



Université Mohamed Khider de Biskra
Entrez votre faculté
Entrez votre département

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Zakaria ZOUIOUECHE

Le : [Click here to enter a date.](#)

Comportement numérique d'un composite unidirectionnel par Ansys

Jury :

Pr.	Mabrouk HECINI	MCB	Université de Biskra	Président
Dr.	Youcef DJEBLOUN	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Tarek DJOUDI	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2020 - 2021

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à : A mes
parents.*

*Aucun hommage ne pourrait être à la
hauteur de l'amour dont ils ne cessent de
me combler.*

*Que dieu leur procure bonne santé et
longue vie.*

Mes chers frères,

A ma famille.

*A tous mes amis (Noureddine, rafiq, ramzi
rafââ, aymen, khâled).*

*À tous ceux qui m'ont été d'un soutien
moral ou matériel*

Remerciements

*Je remercie, en premier lieu, Allah le tout
Puissant pour la volonté, la santé et la
patience qu'Il m'a données pour terminer ce
mémoire.*

*Je tiens à remercier sincèrement Dr
djebloun youcef, mon encadreur, pour toute
son attention, sa disponibilité, ses conseils et
pour ses encouragements durant la
réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également les membres du jury
d'avoir accepté de juger mon travail. Je
tiens à remercier particulièrement tous mes
collègues de génie mécanique de l'Université
Mohamed Khider, Biskra.*

Résumé

L'objectif de ce travail numérique est modélisé d'un volume élémentaire représentatif en matériau composite unidirectionnel (époxy/fibre de verre) d'extraire des propriétés mécaniques à travers des expériences de traction d'un matériau. Où nous avons effectué ce processus par simulation en utilisant le programme Ansys, pour déterminer le module d'élasticité de ce matériau.

المخلص

الهدف من هذا العمل الرقمي هو نمذجة حجم جزئي تمثيلي لمادة مركبة أحادية الاتجاه (إبوكسي / ألياف زجاجية) لاستخراج الخواص الميكانيكية من خلال تجارب الشد للمادة. حيث قمنا بتنفيذ هذه العملية عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج Ansys لتحديد معامل مرونة هذه المادة.

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Résumé	III
Liste figure.....	VI
Liste tableau.....	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition.....	2
I.3 Matrice.....	3
I.3.1 Matrices thermodurcissables.....	4
I.3.2 Matrices thermoplastiques.....	4
I.4 Renforts.....	5
I.5 Classification de composites.....	6
I.5.1 Classification selon le type de matrice.....	6
I.5.2 Classification selon la catégorie du renfort.....	6
I.5.3 Classification selon la forme du renfort.....	7
I.6 Les avantages et l'utilisation d'un matériau composite.....	8
I.6.1 Les diverses applications d'un matériau Composite.....	8
I.7 Classification à base de la structure composite.....	8
I.7.1 Moulage au contact.....	8
I.7.2 Moulage par projection simultané.....	10
I.7.3 Les technologies dites en moule fermé.....	11
I.7.3.1 Moulage sous vide.....	11
I.7.3.2 Moulage par injection basse pression de résine (RTM).....	11
I.7.3.3 Moulage par injection haute pression de résine (RIM).....	11
Chapitre II : Comportement des matériaux composites	
II Introduction.....	13
II.1 Généralité sur le comportement élastique du matériau composite.....	13
II.1.1 Elasticité linéaire.....	13
II.1.2 Matériau anisotrope Dans le cas le plus général.....	14
II.1.3 Matériau monoclinique.....	14
II.1.4 Matériau orthotrope.....	15
II.1.5 Matériau unidirectionnel.....	16
II.1.6 Matériau isotrope.....	17

II.2	Modules de l'ingénieur.....	17
II.2.1	Pour un composite unidirectionnel.....	17
a	Traction longitudinale.....	17
b	Traction transverse.....	18
II.3	Modélisation d'un composite unidirectionnel.....	19
II.4	Modèle de Mori-Tanaka.....	20
Chapitre III : Expérimentation numérique et résultats		
III.1	Introduction.....	22
III.2	Matériau de l'étude.....	22
III.3	Géométrie de l'éprouvette.....	22
III.4	Essai numérique de traction d'un l'élément en (ANSYS).....	23
III.4.1	Création de la géométrie sur Ansys.....	23
III.4.2	Maillage.....	25
III.4.3	Conditions initial.....	27
III.4.4	Lancement du calcul.....	27
III.5	Résultats et discussion.....	28
Conclusion		31
générale.....		
Références		32
bibliographiques.....		

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites		
Figure (I.1)	Matériau composite [2].	3
Figure (I.2)	Représentation schématique d'un matériau composite de type particule matrice, fibres courtes-matrice et fibres continues matrice [3].	3
Figure (I.3)	Types de matrices utilisées dans les matériaux composites [5].	4
Figure (I.4)	Classification des renforts [11].	5
Figure (I.5)	Classification des composites selon la nature de la matrice [12].	6
Figure (I.6)	Classification des composites selon la catégorie de renfort [13].	6
Figure (I.7)	Classification du composite selon la forme des renforts [14].	7
Figure (I.8)	Différents types de fibres de verre [15].	7
Figure (I.9)	principe de moulage au contact [16].	9
Figure (I.10)	Principe de moulage par projection simultanée [16].	10
Figure (I.11)	Moulage sous vide [17].	11
Chapitre II : comportement des matériaux composites		
Figure(II.1)	Plan de symétrie [19].	14
Figure(II.2)	Couche de matériau composite orthotrope [20].	15
Figure(II.3)	Composite unidirectionnel [20].	16
Figure(II.4)	Méthode de Mori-Tanaka : représentation du problème élémentaire [22].	20
Figure(II.5)	Orientation effective de la fibre [24].	21
Chapitre III : Expérimentation numérique et résultats		
Figure (III.1)	Dimension de l'éprouvette	23
Figure (III.2)	Schéma de la géométrie du VFR (matrice / fibre).	23

Liste des figures

Figure (III.3)	Modélisation d'un super élément (époxy-verre) par Ansys	25
Figure (III.4)	Conditions initial	27
Figure (III.5)	Schéma de la Conditions initial sur Ansys	27
Figure (III.6)	Schéma définit le déplacement les points suivant UZ	28
Figure (III.7)	Déformation élastique de VER	28
Figure (III.8)	Schéma montre la répartition de la contrainte normale	29

Liste des Tableau

Chapitre III : Expérimentation numérique et résultats		
Tableau (III.1)	Dimension de la matrice en époxy	24
Tableau (III.2)	Démentions de la fibre en verre	25
Tableau (III.3)	Maillage de l'éprouvette (époxy-verre)	26

Introduction générale

Introduction générale

Les matériaux composites à matrice Polymère renforcés par des fibres synthétiques comme les fibres d'aramide, les fibres de carbone ou les fibres de verres sont largement utilisés dans divers domaines d'application, comme ceux de l'automobile, de la construction, de l'aéronautique, et des sports. Les fibres de verres sont actuellement les plus utilisées, dans le secteur des composites de grande distribution, grâce à leur faible coût, leur facilité de production et leurs propriétés mécaniques spécifiques importantes.

Ce développement de l'utilisation de ces matériaux nécessite de mettre en place des outils permettant leur caractérisation et la modélisation de leur comportement mécanique.

Pour caractériser ces matériaux composites et accéléré leur développement en utilisant la modélisation numérique effectué sur le logiciel d'éléments finis «ANSYS», qui l'offre des outils puissants pour l'analyse en deux (2D) et trois dimensions (3D).

L'objectif de ce travail est la modélisation numérique par le logiciel d'élément finis Ansys, d'un volume élémentaire représentatif (VER) en matériau composite unidirectionnel (époxy/fibres de verre).

Pour mener à terme ce projet, nous avons structuré ce travail en trois chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les matériaux composites.
- Le deuxième chapitre est étudiés le comportement des matériaux composites.
- Le troisième chapitre expérimentation numérique et résultats.

Enfin, conclure avec une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Chapitre I : *Généralités sur les matériaux composites*

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous exposons en un premier temps, une généralité sur les matériaux composites qui est dédié à une définition de ces matériaux, leurs constituants et leurs classifications, cette étude bibliographique donne un aperçu sur les matériaux composites d'une manière générale. Les différents procédés de mises en œuvre utilisées dans notre travail. Enfin quelques domaines d'application.

Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par apport aux matériaux traditionnels.

Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels: légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite et liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Il offre une meilleure isolation thermique ou phonique, et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique [1].

I.2 Définition :

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice , Le schéma général d'un matériau composite est donné sur la figure (I.1) et la figure (I.2) .

La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite [1].

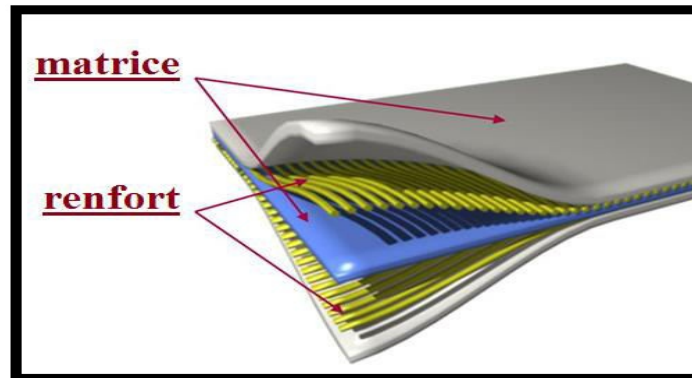


Figure (I.1) : Matériau composite [2].

