

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option **CONSTRUCTION MECANIQUE**

Présenté par :

DJAALAB Ahmed Yacine & SI MOHAMED Khaled

Thème

Conception, Simulation et Réalisation d'un
enjolveur en biocomposite dans l'industrie
automobile

Soutenu le 25 juin 2025 devant le jury composé de

Moussa Mohamed Amine

MCB

Président

ZEGGANE

MCB

Examineur

MOUSSAOUI Nafissa

MCA

Encadrante

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Ce mémoire porte sur l'élaboration et la caractérisation de biocomposites renforcés par des fibres naturelles dans le but de développer des matériaux alternatifs durables, légers et performants pour des applications dans le secteur automobile. Les matériaux étudiés sont constitués d'une matrice polymère (époxy et polyester) associée à des charges naturelles et/ou nanométriques (telles que le TiO₂ et l'alumine). Différents procédés de fabrication ont été mis en œuvre, notamment le moulage sous vide. Des essais mécaniques (traction, flexion) ont été réalisés afin d'évaluer les performances des matériaux élaborés. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative des propriétés mécaniques pour certaines formulations, particulièrement celles contenant des charges nanométriques. Ce travail démontre le potentiel des biocomposites dans la conception de pièces techniques tout en répondant aux exigences environnementales actuelles.

Mots-clés:

Enjoliveur, Fibre végétale, Bio composite, Industrie auto, Époxy.

ملخص

يركز هذا العمل البحثي على تطوير وتوصيف الخواص الميكانيكية للمواد الحيوية المركبة المعززة بالألياف الطبيعية، والمخصصة للتطبيقات الخفيفة والصدقية للبيئة، خاصة في قطاع صناعة السيارات. تم تصنيع هذه المواد المركبة باستخدام مصفوفة بوليمرية (إيبوكسي و بوليستر) مدعمة بحشوات طبيعية وجزينات نانوية مثل أوكسيد الألمنيوم وثاني أكسيد التيتانيوم. تم اعتماد تقنية التشكيل بالتفريغ في عملية التحضير، تلتها عملية تقطيع العينات حسب الأبعاد المعيارية. أجريت اختبارات ميكانيكية، منها اختبار الشد والانحناء، لتقييم مقاومة المواد والصلابة والتشوه. أظهرت النتائج أن إدخال الجسيمات النانوية أدى إلى تحسين ملحوظ في الأداء الميكانيكي للمواد. وتؤكد هذه الدراسة إمكانيات استخدام المواد الحيوية كمادة بديلة مستدامة للمواد المركبة التقليدية في التطبيقات الصناعية

كلمات مفتاحية :

غطاء العجلة، الياف طبيعية، مواد مركبة حيوية، صناعة السيارات، ايبوكسي.

Abstract

This thesis focuses on the development and characterization of natural fiber-reinforced biocomposites aimed at creating sustainable, lightweight, and high-performance alternative materials for automotive applications. The studied materials consist of a polymer matrix (epoxy and polyester) combined with natural and/or nano-scale fillers (such as TiO₂ or alumina). Various fabrication processes, including vacuum molding, were applied. Mechanical tests (tensile, flexural) were conducted to assess the performance of the developed materials. The results show a significant improvement in mechanical properties for certain formulations, especially those incorporating nano-fillers. This work highlights the potential of biocomposites for use in technical parts while meeting current environmental challenges.

Keywords:

hubcap, plant fiber, biocomposite, automotive industry, epoxy.

Sommaire

Introduction Générale.....	14
I I.1 Introduction.....	17
I.2 Fondements et Caractéristiques des Matériaux Composites.....	17
I.2.1 Définition et Structure des Matériaux Composites.....	17
I. 2. 2. Caractéristiques générales.....	18
I. 3. CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES.....	19
I.3.1.1 Renfort en fibres discontinues.....	20
1.3.1.2 Renfort continu.....	20
I. 3. 2. Matrice : [8].....	21
I.4 Matériaux composites structuraux.....	22
I.4.1 Monocouches.....	22
I.4.2 Stratifiés.....	22
I.4.3 Sandwichs.....	23
I.5 Avantages Intrinsèques des Composites pour l'Automobile.....	23
I.6 Évolution et Innovation dans les Composites Automobiles.....	24
I.7 Biocomposites : Une Alternative Durable.....	24
I.7.1 Composition et Propriétés des Biocomposites.....	24
I.7.2 Classification des fibres naturelles.....	25
I.7.2 Structure de la fibre végétale.....	26
I.7.4 Composition chimiques des fibres végétales.....	27
I.7.5 Caractéristique des fibres naturelles.....	29
I.7.6 Extraction des fibres végétales.....	30
I.7.7 Fibres végétales en Algérie.....	31
I.7.8 Avantages des matériaux composites à fibres naturelles par rapport aux matériaux traditionnels.....	31
I.8 Applications et Développements des Biocomposites dans l'Automobile.....	34
I.9 Défis et Limitations des Biocomposites.....	34

