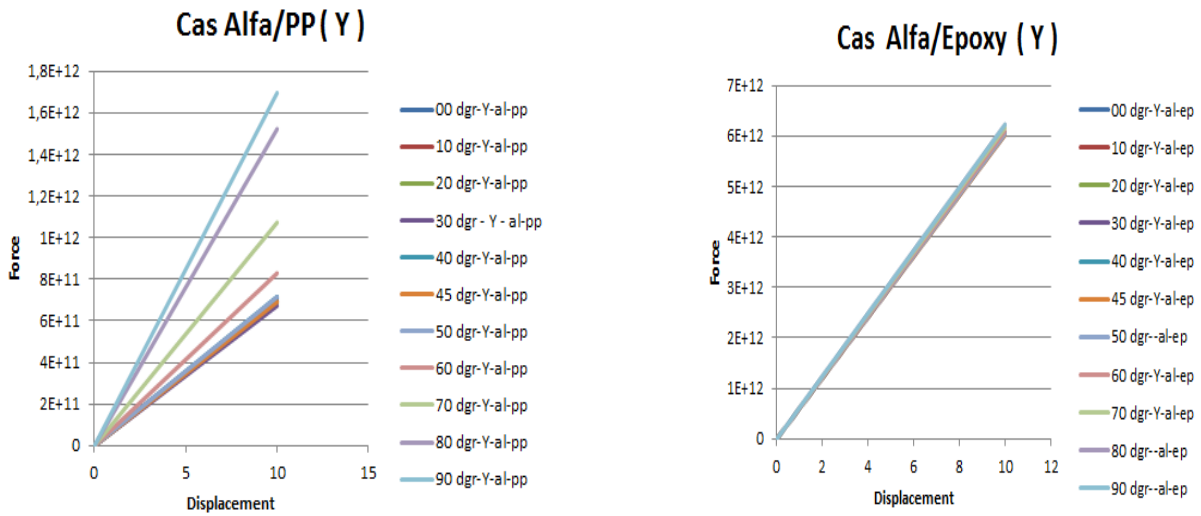


Figure III .11. Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque orientations des fibres : d_1 :($\varphi=0^\circ$), d_2 :($\varphi=10^\circ$), d_3 :($\varphi=20^\circ$), d_4 :($\varphi=30^\circ$), d_5 :($\varphi=40^\circ$), d_6 :($\varphi=45^\circ$), d_7 :($\varphi=50^\circ$), d_8 :($\varphi=60^\circ$), d_9 :($\varphi=70^\circ$), d_{10} :($\varphi=80^\circ$), d_{11} :($\varphi=90^\circ$) et pour différents matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy).

Les figure III .11(d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , d_6 , d_7 , d_8 , d_9 , d_{10} , d_{11}) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$) et pour différents matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy). On constate qu'au fur et à mesure l'angle d'orientation des fibres augmente la limite élastique de chaque matériau considéré diminue.