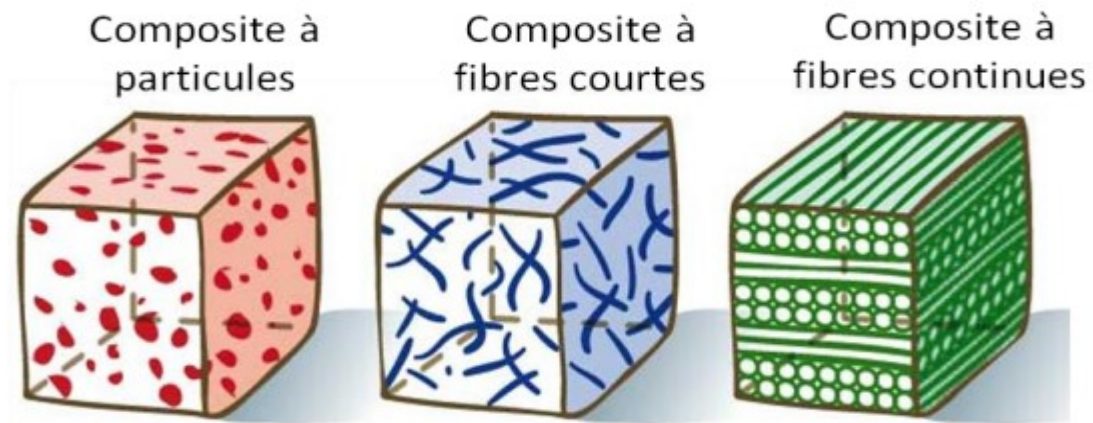


Figure (I.2) : Représentation schématique d'un matériau composite de type particule matrice, fibres courtes-matrice et fibres continues matrice [3].

I.3 Matrice :

La matrice permet de lier les renforts entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des renforts [4].

Les matrices habituellement utilisées dans la préparation des matériaux composites, sont classées en trois classes principales : les matrices organique CMO, les matrices céramique CMC et les matrices métallique CMM. Mais pour l'impérieuse nécessité de protection de la santé environnementale, des matrices naturelles ont été utilisées. La figure (I.3) représente une classification des matrices.

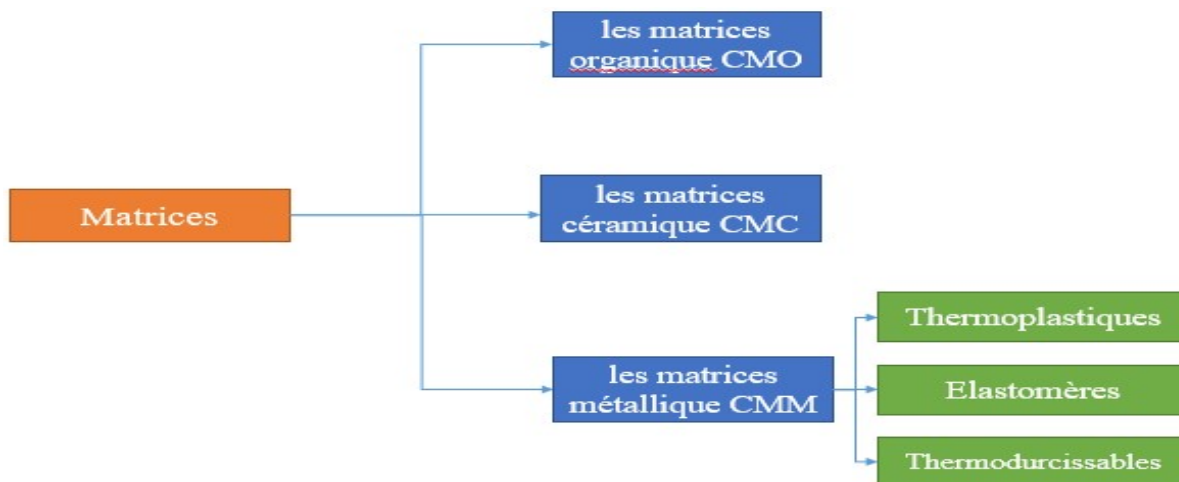


Figure (I.3) : Types de matrices utilisées dans les matériaux composites [5].

I.3.1 Matrices thermodurcissables :

Ces matrices se présentent sous forme d'une résine initialement à l'état de liquide visqueux, composée de molécules longues et indépendantes. Ces molécules établissent alors des liaisons. Grâce à des réactions déclenchées le plus souvent par l'action conjointe d'un durcisseur et de la température. Il se forme ainsi une structure solide tridimensionnelle.[6]

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage [7]:

- les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, dérivés allyliques.
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, etc..., .
- les résines époxydes.

I.3.2 Matrices Thermoplastiques :

Ce sont des matériaux semi-cristallins comportant une phase amorphe et une phase semi cristalline. Les polymères thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces polymères sont solides et nécessitent une transformation à très haut température [8].

La famille des résines thermoplastiques (on parle de "plastiques") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno-polymères). Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection [9].

Les principales familles de thermoplastiques sont [10] :

- Polypropylène (PP)
- acide poly lactique(PLA)
- polyéthylène à haute densité(HDPE)
- polychlorure de vinyle amorphe(PVC)
- polystyrène (PS)
- polyéthylène téréphtalate semi cristallin(PET)
- acrylonitrile butadiène styrène (ABS)

I.4 Renforts :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques et mécaniques de matériau composite.

La matrice est renforcée avec différents renforts en termes d'origine (animale, végétale, synthétique, etc.) ou de forme.

Les renforts peuvent être classés en deux catégories: renfort inorganiques et renforts organiques . La figure (I.4) représente la classification des types de renforts couramment rencontrés.

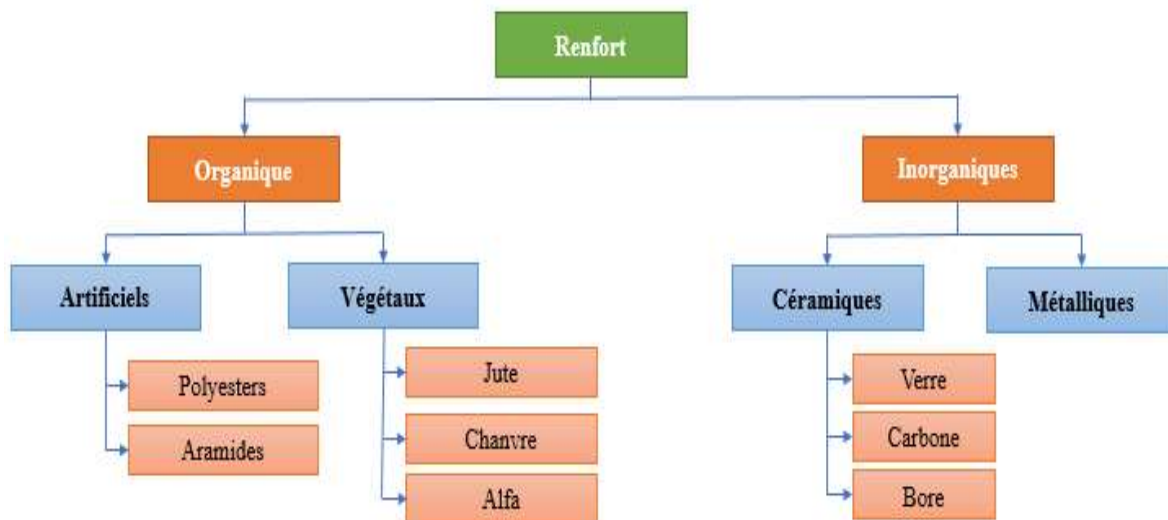


Figure (I.4):Classification des renforts [11].

I.5 Classification de composites :

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites qu'on peut classer soit selon la forme des composants ou suivant la nature des composants.

I.5.1 Classification selon le type de matrice :

Selon le type de la matrice, les matériaux composites sont classés en trois catégories [12]:

- Les composites à matrice organique.
- Les composites à matrice métallique.
- Les composites à matrices naturelle.