Sommaire

I.10 Applications Spécialisées : Les Enjoliveurs en Matériaux Composites.....	35
I.10.1 Fonctions et Typologie des Enjoliveurs.....	35
I.10.2 Matériaux et Innovations dans les Enjoliveurs.....	35
I.10.3 Spécifications Techniques et Marchés des Enjoliveurs.....	36
I.11 Techniques de Mise en Œuvre des Composites.....	36
I.11.1 Procédés pour Petites et Moyennes Séries.....	36
I.11.2 Technologies Avancées pour la Production de Masse.....	37
I.12 Perspectives et Enjeux Futurs.....	38
I.13 Défis Économiques et Environnementaux.....	38
I.14 Conclusion.....	39
Chapitre II.....	41
Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite.....	41
II.1 Introduction.....	42
II.2 Présentation de SolidWorks.....	42
II.3 Analyse fonctionnelle.....	42
II.3.1 Définition et Place de l'Enjoliveur dans le Système Véhicule.....	43
II.3.2 Caractéristiques Générales.....	43
II.3.3 Analyse fonctionnelle principales.....	44
II.4 Cahier des charges technique.....	44
II.5 Conception 2D de l'enjoliveur (dessin technique).....	44
II.4 Modélisation 3D de la pièce enjoliveur automobile sous SolidWorks.....	45
II.4.1 Définition des cotes.....	46
II.4.2 Révolution du profil.....	46
II.4.3 congés.....	47
II.4.4 Création des Ailettes par Extrusion et Répétition Circulaire.....	47
II.4.5 Réalisation des Motifs et Trous de Fixation.....	48
II.4.6 Achèvement des Motifs Détaillés.....	49
II.4.7 Ajout des Bossages de Fixation.....	49
II.4.8 Opérations d'Intersection et de Découpe Finale.....	50
II.4.9 Renforcement et Fonctionnalité des Points de Fixation.....	51
Chapitre III.....	54
Simulation numérique.....	54
III.1 Introduction.....	55

Sommaire

III.2 Présentation de SolidWorks Simulation.....	55
III.3 Étapes principales de simulation.....	56
III.3.1 Création ou importation du modèle 3D.....	56
III.3.2 Création d'une étude de simulation.....	56
III.3.3 Application des matériaux.....	57
III.3.4 Fixations /conditions aux limites.....	58
III.3.5 Chargements.....	58
III.3.6 Définition du Maillage (Mesh).....	59
III.3.7 Exécution de la simulation.....	61
III.4 Résultats et discussion.....	62
III.4.1 pression (Contrainte).....	62
III.4.1.1 Contrainte de Von Mises.....	62
III.4.1.2 Déplacement Résultant.....	64
III.4.2 Force centrifuge (Centrifugal force).....	64
III.4.2.1 Contrainte de Von Mises.....	64
III.4.2.2 Déplacement Résultant (Sous Charge Centrifuge).....	65
III.4.3 Charge Thermique.....	66
III.4.3.1 Contrainte de Von Mises (pour Enjoliveur en Composite Jute-Époxy, Sous Charge Thermique).....	66
III.4.3.2 Déplacement Résultant (Enjoliveur, Sous Charge Thermique).....	68
III.5 Conclusion.....	69
Chapitre : IV.....	70
Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite.....	70
IV.1 Introduction.....	71
IV.2 Choix des matériaux et des fibres naturelles.....	71
VI.2.1 Fibre naturelle de Jute (forme tissu).....	71
Tableau VI.1 : Tableau comparatif des fibres naturelles utilisées dans les composites.....	73
VI.2.2. Résine thermodurcissable (Époxy STR).....	73
VI.2.3 Nanopoudres – Alumine (Al_2O_3) et Titane (TiO_2).....	74
Tableau VI.1 Caractéristiques et rôles des composants.....	75
IV.3 Fabrication du moule en silicone pour la pièce d'enjoliveur.....	75
IV.3.1 Modélisation CAO de la pièce.....	76
IV.3.2 Conversion du modèle 3D en données exploitables.....	76