III.4.4.2 L'effet de l'orientation des fibres

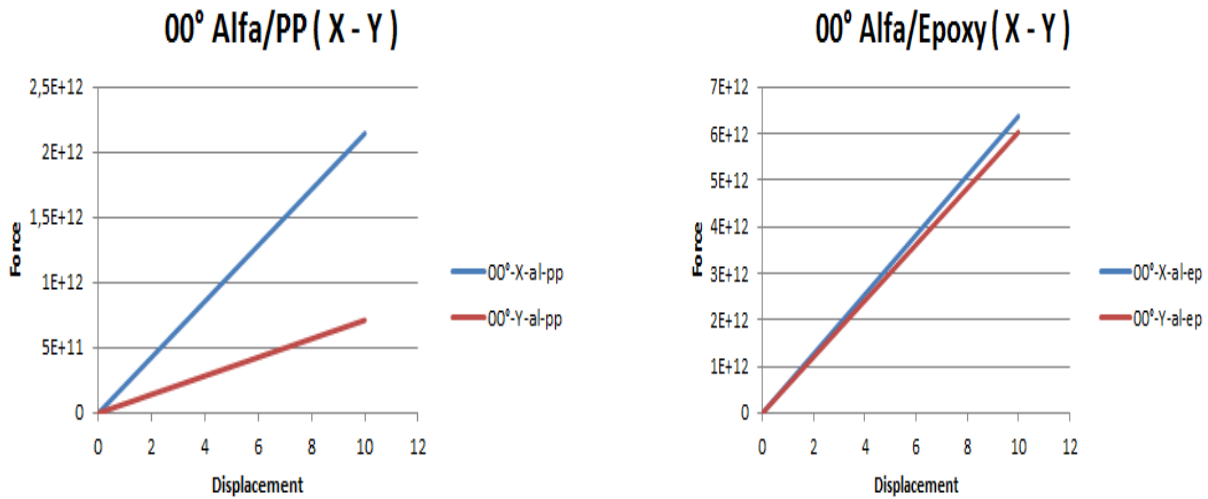


D₁ : Les ≠ orientations (alfa/pp) selon Y

D₂ : Les ≠ orientations (alfa/époxy) selon Y

Figure III .12 Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque matériaux (D₁ : Alfa / PP et D₂: Alfa / Epoxy) et pour différents orientations des fibres

Les figures III.10 (D₁ et D₂) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe Y pour chaque matériaux (Alfa / PP – Alfa / Epoxy) et pour différentes orientations des fibres : ($\varphi=0^\circ$, $\varphi=10^\circ$, $\varphi=20^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=40^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\varphi=60^\circ$, $\varphi=70^\circ$, $\varphi=80^\circ$, $\varphi=90^\circ$). On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On constate que les courbes dans le cas du matériau alfa/époxy sont confondus et quel que soit l'orientation des fibres.



D₃ : variation de X et Y (alfa/pp) en $\varphi = 00^\circ$

D₄ : variation de X et Y (alfa/époxy) en $\varphi = 00^\circ$

Figure III .13. (D₃, D₄) Variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X et Y pour différents matériaux (D₃ : Alfa / PP et D₄ : Alfa / Epoxy) et pour $\varphi = 00^\circ$

Les figures III.13 (D₃ et D₄) montrent la variation de la force en fonction du déplacement suivant l'axe X et Y pour chaque matériaux (alfa/PP – alfa/époxy) et pour l'orientation des fibres : $\varphi=0^\circ$. On constate que l'axe de chargement a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On note aussi que le matériau composite alfa/époxy atteint une valeur maximale de la limite d'élasticité comparativement au matériau composite alfa/PP.

CONCLUSION

GENERALE

IV Conclusion générale

➤ Verre / PP et Verre / Epoxy :

D'après les interprétations des figures III.4, III.5, III.6, III.7 et III.8, qui montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon les axes X et Y pour différentes orientations des fibres et matériaux (Verre/PP - Verre/Epoxy), nous pouvons tirer les conclusions générales suivantes :

1. Variation de la limite élastique avec l'orientation des fibres :

- Pour les figures III.4(a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10, a11), qui montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe X pour chaque orientation des fibres, il est observé que plus l'angle d'orientation des fibres augmente, plus la limite élastique de chaque matériau considéré diminue. Cette tendance est observée pour les deux combinaisons de matériaux, Verre/PP et Verre/Epoxy.
- De même, pour les figures III.6(b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10, b11), qui montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe Y pour chaque orientation des fibres, il est constaté que la limite élastique de chaque matériau considéré augmente avec l'augmentation de l'angle d'orientation des fibres.

2. Effet de l'orientation des fibres sur la limite élastique :

- Les figures III.5(A1, A2) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe X pour chaque matériau (Verre/PP - Verre/Epoxy) et pour différentes orientations des fibres. On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. Cela suggère que l'alignement des fibres joue un rôle important dans la résistance mécanique des matériaux composites.
- De même, les figures III.7(B1, B2) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe Y pour chaque matériau (Verre/PP - Verre/Epoxy) et pour différentes orientations des fibres. On constate également que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau.