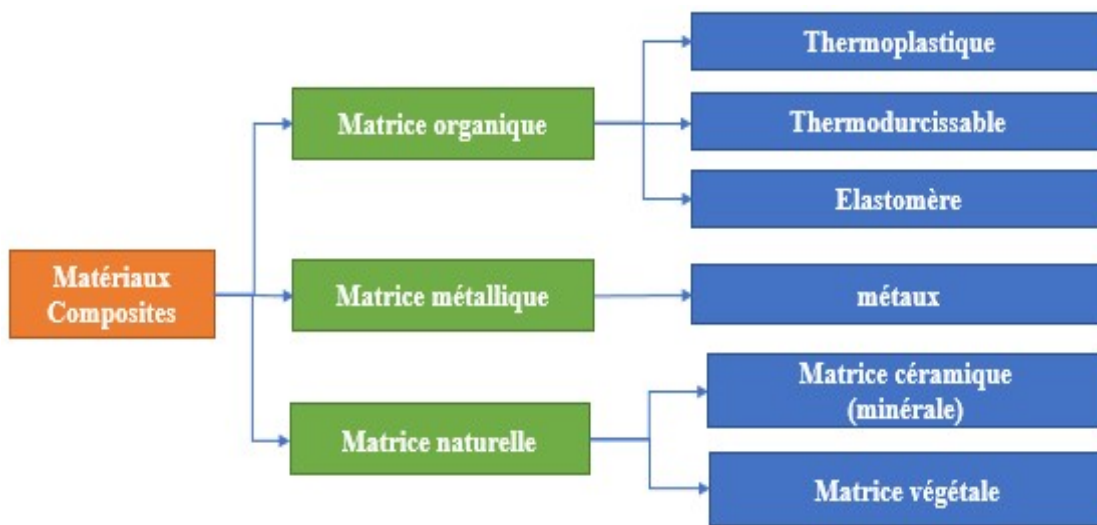


Figure (I.5) : Classification des composites selon la nature de la matrice [12].

I.5.2 Classification selon la catégorie du renfort :

Les composites fibreux peuvent être classés en deux catégories des fibres : fibres inorganiques et fibres organique.

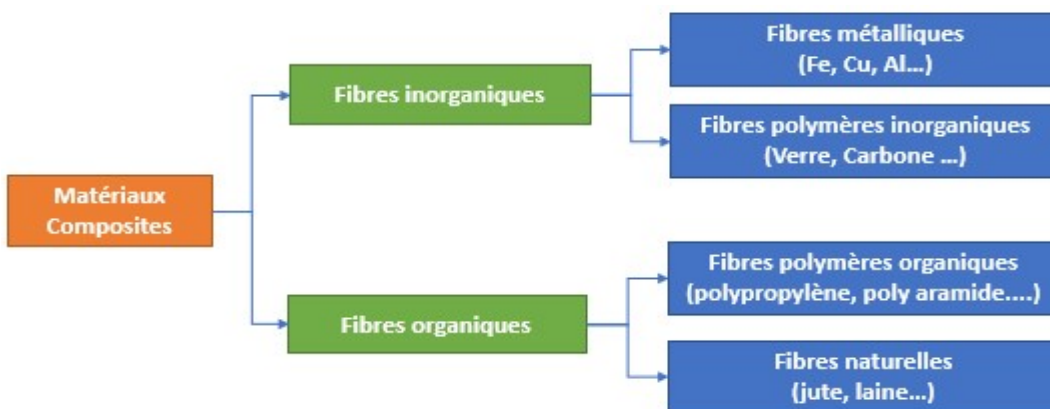
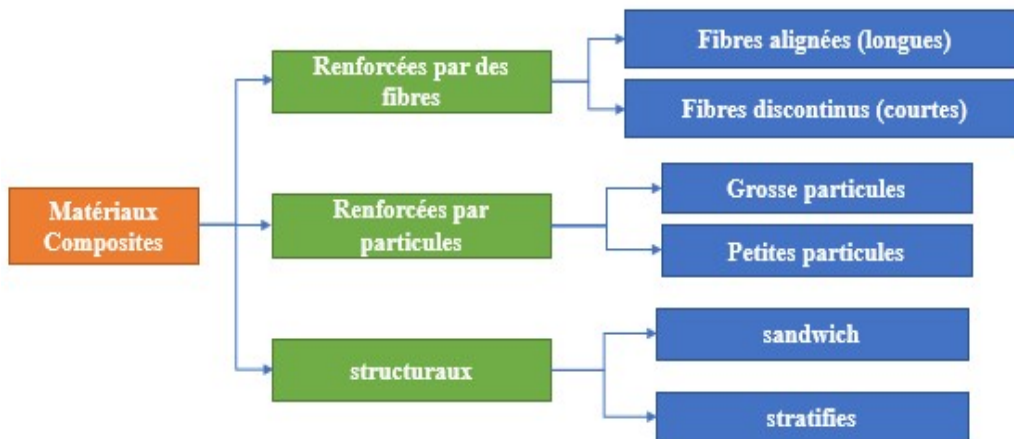


Figure (I.6) : Classification des composites selon la catégorie de renfort [13].

I.5.3 Classification selon la forme du renfort :

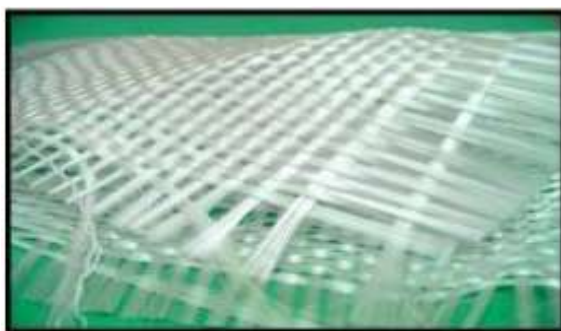
Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres, soit continués ou discontinues. Il est considéré à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules, et la troisième famille "structuraux" de cette classification est le résultat de l'intégration des deux premières familles « renforcés par des particules » et « renforcées par des fibres » [12].



Figure(I.7) : Classification du composite selon la forme des renforts [14].



Roving de verre



Tissu de verre



Mate de verre

Figure (I.8) : Différents types de fibres de verre. [15]

I.6 Les avantages et l'utilisation d'un matériau composite :

Les matériaux composites ont de nombreux avantages par leurs propriétés exceptionnelles, comparé aux autres matériaux qui peuvent être utilisés pour une même application:

- Moins volumineux : La masse est plus compacte et on obtient ainsi un produit moins volumineux pour à propriétés équivalentes.
- Plus fort : Le matériau est très résistant aux charges, aux chocs grâce au renfort
- Plus rigide
- Plus résistant : Le matériau est également résistant aux intempéries et aux agressions chimiques grâce à la matrice qui protège
- Meilleure durée de vie : La tenue du matériau à travers le temps est très bonne, on observe une absence de corrosion
- Liberté de forme : La matière est plus malléable et il est plus facile de créer des formes particulières

I.6.1 Les diverses applications d'un matériau Composite :

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et leur faible masse volumique. Les fibres de verre sont utilisées notamment dans la fabrication de pièces industrielles, de piscines, de pièces pour bateaux, d'éléments automobiles, de transports, et agricoles, de supports publicitaires, ou pour quelques pièces ou objets de décoration et d'ameublement.

Les fibres de carbone sont utilisées principalement dans les secteurs de l'aviation et du nautisme. Cependant, nombre de secteurs d'activités demeurent à explorer quant à l'usage des matériaux composites et leurs valeurs intrinsèques.

I.7 Classification à base de la structure composite :

I.7.1 Moulage au contact : [16]

Le principe est de procéder manuellement à la réalisation des pièces à partir des résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression.

Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

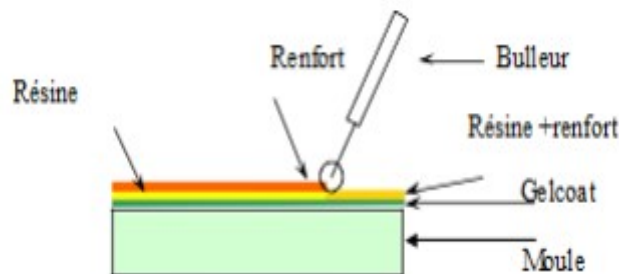


Figure (I.9): Principe de moulage au contact.

On utilise cette technologie de moulage dans le cas de fabrication des petites séries des pièces: de 1 à 1000 pièces/an, Pièces de très grandes dimensions et pour des Revêtements sur supports divers.

Ce type de type de moulage représente des avantages tel que :

- Très larges possibilités de forme.
- Pas de limite dimensionnelle.
- Une surface lisse gelotée (aspect, tenue à la corrosion).
- Propriétés mécaniques moyennes à bonnes.
- Investissements spécifiques très faibles.
- Moules simples, peu onéreux, rapide à réaliser en interne.

Mais aussi il se limite à :

- Une seule face lisse.
- Nécessité de finition (détourage, perçage.... , etc.).
- Qualité tributaire de la main d'œuvre.
- Faible cadence de production par moule.
- Espace de travail important.
- Conditions de travail médiocres.

I.7.2 Moulage par projection simultanée : [16]

Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- un dispositif de coupe - projection du renfort (rowing).
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et éboulés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine pré accélérée est catalysée en continu lors de sa projection.

Parmi les avantages associés à ce type de moulage on retrouve :

- Très larges possibilités de forme et dimensions
- Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection
- Investissements très modérés
- Moule simple, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.
- En plus des limites rencontrées par le moulage au contact, celui-ci se limite à des Propriétés mécaniques moyennes.