Sommaire

VI.3.3. Impression 3D du maître-modèle.....	79
IV34 Fabrication du moule en silicone (deux parties).....	80
IV35 Finitions et nettoyage.....	81
Figure 13(b) : Deuxième partie du moule.....	81
VI.4 Réalisation de la pièce enjoliveur automobile.....	82
VI.4.1 Préparation et séchage du tissu de jute.....	82
Figure VI.14: Deuxième partie du moule.....	82
VI.4.2 Préparation de la résine époxy avec les nanopoudres.....	83
VI.4.3 Pesage des constituants de la pièce.....	83
VI.4.4 Imprégnation du tissu de jute.....	84
VI.4.5 Mise en place dans le moule et compression.....	84
VI.4.6 Démoulage et finition.....	85
VI.5 Problèmes rencontrés pendant la fabrication et solutions apportées.....	86
VI.6 Tests de qualité et contrôle de la conformité du produit.....	87
VI.6.1. Réalisation des plaques de test de l'enjoliveur (jute/ résines).....	87
VI.6.1.2 Pesage des échantillons du biocomposite.....	90
VI.6.1.3 Découpage des éprouvettes.....	90
VI.7 Essais de caractérisation mécaniques.....	91
VI.7.1 Essai de traction.....	91
VI.7.2 Essai de flexion trois points.....	93
Chapitre V.....	Erreur ! Signet non défini.
Résultats et discussions des courbes.....	Erreur ! Signet non défini.
V.1. Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
V.2. Analyse des courbes contrainte-déformation de bio composite.....	Erreur ! Signet non défini.
Rôle des nanopoudres dans le renforcement des bio-composites.....	101
Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
Analyse comparative des formulations.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion Générale.....	108

Sommaire

Introduction Générale

Introduction Générale

L'industrie automobile contemporaine fait face à des exigences croissantes en matière de durabilité, d'allègement des véhicules et de réduction des émissions polluantes. Dans ce contexte, les matériaux composites — notamment les biocomposites — se présentent comme des solutions innovantes, conjuguant **légèreté, performance mécanique et respect de l'environnement**.

Parmi ces matériaux émergents, les **biocomposites à base de fibres naturelles** (comme le jute) associées à une matrice polymère (telle que la résine époxy) offrent un excellent compromis entre **propriétés techniques et impact environnemental réduit**. Leur potentiel est particulièrement intéressant pour des pièces non-structurales ou semi-structurales dans l'automobile, telles que les enjoliveurs de roue, qui doivent répondre à des critères de rigidité, de tenue dans le temps et d'esthétique.

Cependant, l'intégration de tels matériaux soulève plusieurs défis techniques : variabilité des fibres naturelles, adhésion fibre/matrice, procédés de mise en œuvre, et compatibilité avec les exigences industrielles. Dès lors, la problématique suivante se pose :

Comment concevoir, simuler et fabriquer un enjoliveur automobile en biocomposite jute/époxy, tout en répondant aux exigences techniques, esthétiques et environnementales de l'industrie automobile ?

Afin de répondre à cette problématique, ce travail de fin d'études vise à :

- Sélectionner un matériau biocomposite approprié, tenant compte des propriétés mécaniques et écologiques ;
- Concevoir un enjoliveur automobile via la CAO en intégrant les spécificités du matériau ;
- Simuler son comportement mécanique à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis
- Réaliser un prototype par moulage et en évaluer les performances.

La méthodologie adoptée repose sur une approche pluridisciplinaire combinant : revue bibliographique, conception sur SolidWorks, simulation, et réalisation physique du prototype par moulage par compression.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le **chapitre 1** présente un état de l'art des matériaux composites et biocomposites dans l'automobile ;
- Le **chapitre 2** détaille la conception assistée par ordinateur de l'enjoliveur ;
- Le **chapitre 3** présente la simulation numérique du comportement mécanique ;
- Le **chapitre 4** traite le procédé de fabrication retenu (moulage par compression) ;
- Le **chapitre 5** analyse les résultats obtenus, les performances du prototype et son impact environnemental. Et à la fin une conclusion générale

Ce projet s'inscrit dans une démarche de **conception durable**, contribuant à l'adoption de matériaux alternatifs pour une industrie automobile plus responsable.

Chapitre I
Matériaux Composites et Biocomposites
dans l'Industrie Automobile

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

I.1 Introduction

Les matériaux composites représentent aujourd'hui une révolution technologique majeure dans l'industrie automobile, offrant des solutions innovantes pour répondre aux défis contemporains de réduction de poids, d'amélioration des performances et de respect de l'environnement. Cette transformation s'inscrit dans un contexte où les constructeurs automobiles doivent impérativement réduire les émissions de CO₂ de leurs véhicules pour respecter les nouvelles réglementations européennes fixant un objectif de 95 g de CO₂/km d'ici 2020 [1].

L'intégration des matériaux composites et biocomposites dans les véhicules modernes, incluant des applications spécialisées comme les enjoliveurs, nécessite une maîtrise approfondie des techniques de mise en œuvre adaptées aux contraintes de production de masse [1]. Les biocomposites, utilisant des fibres naturelles comme le lin ou le chanvre, émergent comme une alternative prometteuse aux composites traditionnels, combinant performances mécaniques et durabilité environnementale [4].