3. Comparaison des matériaux composites Verre/PP et Verre/Epoxy :

- Les figures III.8(B3, B4) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon les axes X et Y pour chaque matériau (Verre/PP - Verre/Epoxy) et pour une orientation des fibres de $\varphi=0^\circ$. On constate que

CONCLUSION GENERALE

l'axe de chargement a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. De plus, le matériau composite Verre/Epoxy atteint une valeur maximale de la limite élastique par rapport au matériau composite Verre/PP. Cela suggère que le choix du matériau peut avoir un impact sur les performances mécaniques du composite.

En résumé, les résultats indiquent que l'orientation des fibres et le choix du matériau sont des facteurs critiques dans la détermination des propriétés mécaniques des composites. La variation de l'angle d'orientation des fibres peut influencer la limite élastique, et il existe des différences significatives entre les matériaux Verre/PP et Verre/Epoxy en termes de résistance mécanique. Ces conclusions peuvent être utilisées pour guider la conception et l'optimisation des matériaux composites en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

➤ **Alfa / PP – Alfa / Epoxy :**

D'après les interprétations des figures III.9, III.10, III.11, III.12 et III.13, qui montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon les axes X et Y pour différentes orientations des fibres et matériaux (Alfa/PP - Alfa/Epoxy), voici les conclusions générales que l'on peut tirer :

1. Variation de la limite élastique avec l'orientation des fibres :
 - Les figures III.9 (c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10, c11) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe X pour chaque orientation des fibres. On constate qu'à mesure que l'angle d'orientation des fibres augmente, la limite élastique de chaque matériau considéré diminue. Cette tendance est observée pour les deux combinaisons de matériaux, Alfa/PP et Alfa/Epoxy.
 - De même, les figures III.11 (d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8, d9, d10, d11) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe Y pour chaque orientation des fibres. On constate également que la limite élastique de chaque matériau considéré diminue avec l'augmentation de l'angle d'orientation des fibres.
2. Effet de l'orientation des fibres sur la limite élastique :
 - Les figures III.10 (C1, C2) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe X pour chaque matériau (Alfa/PP - Alfa/Epoxy) et pour différentes orientations des fibres. On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On remarque

CONCLUSION GENERALE

également que les courbes dans le cas du matériau Alfa/Epoxy sont confondues, quelle que soit l'orientation des fibres.

- De même, les figures III.12 (D1, D2) montrent la variation de la force en fonction du déplacement selon l'axe Y pour chaque matériau (Alfa/PP - Alfa/Epoxy) et pour différentes orientations des fibres. On constate également que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. On remarque aussi que les courbes dans le cas du matériau Alfa/Epoxy sont confondues, quelle que soit l'orientation des fibres.
3. Comparaison des matériaux composites Alfa/PP et Alfa/Epoxy :
- La figure III.13 (D3, D4) montre la variation de la force en fonction du déplacement selon les axes X et Y pour chaque matériau (Alfa/PP - Alfa/Epoxy) et pour une orientation des fibres de $\varphi=0^\circ$. On constate que l'axe de chargement a un effet significatif sur la limite élastique du matériau. De plus, le matériau composite Alfa/Epoxy atteint une valeur maximale de limite élastique par rapport au matériau composite Alfa/PP.

En résumé, les résultats indiquent que l'orientation des fibres et le choix du matériau sont des facteurs critiques dans la détermination de la limite élastique des composites. Une augmentation de l'angle d'orientation des fibres entraîne généralement une diminution de la limite élastique, et il existe des différences significatives entre les matériaux composites Alfa/PP et Alfa/Epoxy en termes de résistance mécanique. Ces conclusions peuvent être utilisées pour guider la conception et l'optimisation des matériaux composites en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

Bibliographie

[1] J.M .Berthelot

Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures .4eme édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005.