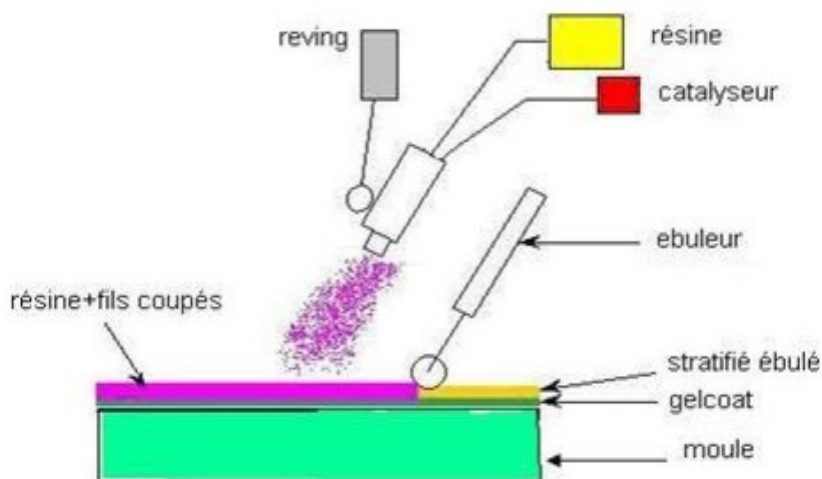


Figure (I.10): Principe de moulage par projection simultanée.

I. 7. 3 Les technologies dites en moule fermé :

I. 7. 3. 1 Moulage sous vide : [17]

Le moulage sous vide s'effectue en utilisant un moule ouvert sur lequel on dispose les couches de renfort imprégné.

Une fois que le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule et la résine catalysée est versée sur ce dernier, une feuille de plastique souple vient couvrir le tout hermétiquement (pose d'un joint d'étanchéité sur le périmètre de la pièce). On fait le vide sous la feuille de plastique des bulles d'air, fluage de l'excédent de résine qui est absorbé par un tissu de pompage. L'ensemble est ensuite soumis à polymérisation en étuve ou en autoclave.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

On utilise ce type de moulage dans le cas d'une production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses.

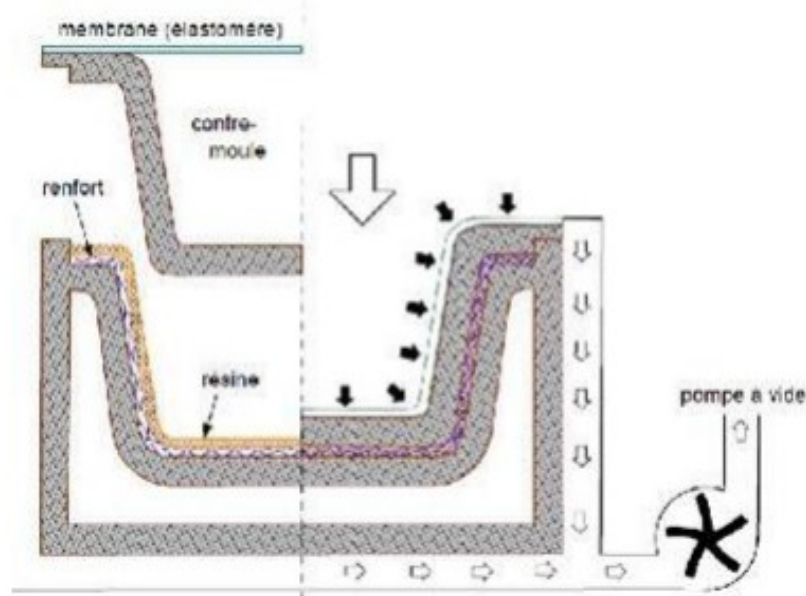


Figure (I.11): Moulage sous vide.

I. 7. 3. 2 Moulage par injection basse pression de résine (RTM) :

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides.

Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est mis en place dans le moule, une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. La pression de moulage est faible.

Le procédé convient pour des cadences jusqu'à 30 pièces par jour. [18]

Chapitre II : comportement des matériaux composites

Chapitre II : Comportement des matériaux composites

II .Introduction :

Le terme « comportement » fait référence au comportement des matériaux après exposition à certaines contraintes, ce qui conduit à la nécessité de créer des lois physiques qui reflètent ces comportements. Ce chapitre étudie principalement le comportement élastique des matériaux composites.

II.1.Généralité sur le comportement élastique du matériau composite :

II.1.1. Elasticité linéaire : [19]

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad \text{II.1}$$

Avec :

$\{\sigma\}$: Vecteur des contraintes

$[C]$: Tenseur de rigidité

$\{\varepsilon\}$: Vecteur de la déformation

Ou sous forme condensée :

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad \text{II.2}$$

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, introduit la matrice de rigidité C , symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général par 21 coefficients indépendants. La relation d'élasticité peut s'écrire sous la forme inverse, suivant :

$$\text{Avec :} \quad S = C^{-1} \quad \text{II.3}$$

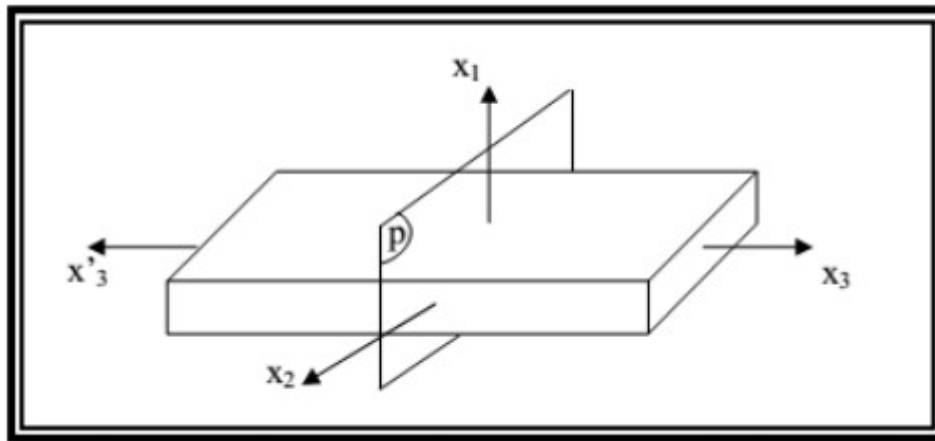
S : matrice de flexibilité ou de souplesse (symétrique).

II.1.2. Matériau anisotrope Dans le cas le plus général :

la matrice de rigidité et la matrice de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique ou matériau anisotrope. [19]

II.1.3. Matériau monoclinique :

Un matériau monoclinique est un matériau qui possède un plan de symétrie.



Figure(II.1): Plan de symétrie [19].

La forme de la matrice de rigidité (ou souplesse) doit être telle qu'un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce plan ne modifie pas la matrice. Dans le cas où le plan de symétrie est le plan (1,2), l'exploitation des changements de base conduit à une matrice de rigidité de la forme [19] :

$$\begin{bmatrix}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\
 C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\
 C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\
 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\
 C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66}
 \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est réduit à 13.

II.1.4. Matériau orthotrope :

Les stratifiés sont constitués de couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90 ° : les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame.

Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope [20].

Les directions principales (1, 2) seront prises respectivement suivant la direction chaîne et la direction trame ; ces directions seront également notées L et T (figure (II.2)) [20].

La direction 3 orthogonale au plan de la couche sera également notée T'.

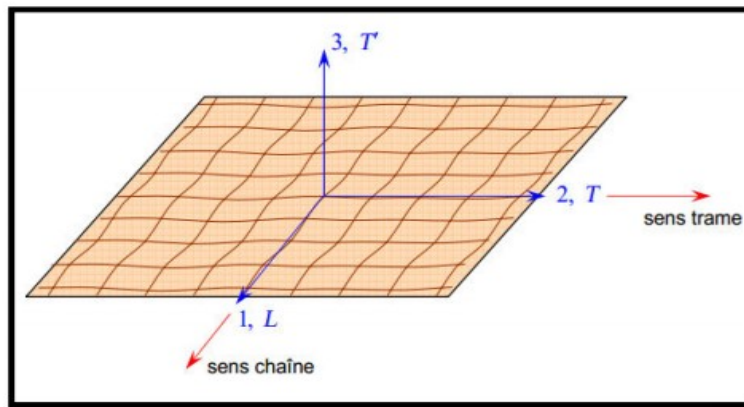


Figure II.2 : Couche de matériau composite orthotrope [20].

La forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant au matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire au précédent.

L'invariance de la matrice dans un changement de base effectué par symétrie par rapport à ce deuxième plan conduit à une matrice de rigidité de la forme :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

Où :

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{44}, S_{55}, S_{66}$$

II.1.5. Matériau unidirectionnel :

Un composite unidirectionnel est constitué de fibres parallèles disposés dans une matrice (figure (II.3)). Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres, d'où l'importance de son étude. La cellule élémentaire d'un tel matériau peut être considérée, en première approximation, comme constituée (figure (II.3)) d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice, à base circulaire ou mieux hexagonale [20].