Cette évolution technologique s'accompagne d'innovations dans les procédés de fabrication, permettant d'atteindre les cadences de production nécessaires à l'industrie automobile tout en préservant la qualité et la fiabilité des composants.

I.2 Fondements et Caractéristiques des Matériaux Composites

I.2.1 Définition et Structure des Matériaux Composites

Un matériau composite se définit comme un assemblage hétérogène d'au moins deux composants non miscibles, dont les propriétés résultantes surpassent celles des matériaux constituants pris individuellement [1].

Cette synergie résulte de la combinaison optimisée d'une matrice, généralement organique constituée de polyesters ou de résines, et d'un renfort sous forme de fibres qui peuvent être en verre, en carbone, en Kevlar ou d'origine végétale [10]. L'architecture de ces matériaux permet une distribution optimale des contraintes mécaniques, où la matrice assure la protection des fibres contre la dégradation environnementale et les dommages mécaniques, tout en transférant efficacement les charges appliquées [5].

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

La technologie moderne a permis de mieux comprendre le fonctionnement et la fabrication de ces assemblages, ouvrant la voie à des applications industrielles sophistiquées dans des secteurs exigeants comme l'automobile, l'aéronautique et les équipements sportifs [8].

I. 2. 2. Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériaux renforçant.

En général, le renfort se présente sous forme de fibres continues ou discontinues. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

Ce sont les matériaux composites à renfort fibre longue continue qui généralement utilisés dans l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort, sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont : [1].

- le gain de masse,
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- l'absence de corrosion,
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- l'insensibilités à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, pétroles,...),
- tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- très forte anisotropie.

I. 3. CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES

Un matériau composite pris au sens adopté dans notre travail est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres.

La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

I.3.1 Renforts

Les renforts confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture et la dureté.....etc. Les matériaux en forme de fibre sont plus résistants à la rupture qu'en forme massive car la taille des défauts dans le matériau est limitée par le diamètre faible [2]. . Dans une matrice renforcée de fibres, la résistance mécanique est assurée par les fibres de renfort. Par sa nature filamenteuse empêche la rupture catastrophique de la structure, la rupture de quelques fibres à pour résultat la redistribution du chargement sur les autres fibres. Les types de renforts les plus souvent rencontrés dans les composites sont donnés dans la figure (I.1)

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

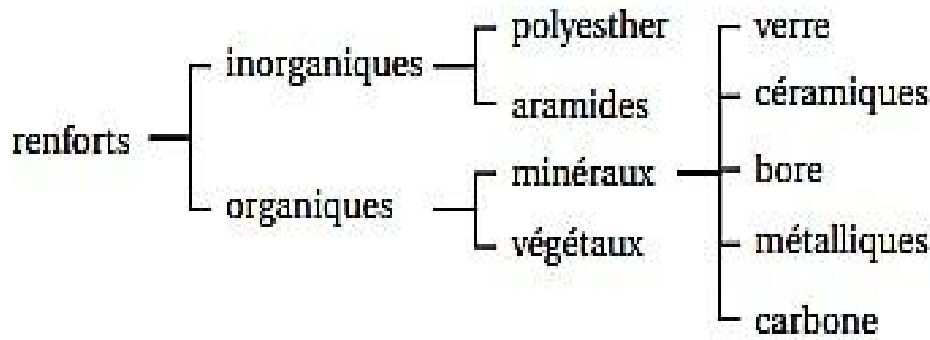


Figure I.1 : Différents types de renfort de base [8].

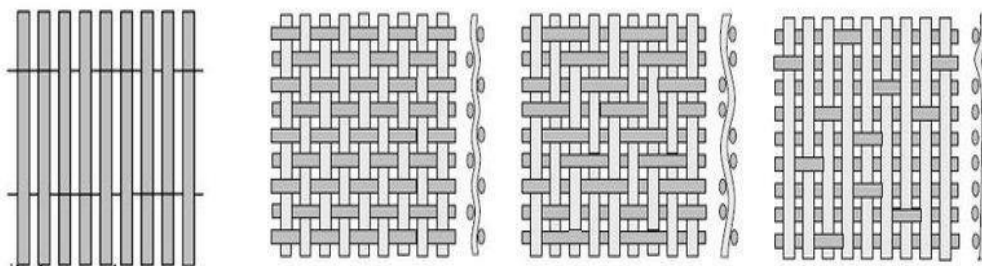
1.3.1.1 Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ». [1]

1.3.1.2 Renfort continu

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre [1]. Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts (Figure I.2):

- Unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D),
- Tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).



(a) Armure unidirectionnel (b) Armure taffetas (c) Armure sergé (d) Armure satin

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Figure I.2 : Différentes formes de renforts continus. [6].