[2] Pierre JACQUINET ,

Utilisation des matériaux composites, Edition HERMES, Paris 1991

[3] Miren EGANA

Introduction aux matériaux composites sur abaqus analyse d'une planche de kitesurf .ingénieur en conception mécanique et énergétique, mécanique .thèse doctorat INSA Toulouse 2006,2011.

[4] Christophe TEPHANY

Analyse de la déformabilité de renforts composites à base de fibres naturelles. Thèse doctorat, université d'Orléans, 2014.

[5] Stephan VACHER

Capteur fibre optique pour le contrôle de l'élaboration et la caractérisation mécanique des matériaux composites, thèse doctorat.

[6] Maurice REYNE

Technologie des composites. Edition HERMES. Paris 1990.

[7] Jean-Marie BERTHELOT

Des matériaux

3eme édition, école polytechnique de Montréal,200

[8] Daniel GAY

Matériaux composites, 4ème édition revue et augmentée, Editions Hermès, 1997. Technique and non destructive acoustique émission, Composites Science and Technologie, Vol. 66, pp. 2686–2699.

[9] CARMA Marine

Glossaire des matériaux composites Centre d'animation régional en matériaux avancés, actualisation octobre 2006.

[10] D.Krajcinovic

Domage mécaniques accompli shments, trends and needs.international journal of solides andstructures,37 :267-277,2000

[11] Jone martin Herrera Ramerez

Les mécanismes des fatigues dans les fibres thermo plastique. Thèse doctorat 2004

[12] Effect of microstructure on undrained behavior of sands

R.G. Wan and P.J. Guo © 2001 NRC Canada

[13] [Oil Gas Science and Technology](#)– Rev. [IFP](#), Vol. 56 (2001), No. 6, pp. 581-595

Copyright © 2001, Editions Technip

[14] International Journal of Fatigue ,Volume 24, Issues 2–4, February–April 2002, Pages 339-348 Effects of stress waveform and water absorption on the fatigue strength of angle-polyaramid fiber/epoxy composites

[15] 17ème Congrès Français de Mécanique Troyes,-Septembre2005

[16] Comptes Rendus des JNC 20 – École des Ponts Paris Tech – 28 - 30 juin 2017

[17] Comptes Rendus des JNC 20 – École des Ponts Paris Tech – 28 - 30 juin 2017

[18] Thèse (Contribution à l'étude de l'influence des interphases sur les propriétés mécaniques à l'échelle macroscopique d'un composite unidirectionnel : approche numérique)

[19] S. Li, L.F.C. Jean meure, Q. Pan (2015). « A composite material characterisation tool: UnitCells” J Eng Math, 95 (1) (2015), pp. 279-293.

[20] C. Baley and al “Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase” Composites: Part A 33 (2002) 939–948.

[21] C. Baley and al “Transverse tensile behaviour of unidirectional plies reinforced with flax fibres” Materials Letters 60 (2006) 2984–2987.

[22] F.R. Cichocki Jr.a., J.L. Thomasonb ”Thermoelastic anisotropy of a natural fibre” Composites Science and Technology 62 (2002) 669–678.

[23] Mohamed El Hadi BOURAHLI, Caractérisation d'un composite verre / époxy. Thesedoctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF 1, 2014.

[24] Alain Bourmaud, Christophe Baley « Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling” Polymer Degradation and Stability 94 (2009) 297–305 .

[25] The 1st International Symposium on Industrial Engineering Maintenance and Safety: IEMS'22.

IEMS 2022 Hybrid Mode | 05 - 06 March 2022 | Oran, Algeria.

[26] The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 2022

[27] Nicolas Bouleau. Probabilités de l'ingénieur. Hermann, 1986.

[28] Carl Graham et Denis Talay. Simulation stochastique et méthodes de Monte Carlo. Editions de l'École Polytechnique, 2011.

[29] Christian Robert. Méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov. Editions Economica, 1996.

[30] <https://www.youtube.com/watch?v=heIY6UuY9xQ&t=653s>