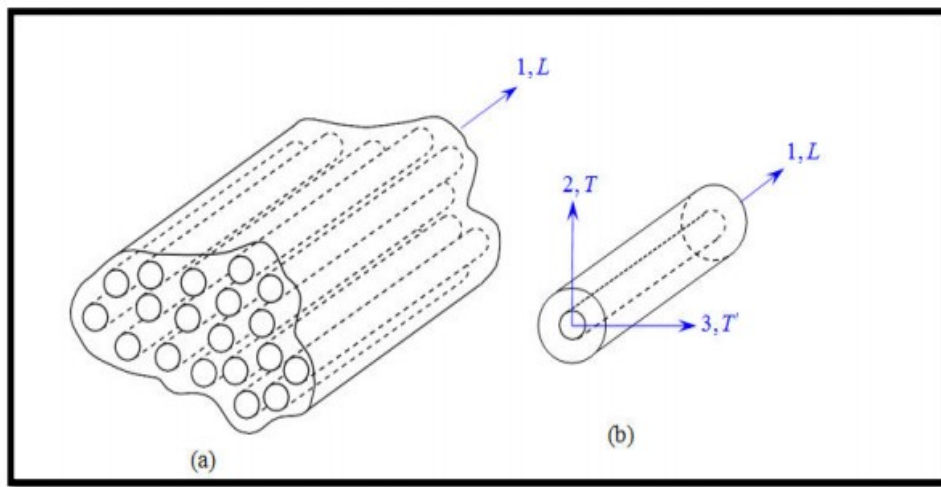


Figure (II.3) : Composite unidirectionnel [20].

La matrice de rigidité s'écrit donc suivant :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad \text{II.6}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Les propriétés du matériau orthotrope à isotrope transverse sont déterminées par 5 constantes d'élasticité indépendantes.

Où:

$$S_{11}, S_{12}, S_{22}, S_{23}, S_{66} \quad .$$

II.1.6. Matériau isotrope :

Un matériau est isotrope si ses propriétés sont indépendantes du choix des axes de référence. Il n'existe alors pas de direction privilégiée, et la matrice de rigidité (ou souplesse) doit être invariante dans tout changement de bases orthonormées [19]. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est donc réduit à 2, et conduit à la matrice de rigidité :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

La matrice de souplesse a la même forme. Généralement, les constantes de rigidité sont exprimées en introduisant les coefficients de Lamé λ et μ :

$$\begin{cases} C_{11} = \lambda + 2\mu \\ C_{12} = \lambda \end{cases} \quad \text{II.8}$$

II.2. Modules de l'ingénieur :

II.2.1. Pour un composite unidirectionnel :

Les modules de l'ingénieur sont les modules d'Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement. Ces modules sont mesurés dans des essais simples tels que des essais de traction uni axiale ou de cisaillement [19].

a. Traction longitudinale :

Dans un essai de traction longitudinale, toutes les contraintes sont nulles, excepté la contrainte σ_1 :

$$\sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_i = 2, \dots, 6.$$

En fonction des constantes de rigidité, les équations d'élasticité s'écrivent:

$$\begin{cases} \sigma_1 = C_{11} \varepsilon_1 + C_{12} \varepsilon_2 + C_{13} \varepsilon_3 \\ 0 = C_{12} \varepsilon_1 + C_{22} \varepsilon_2 + C_{23} \varepsilon_3 \\ 0 = C_{12} \varepsilon_1 + C_{23} \varepsilon_2 + C_{22} \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0 \end{cases}$$

De ces relations, nous tirons :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{C_{12}}{C_{22}+C_{23}} \varepsilon_1 ;$$

$$\sigma_1 = \left(C_{11} - 2 \frac{C_{12}^2}{C_{22}+C_{23}} \right) \varepsilon_1. \quad \text{II.9}$$

Nous en déduisons le module d'Young longitudinal E_L et le coefficient de Poisson ν_{LT} dans une traction longitudinale:

$$E_L = C_{11} - 2 \frac{C_{12}^2}{C_{22}+C_{23}} ; \quad \nu_{LT} = \frac{C_{12}}{C_{22}+C_{23}}. \quad \text{II.10}$$

b. Traction transverse :

Dans un essai de traction transverse, par exemple selon la direction 2, le champ des contraintes imposé est :

$$\sigma_2 \neq 0, \quad \sigma_i = 0, \quad i \neq 2.$$

Les équations d'élasticité, en fonction des constantes de rigidité, s'écrivent dans ce cas :

$$\begin{cases} 0 = C_{11} \varepsilon_1 + C_{12} \varepsilon_2 + C_{12} \varepsilon_3 \\ \sigma_2 = C_{12} \varepsilon_1 + C_{22} \varepsilon_2 + C_{23} \varepsilon_3 \\ 0 = C_{12} \varepsilon_1 + C_{23} \varepsilon_2 + C_{22} \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0 \end{cases}$$

D'où l'on tire :

$$\varepsilon_1 = -\frac{C_{12} (C_{23} - C_{22})}{C_{12}^2 - C_{11} C_{22}} \varepsilon_2 ;$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{C_{12}^2 - C_{11} C_{23}}{C_{12}^2 - C_{11} C_{22}} \varepsilon_2 ;$$

$$\sigma_2 = \left[C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22}-2C_{23})+C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2-C_{11}C_{22}} \right] \varepsilon_2. \quad \text{II.11}$$

$$E_L = C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22}-2C_{23})+C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2-C_{11}C_{22}};$$

$$\nu_{LT} = \frac{C_{12}(C_{23}-C_{22})}{C_{12}^2-C_{11}C_{22}}; \quad \text{II.12}$$

$$\nu_{TT'} = \frac{C_{12}^2-C_{11}C_{23}}{C_{12}^2-C_{11}C_{22}}.$$

*Ces relations, montrent que les coefficients E_L ; E_T ; ν_{LT} et ν_{TL} ; sont liés par la relation :

$$\frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}. \quad \text{II.13}$$

II.3.2 Modélisation d'un composite unidirectionnel : [21]

Un composite unidirectionnel est statistiquement isotrope transverse. A l'échelle macroscopique, les propriétés élastiques de ce composite dépendent donc de 5 constantes indépendantes. En général, on fait le choix suivant :

- Module de Young longitudinal : E_1
- Coefficient de Poisson longitudinal : ν_{12}
- Module d'Young transverse : E_2
- Module de cisaillement longitudinal : G_{12}
- Module de cisaillement transverse : G_{23}

Dans le paragraphe ci-dessous , nous utiliserons également comme intermédiaire de calcul le module de compression latérale du composite qui est relié aux constantes élastiques précédentes par la relation :

$$E_2 = \frac{2}{\frac{1}{2K_1} + \frac{1}{2G_{23}} + 2\frac{\nu_{12}^2}{E_1}} \quad \text{II.14}$$

II.2.4. Modèle de Mori-Tanaka :

Ce modèle introduit par Mori -Tanaka en 1973 est défini pour un matériau composite élastique linéaire à deux milieux (matrice et renfort) supposés homogènes. Mori-Tanaka considèrent que le renfort est noyé dans un milieu infini ayant les propriétés de la matrice.

L'ensemble est soumis à l'infini à la déformation moyenne de la matrice in situ dans le composite.

La méthode permet de calculer la contrainte moyenne et l'énergie cinétique stockée dans la matrice. Dans ce modèle, le VER est soumis à l'infini à la déformation moyenne de la matrice (Figure II.4).

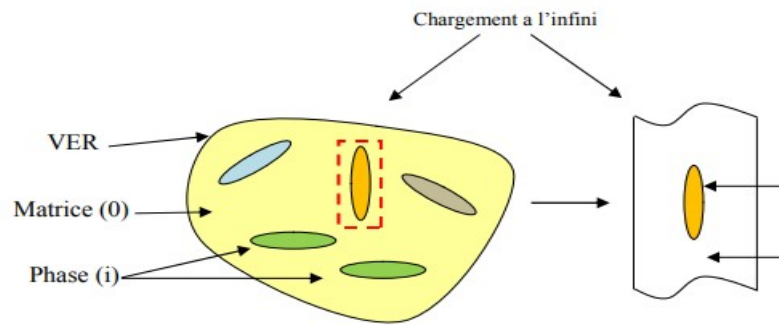


Figure (II.4) : Méthode de Mori-Tanaka : représentation du problème élémentaire [22].

Le tenseur de rigidité du matériau équivalent C_c est donné par la relation suivante [22] :

$$C_c = C_0 \left[I + \left(\sum_{i=1}^n f^i L^i \right) : \left(I + \sum_{i=1}^n f^i (S_{Esh}^i - I) L^i \right)^{-1} \right]^{-1} \quad \text{II.16}$$

Où :

L^i le pseudo-tenseur de localisation de la phase « i » donné par l'expression suivante :

$$L^i = \left[(C^i - C_0) S_{Esh}^i + C_0 \right]^{-1} (C^i - C_0) \quad \text{II.17}$$

S_{ES}^i représente le tenseur d'Eshelby de la phase « i » dans le repère local donné par l'expression suivante :

$$S_{Esh}^i = R T_i R^{-1} S_{Esh} R T_i^{-1} R^{-1} \quad \text{II.18}$$

S_{Esh} représente le tenseur d'Eshelby de la phase « i » dans le repère global [23] présent dans les équations (IV.9) est écrit sous la forme suivante :

$$S_{Esh} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

Le tenseur d'Eshelby dépend plutôt de la géométrie des fibres et du coefficient du Poisson de la matrice. Dans notre cas, la géométrie de la fibre utilisée est sous forme cylindrique et de longueur courte. Le rapport de forme de la fibre rapport de la longueur au diamètre est supérieur à un. Les composants S_{ijkl} du tenseur d'Eshelby sont présentés dans l'Annexe 3.

Avec :

T_i le tenseur de rotation de la famille i et R le tenseur de Reuter.