I. 3. 2. Matrice : [8]

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une *résine polymère*. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à *matrice métallique*, *céramique* ou *carbone* sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteints. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (I. 3).

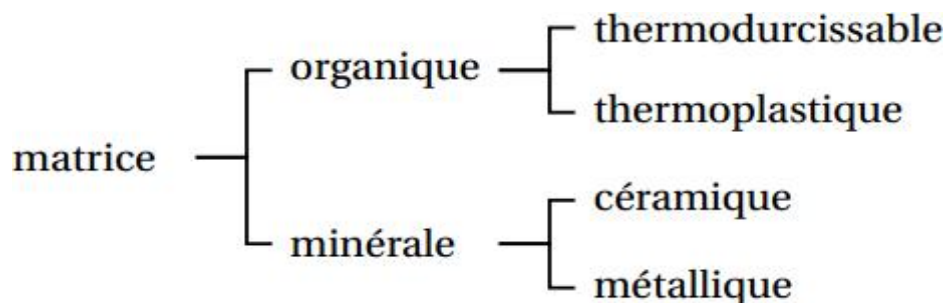


Figure I.3 : Différents types de matrice [8].

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Compte tenu de ces contraintes, les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc.

Les résines sont livrées en solution, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées.

Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du prépolymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle.

Deux grandes familles de résines polymères existent : *les résines thermoplastiques* et *les résines thermodurcissables*.

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.

I.4 Matériaux composites structuraux

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

I.4.1 Monocouches

Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes [8].

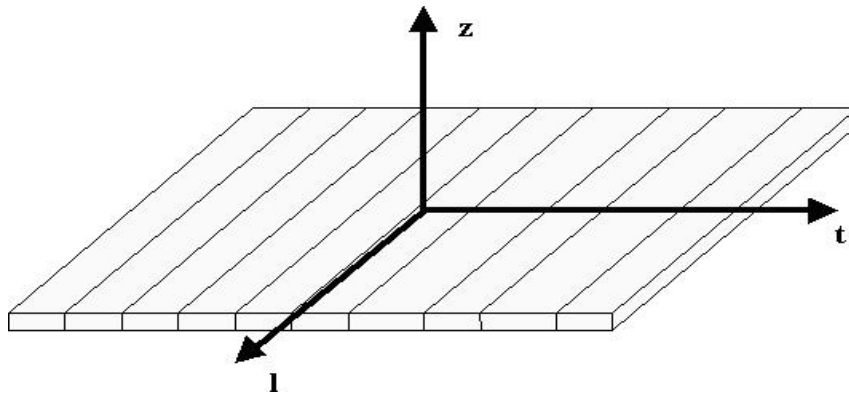


Figure I.4 : Composite monocouche. [8]

I.4.2 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. En jouant sur l'ordre et l'orientation de ces couches. Il est possible d'adapter finement les propriétés mécaniques du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

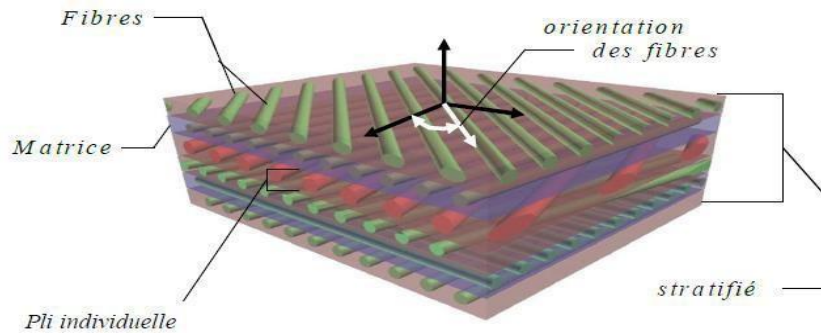


Figure I.5 : composite stratifié. [8]

I.4.3 Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

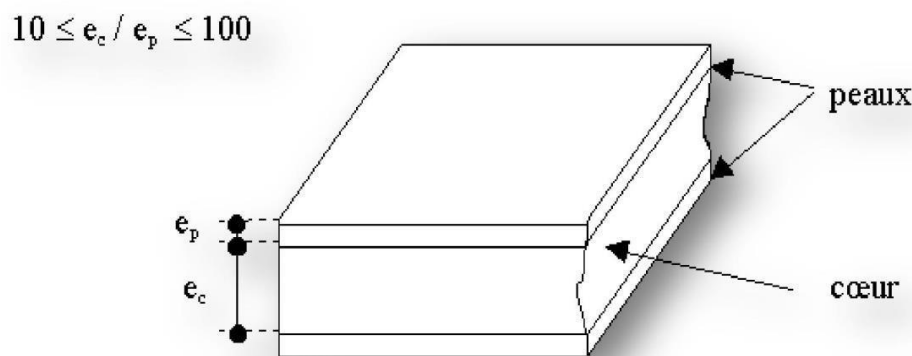


Figure I.6 : Composite sandwichs. [8]

I.5 Avantages Intrinsèques des Composites pour l'Automobile

Les matériaux composites présentent des caractéristiques exceptionnelles particulièrement adaptées aux exigences de l'industrie automobile moderne. Leur faible densité, comprise entre 1 et 2 g/cm³, comparée à celle de l'acier (7,8 g/cm³) ou de l'aluminium (2,7 g/cm³), offre une opportunité remarquable d'allègement permettant de réduire le poids des véhicules de 30 à 50% lors du remplacement de pièces métalliques [1]. .

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Cette réduction de masse contribue directement à la diminution de la consommation de carburant et des émissions polluantes, répondant ainsi aux préoccupations environnementales croissantes.

Au-delà de l'allègement, les composites démontrent une excellente résistance à la corrosion, un comportement acoustique favorable et un très bon comportement aux chocs grâce à leur capacité d'absorption progressive d'énergie lors d'impacts [6]. Cette propriété d'endommagement progressif participe significativement à l'amélioration de la sécurité des véhicules, transformant un apparent inconvénient en avantage majeur pour la protection des occupants[7].

I.6 Évolution et Innovation dans les Composites Automobiles

L'industrie automobile a progressivement intégré les matériaux composites dans ses structures, passant d'applications limitées à des utilisations généralisées représentant plus de 30 000 tonnes de matières plastiques et composites utilisées annuellement pour la fabrication de pièces de carrosserie[1]. .

Cette évolution s'illustre par des exemples emblématiques comme l'Alfa Romeo C4, entièrement composite, qui ne pèse que 895 kg grâce à l'utilisation de fibres de carbone pour le châssis et de fibres de carbone et de verre pour la carrosserie. .

De même, la nouvelle BMW Série 7 intègre une grande partie de sa structure supérieure en fibre de carbone, contribuant à l'abaissement du centre de gravité tout en maintenant une rigidité et une résistance optimales[6]. . Ces innovations démontrent que les constructeurs automobiles orientent désormais leurs efforts vers l'intégration systématique des composites dans les structures véhiculaires et l'utilisation croissante des bio-composites [7]. .

I.7 Biocomposites : Une Alternative Durable

I.7.1 Composition et Propriétés des Biocomposites

Les biocomposites représentent une évolution naturelle des matériaux composites traditionnels, intégrant des fibres d'origine biologique comme renfort dans une matrice polymère [3]. .

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Ces matériaux utilisent principalement des fibres végétales telles que le lin, le chanvre, le jute, le coton, ou encore des fibres issues de déchets de transformation agricole, offrant une alternative écologique aux fibres synthétiques [4]. .

La caractéristique distinctive de ces fibres naturelles réside dans leur faible densité - le lin présente une densité de 1,4 g/cm³ contre 2,5 g/cm³ pour la fibre de verre - permettant une réduction drastique du poids des composites finaux [2]. Cette propriété, combinée à des modules d'élasticité compris entre 31,4 et 68,2 GPa pour le lin, confère aux biocomposites des performances mécaniques remarquables tout en maintenant un impact environnemental réduit[8].

Les biocomposites présentent également d'excellentes propriétés d'isolation phonique et thermique grâce à leur structure creuse et microporeuse, ajoutant une valeur fonctionnelle supplémentaire aux applications automobiles[8].

I.7.2 Classification des fibres naturelles

Comme leur nom l'indique, les renforts d'origine naturelle sont des matériaux renouvelables, neutres en CO₂, pouvant fournir des propriétés de renfort dans les composites et/ou agir comme charges pour réduire la consommation de matière pétrochimique en matières plastiques de base.[11]

En général, les fibres naturelles sont classées en trois grands groupes selon leur origine (Figure I.7) :