Pour une phase on considère que l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement effectif du composite est présentée en introduisant les trois angles d'Euler (Φ, Ψ, γ) (Figure II.5).

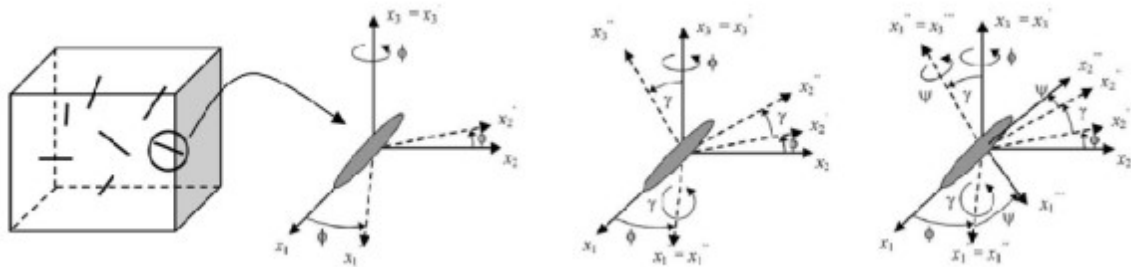


Figure (II.5) : Orientation effective de la fibre [24].

Chapitre III : Expérimentation numérique et résultats

Chapitre III : Expérimentation numérique et résultats**III.1. Introduction**

Le développement des méthodes par éléments finis pour la résolution des problèmes pratiques et les problèmes d'ingénierie. Ont commencé avec l'avènement de l'ordinateur numérique. Et c'était ce n'est que grâce à l'utilisation de l'ordinateur numérique que ce processus pourrait être rendu efficace et donnée d'applicabilité générale [25].

Dans ce chapitre, on présent un travail sur l'étude simulée par Ansys pour déterminer les comportements mécaniques d'un matériau composite. Il se compose d'une matrice en époxy et d'un renfort en fibre de verre Où nous étudierons l'effet du processus de traction du matériau composite.

III.2. Matériau de l'étude

Le matériau ce que nous mettons en avant dans notre travail, est un matériau composite composé d'une matrice époxy et d'un renfort unidirectionnel en fibre de verre. Les propriétés mécaniques des constituants de ce matériau sont :

- Caractéristique de la fibre de verre

$$E_f = 73000 \text{ MPA} , \nu_f = 0,3 \text{ et } V_f = 0,1781$$

- Caractéristique de l'époxy

$$E_m = 4500 \text{ MPA} \text{ et } \nu_m = 0,4$$

III.3. Géométrie de l'éprouvette

Le Volume Élémentaire Représentatif (VÉR) joue un rôle important dans la mécanique des matériaux composites dans le but de déterminer leurs propriétés effectives. L'homogénéisation numérique permet de calculer avec précision les propriétés effectives des composites.

L'éprouvette étudiée dans ce travail est choisi comme un volume élémentaire représentatif qui représente un matériau composite unidirectionnel, le VER utilisé est un petit élément cubique contient trois cylindres repartie uniformément et symétriques dans l'élément figure(III.1)

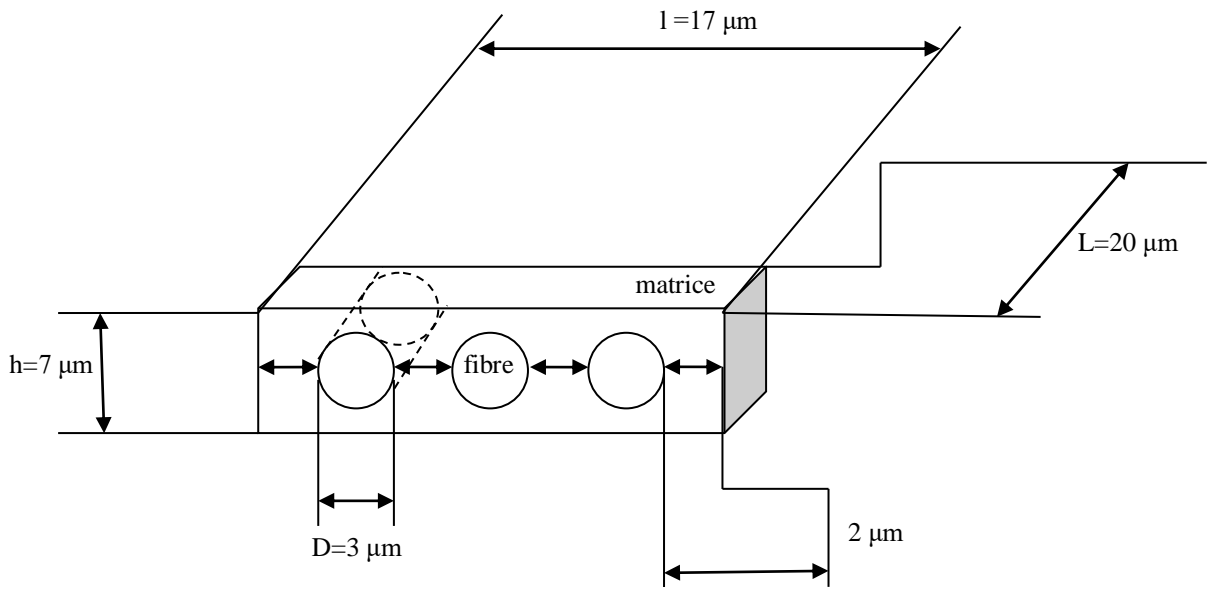


Figure (III.1) : Dimension de l'éprouvette

III.4. Essai numérique de traction d'un l'élément en (ANSYS)

L'étude de traction d'un élément en matériau composite unidirectionnel a été effectuée en 3D, en utilisant le code d'éléments finis ANSYS. L'élément est sollicité a une pression de 1MPa.

III.4.1. Création de la géométrie sur Ansys

La géométrie et les dimensions de l'éprouvette de l'étude sont illustrées dans la figure (III.2).

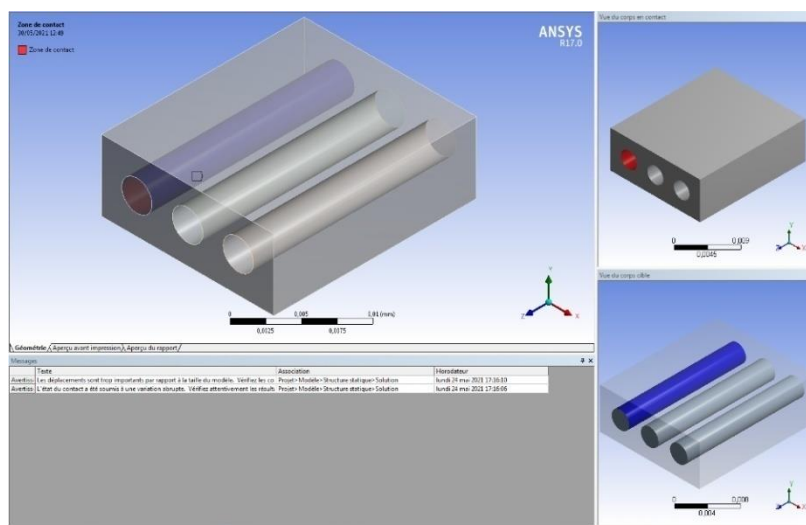


Figure (III.2) : Schéma de la géométrie du VFR (matrice / fibre).

Tableau (III.1) : Dimension de la matrice en époxy

Nom de l'objet	Solide
Etat	Maillé
Propriétés graphiques	
Visible	Oui
Transparence	1
Définition	
Désactivé	Non
Comportement de raideur	Flexible
Système de coordonnées	Système de coordonnées par défaut
Température de référence	Par environnement
Comportement	Aucun
Matériau	
Affectation	époxy
Effets non linéaires	Oui
Effets de déformation thermique	Non
Boîte englobante	
Longueur suivant X	1,7e-002 mm
Longueur suivant Y	7,e-003 mm
Longueur suivant Z	2,e-002 mm
Propriétés	
Volume	1,9559e-006 mm ³
Masse	0, kg
Coord. X du centre de gravité	8,5e-003 mm
Coord. Y du centre de gravité	3,5e-003 mm
Coord. Z du centre de gravité	1,e-002 mm
Moment d'inertie Ip1	0, kg·mm ²
Moment d'inertie Ip2	0, kg·mm ²
Moment d'inertie Ip3	0, kg·mm ²
Statistiques	
Nouds	33578
Eléments	6882
Paramètres de maillage	Aucun

Tableau (III.2) : Démentions de la fibre en verre

Nom de l'objet	Pièce
Etat	Maillé
Propriétés graphiques	
Visible	Oui
Définition	
Désactivé	Non
Affectation	verre
Système de coordonnées	Système de coordonnées par défaut
Boîte englobante	
Longueur suivant X	1,3e-002 mm
Longueur suivant Y	3,e-003 mm
Longueur suivant Z	2,e-002 mm
Propriétés	
Volume	4,2412e-007 mm ³
Masse	0, kg
Coord. X du centre de gravité	0, mm
Coord. Y du centre de gravité	0, mm
Coord. Z du centre de gravité	0, mm
Moment d'inertie Ip1	0, kg·mm ²
Moment d'inertie Ip2	0, kg·mm ²
Moment d'inertie Ip3	0, kg·mm ²
Statistiques	
Nouds	95364
Eléments	21312
Paramètres de maillage	Aucun