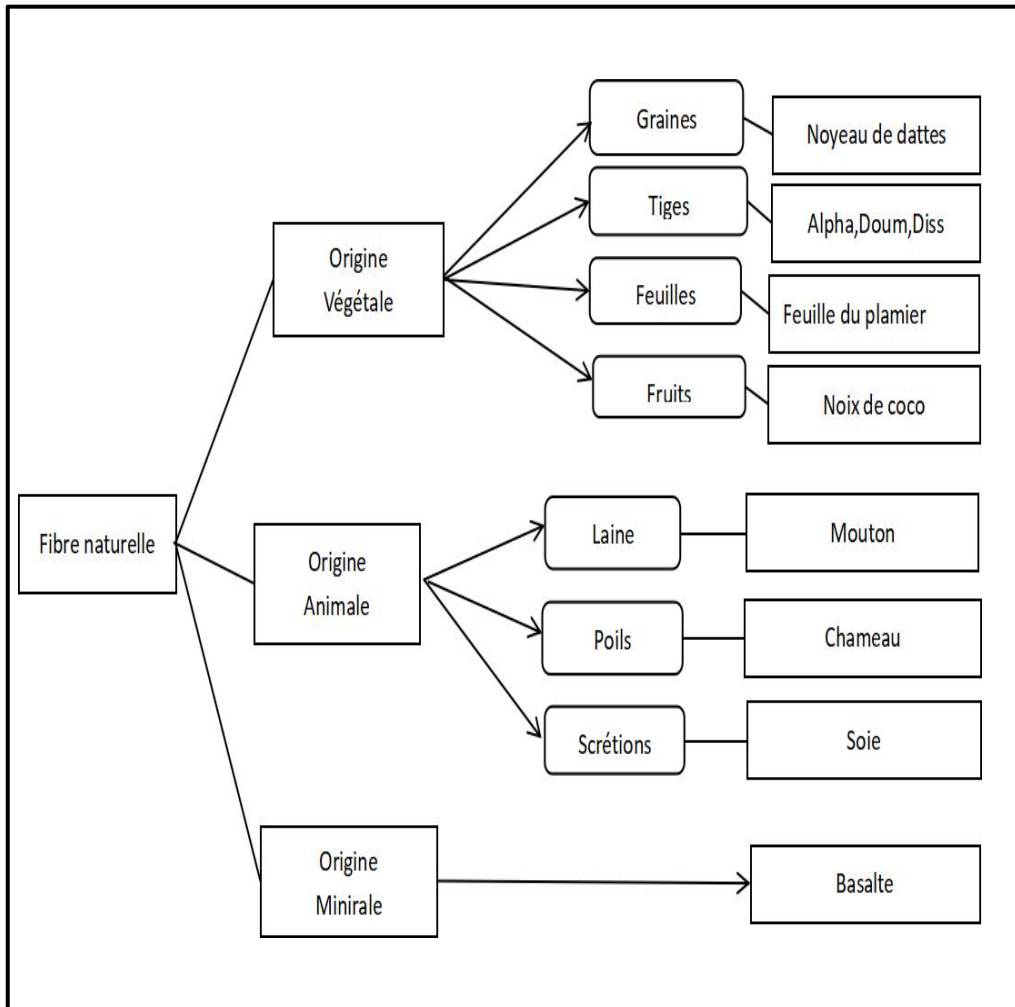


Figure I.7 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine [11,12]

I.7.2 Structure de la fibre végétale

La fibre végétale elle-même est une sorte de matériau composite, le renforcement comprend une couche de microfibrilles de cellulose partiellement cristallines. Ce dernier est revêtu une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) associée à se lie à la lignine via des liaisons hydrogène et covalentes.

Les fibres végétales sont constituées de plusieurs parois parallèles à l'axe des fibres et empilés radialement. Ces différentes couches forment une lame médiane, une paroi primaire et une paroi secondaire sont formées telle que montrer sur la figure I.8 : les microfibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

augmente, le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augment.

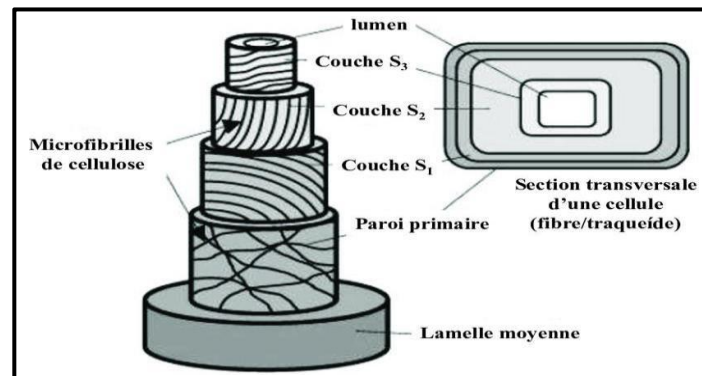


Figure I.8: Structure tridimensionnelle de la paroi d'une cellule de fibre [13].

I.7.4 Composition chimiques des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale, elles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Dans une proportion beaucoup plus faible, elles peuvent contenir également de la pectine et des substances cireuses constituées de différents types d'alcools et de plusieurs acides (acide palmitique, acide stéarique, acide oléagineux).