III.4.2. Maillage

Le but principal d'un maillage d'éléments finis est de rapprocher adéquatement la géométrie du corps modélisé, représentant toutes les fonctionnalités de la géométrie de l'objet à la solution

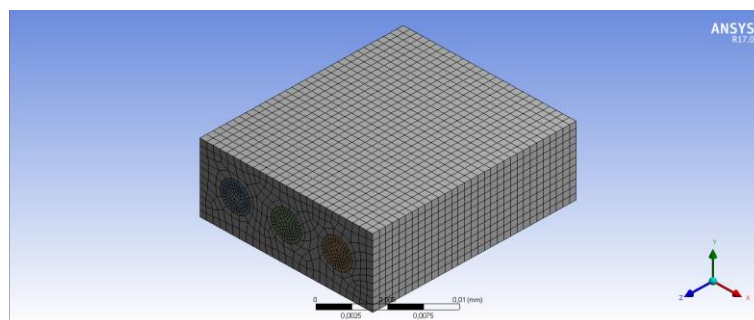


Figure (III.3) : Modélisation d'un super élément (époxy-verre) par Ansys

Tableau (III.3) : Maillage de l'éprouvette (époxy-verre)

Nom de l'objet	<i>Maillage</i>
Etat	Résolu
Affichage	
Style d'affichage	Couleur du corps
Réglages par défaut	
Physique de préférence	Mécanique
Pertinence	0
Contrôle de forme	Mécanique standard
Nouds intermédiaires d'éléments	Contrôlé par le programme
Dimensionnement	
Fonction de taille	Adaptatif
Centre de pertinence	Moyen
Taille des éléments	Par défaut
Taille d'élément initiale	Assemblage actif
Lissage	Moyen
Transition	Rapide
Centre d'angle de course	Grossier
Simplification du maillage de base automatique	Activé
Tolérance de simplification	Par défaut
Longueur d'arête minimale	7,e-003 mm
Inflation	
Utiliser l'inflation tét. automatique	Aucun
Option Inflation	Transition progressive
Rapport de transition	0,272
Maximum couches	5
Taux de croissance	1,2
Algorithme d'inflation	Pré
Afficher les options avancées	Non
Avancés	
Nombre de CPUs pour le maillage parallélisé de la pièce	Contrôlé par le programme
Éléments à arêtes rectilignes	Non
Nombre de tentatives	Par défaut (4)
Tentatives supplémentaires pour l'assemblage	Oui
Comportement de corps rigide	Dimensionnellement réduit
Morphing de maillage	Désactivé
Mailleur surfacique triangulaire	Contrôlé par le programme
Vérification topologique	Non
Tolérance de pincement	Veillez définir
Générer le pincement à l'actualisation	Non
Statistiques	
Nouds	128942
Éléments	28194
Paramètres de maillage	Aucun

III. 4.3. Conditions initial

Les conditions aux limites appliquées sont:

- Au niveau de la première face on a la translation $U_z=0$,
- Au niveau de la deuxième face on a une pression $P_z = \sigma_z = 1MPa$
- Point A pour éviter les mouvements du corps rigide

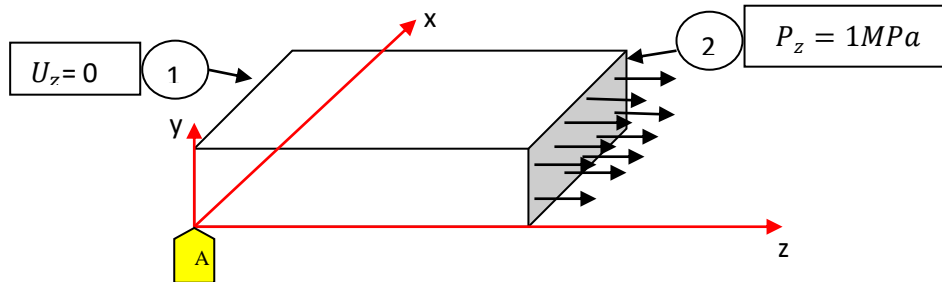


Figure (III.4) : Conditions initial

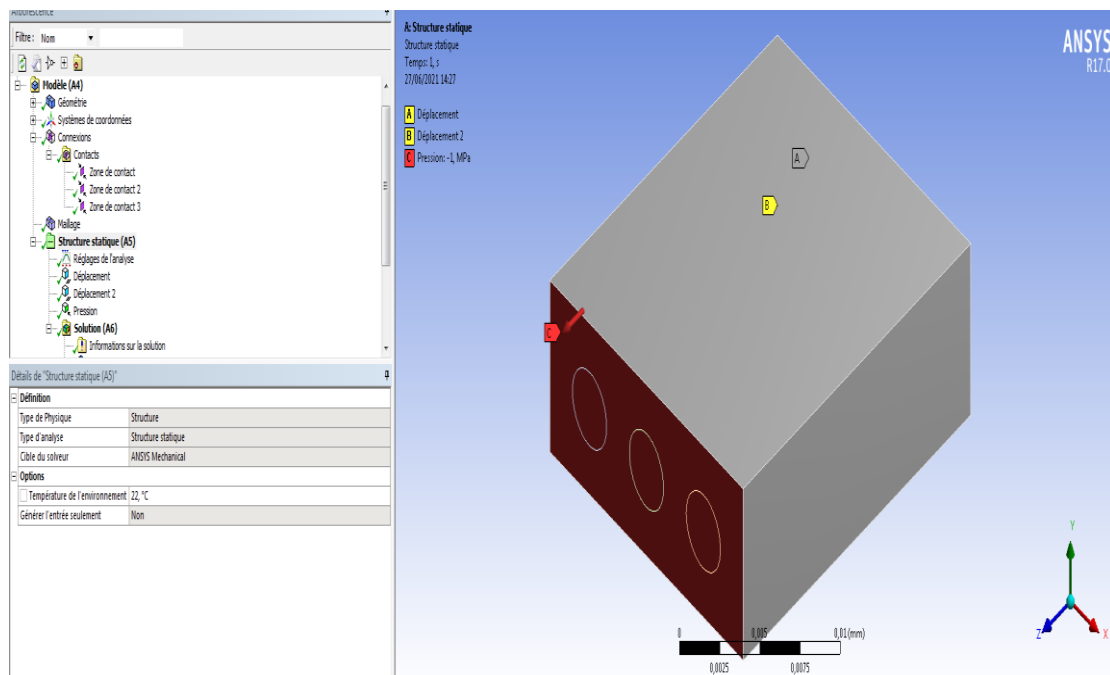


Figure (III.5) : Schéma de la Conditions initial sur Ansys

III.4.4. Lancement du calcul

Cette étape a pris un petit peu de temps parce qu'on a utilisé un maillage très fin pour obtenir des résultats précis.

III.5. Résultats et discussion

Dans ce travail on donne la valeur de Contrainte est 1 MPa, est en suite Nous allons calculer la moyenne arithmétique de la déformation ϵ . Les résultats obtenus d’après les calculs montrent dans la figure (III.6, 7 et 8).

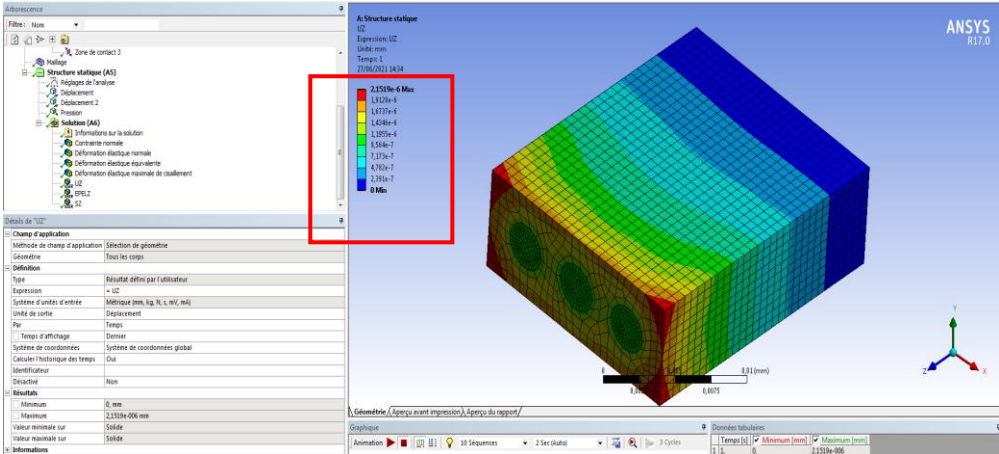


Figure (III.6) : Schéma définit le déplacement les points suivant U_z

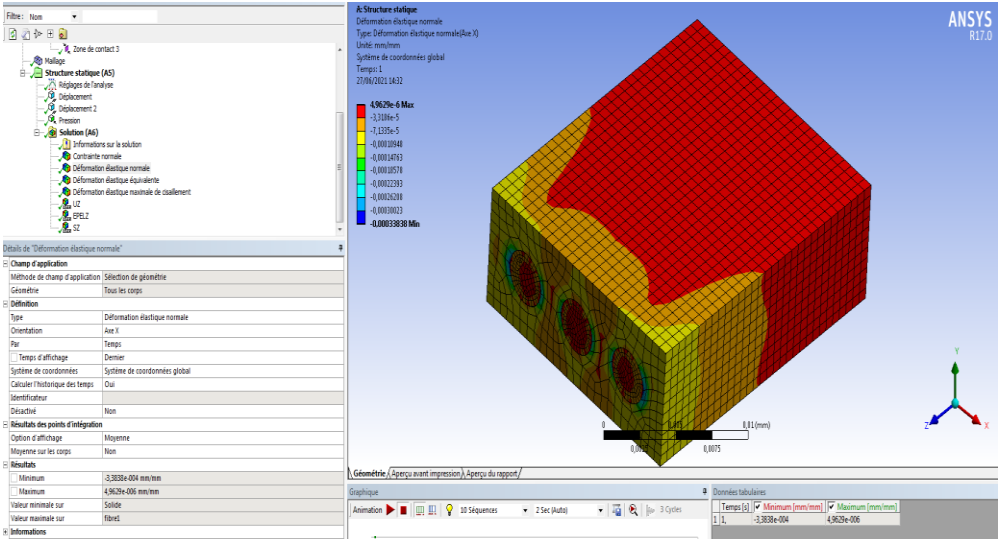


Figure (III.7) : Déformation élastique de VER

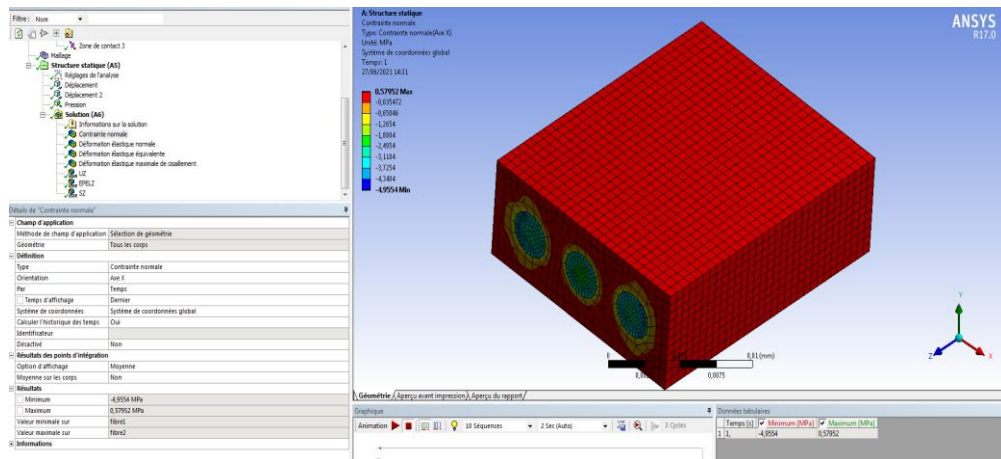


Figure (III.8) : Schéma montre la répartition de la contrainte normale

D’après les déplacements élastiques données par Ansys en détermine la déformation moyenne :

$$U_{z,moyen} = \frac{2,15 \times 10^{-6} + 1,91 \times 10^{-6} + 1,67 \times 10^{-6} + 1,43 \times 10^{-6} + 1,20 \times 10^{-6} + 9,56 \times 10^{-7} + 7,17 \times 10^{-7} + 4,78 \times 10^{-7} + 2,39 \times 10^{-7}}{9}$$

$$U_{z,moyen} = 1,192 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

En trouve la déformation :

$$\epsilon_{moyen} = \frac{U_{z,moyen}}{L}$$

Par la suite :

$$\epsilon_{moyen} = \frac{1,192 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-3}} = 0,0596 \times 10^{-3}$$

Le module élasticité effectif E est déterminé numériquement par la relation de la loi de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donc :

Le module élasticité effectif E:

$$E = \frac{0.001}{0,0596 \times 10^{-3}} = 16,778 \text{ GPa}$$

Ce résultat du module d'élasticité on comparera avec la valeur numérique calculé par la loi de mélange et par le code du calcul de Mori-Tanaka.

- La loi de mélange :

$$E_{\text{mélange}} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m.$$

Où :

$$V_f = 0,1781$$

Et :

$$E_{\text{mélange}} = 0,1781 * 73 + (1 - 0,1781) * 4,5 = 16,699 \text{ GPa}$$

- Méthode de Mori-Tanaka (code de y.Djebloun): [28] .

$$E_{\text{Mori.T}} = 16,708 \text{ GPa}$$

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de cette recherche est de montrer les résultats de la recherche numérique du comportement mécanique par le programme Ansys des matériaux composites ; ce matériau est principalement adapté pour Conception mécanique dans différents domaines.

Dans ce travail, nous proposons un matériau composite unidirectionnel composé d'une résine époxy renforcée par des fibres longues en verre.

De ce travail, nous avons déterminé les points suivants :

Des Informations bibliographiques, théoriques et pratiques associées Matériaux composites, leur fabrication et leur utilisation dans la conception

Nous obtenons les résultats par les étapes suivantes :

- Dessin d'élément composé par la simulation de programme Ansys.
- Application d'une force de traction à l'élément composite afin d'obtenir la limitation et la déformation afin de calculer la valeur du module d'élasticité effectif E .
- Comparaison entre la valeur du module d'élasticité effectif extraite de l'application du procédé de traction appliqué à l'élément composite avec la valeur calculée à partir de l'application de la loi de mélange et de la méthode de Mori-Tanaka .

Comme perspectives futures à ce travail, nous modélisons en 3D des matériaux composites bidimensionnels ou à des fibres courtes orientées aléatoires par le logiciel Ansys.

Références bibliographiques :

- [1] Munier P, 1973. Le Palmier Dattier. Éd.G.-P. Maisonneuve et Larose. Paris. 222 p.
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite (2017)
- [3] AGROCOMPOSITE JUTE - Gold of Bengal.” [Online]. Available: <http://goldofbengal.com/les-projets/composite-jute/>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [4] Baali, M., Contribution à la caractérisation et à l’exploration de la microstructure et des propriétés des constituants du palmier. 2012, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [5] Berthelot, J.-M., Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 2010
- [6] F. M. L. Rekbi, "Contribution à l’analyse de l’endommagement des matériaux composites," Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [7] Gay, D., Matériaux composites, 4 e édition revue et augmentée. Chapitre3, Hermès-Paris, 1997.
- [8] M. Ragoubi, "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne," Thèse de doctorat, Nancy 1, 2010.
- [9] Laurent, G., Généralités sur les matériaux composites. Ecole d’ingénieur, 2008.
- [10] Ibtissam, A., Etude expérimentale et numérique de effet d’orientation des fibres sur le comportement mécanique d’un bio-composite. 2017, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA
- [11] Michaud, F., Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage. 2003.
- [12] Prombut, P., Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels. 2007, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- [13] Djoudi, T., Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à base de fibres de palmier dattier. 2019, Université Mohamed Khider-Biskra

- [14] Mohammed Ismail, B., *Élaboration et caractérisation des biocomposites à matrice polyéthylène (PE) renforcées par des fibres végétales*. 2018, Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- [15] P. Jodin. 1994. « Le Bois, Matériau d'Ingénierie. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, Nancy, France33 ».
- [16] R.M .Rowell, R.A Young, J.K. Rowell, 1997. *Paper and composites from agro-based resources*. Ed Rowell R.M, Lewis Publisher, Boca Raton, USA.
- [17] M. Baali, "Contribution a la caracterisation et a l'exploration de la microstructure et des propriétés des constituants du palmier," *Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider Biskra, (Algérie), 2012*.
- [18] N. Nishimura, A. Izumi, K .Kuroda. 2002. "Structural caractérisation of kenaf lignin: différences among kenaf variétés. *Industriel Corps and Products*". 15: 115–122.
- [19] :<http://www.compomecagrimep.com/app/download/6171693/MécaniqueComposites+Chapitre+10.pdf> .
- <http://www.compomecagrimep.com/app/download/6171689/M%C3%A9caniqueComposites+Chapitre+9.pdf> .
- (10/04/2019)
- [20] : DJEBLOUN Youcef, (2004), *mémoire de magistère « Etude de la rupture en mode I d'ouverture des matériaux composites »* .
- [21] : Zakariya BOUFAIDA : *mémoire de doctorat« Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice»* .
- [22]: A. Benhizia, "OPTIMISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE EN DOMAINE NON LINEAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES PAR TECHNIQUE D'HOMOGENEISATION," *Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2015*

- [23] : A. Elouaer, "Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales," Thèse de doctorat, Reims, France, 2011.
- [24] : T. Mura, Micromechanics of defects in solids, second, revised ed.: Martinus, Nijhoff, Boston, USA, 1987.
- [25] : Bathe, K. J. (2006). Finite element procedures. Klaus-Jurgen Bathe.
- [26] : Amhammed, M., & Hamza, O. (2014). Détermination expérimentale et par simulation numérique des paramètres modaux pour les plaques minces (Doctoral dissertation).
- [27] : Bathe, K-J. Finite Element Procedures. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [28] : DJABLOUN youcef ,2018,"contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales" thèse doctorat de l'université de Biskra