➤ Cellulose

La cellulose est la molécule organique la plus abondante ($C_6H_{10}O_5$) que l'on trouve dans la nature, la proportion en cellulose dans les fibres détermine en grande partie les propriétés, le coût de leurs productions, et les choix d'application de ces dernières. La cellulose est aussi utilisée pour fabriquer des dérivés cellulosiques sous forme d'éthers ou d'esters qui nécessitent de la dissoudre préalablement avant d'effectuer des réactions chimiques. La teneur en cellulose varie selon l'espèce végétale par exemple : le coton contient 82,7% de cellulose contre 65,8% pour les fibres de sisal et 64,4% pour le jute. La cristallinité de la cellulose conférée par la stabilité spatiale des unités de cellobiose et la cohésion de la structure par des liaisons hydrogène inter caténales assurent une certaine rigidité aux fibres végétales. La partie amorphe

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

apporte à la paroi son caractère élastique. La cellulose existe sous diverses formes appelées allomorphes, ces formes diffèrent par leurs propriétés physiques et chimiques[14]. .

➤ **Hémicelluloses**

Les hémicelluloses $C_3H_4O_2$ représentent après la cellulose, le polysaccharide le plus abondant dans la nature. Les hémicelluloses regroupent tous les polysaccharides qui ne sont ni cellulosiques, ni pectiques présents dans la paroi cellulaire végétale. Les hémicelluloses sont formées d'un enchaînement de monosaccharides pouvant être constitué d'un seul type de monomères ou de plusieurs types de monomères à l'origine de sa grande diversité structurale[15]. .

➤ **Lignines**

Après la cellulose, les lignines constituent la structure macromoléculaire amorphe la plus abondante chez les végétaux : elles représentent 20% à 32% de la matière sèche du bois. Les lignines assurent ainsi la cohésion des éléments botaniques des parois cellulaires formant le ciment du tissu pariétal fibreux. De nature hydrophobe, les lignines imperméabilisent les plantes aidant ainsi à la conservation de l'humidité chez ces dernières en limitant la transpiration de la plante. [16].

➤ **Pectines**

Les pectines désignent un groupe d'hétéropolysaccharides, constituants essentiels de la paroi primaire et de la lamelle mitoyenne des végétaux supérieurs. Elles sont pratiquement absentes des parois secondaires, leurs fonctions sont très diverses au cours du développement et de la croissance des végétaux. Les pectines régulent également la porosité, l'hydratation, la charge ionique des parois et participent à l'expansion, la morphogenèse, l'adhésion et aux mécanismes de défense des cellules. Une grande variabilité de la teneur en pectines est observée suivant l'élément lignocellulosique [16]. .

➤ **Extractibles**

Ce sont des molécules de faible masse molaire représentant 2 à 5% de la masse sèche des bois et sont principalement solubles dans l'eau ou des solvants organiques. La composition en

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur, l'odeur et la valeur d'un bois. Les composés extractibles incluent des tannins, des pectines, des sucres et d'autres composés, et une extraction à l'eau à température ambiante permet de mettre en solution principalement des hémicelluloses, des pectines, des sucres libres et des tannins hydrolysables. Le tableau suivant donne la composition de quelques fibres naturelles [17]. .

Tableau I.1: Composition chimique de quelques plantes à fibres naturelles [17].

Types de fibre	cellulose	hémicellulose	Lignine
Cotton	82.7	5.7	-
Jute	64.4	12.0	11.8
Zoster	57	28	5
Ramie	68.6	13.1	0.6
Sisal	65.8	12.0	9.9
Chanvre	57-77	14-17	9-13
Kénafe (écorce)	44-60.8	20.3-23	10-19
Kénafe (bois)	37-49	18-24	15-21
Résineux	48.0	15.0	25.3

I.7.5 Caractéristique des fibres naturelles

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Par ailleurs, elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité (tableau I.2).

Comparativement aux fibres de verre, les fibres végétales sont de bons candidats comme renforts pour des polymères en raison de leur faible densité, faible cout, faible impact sur l'environnement et leur grande variété. D'autre part, ils ont de bonnes propriétés acoustiques (résistance à la vibration) et offrent une excellente isolation thermique et acoustique [18].

Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres naturelles [18]. .

Fibres	Densité (g/cm ³)	Allongement (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Abaca	1,5	3,4	12	41
Alfa	0,89	5,8	350	22

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Bambou	1,5		575	27
Chanvre	1,45	3	530	45
Coco	1,25	27,5	140,5	6
Coton	1,5-1,6	07-08	287-597	5,5-12,6
Diss	1,3	12,45-18,41	122-316,8	3,5
Jute	1,4	2,5	325	37,5
Kénaif	1,31		743	60
Lin	1,45	2,3	700	61,4-128
Ramie	1,55	3,7	915	23

I.7.6 Extraction des fibres végétales

Avant l'incorporation des fibres dans la matrice, les fibres végétales doivent être généralement extraites des plantes les renfermant. Le procédé dépend de la localisation des fibres dans la plante et de l'objectif visé. A titre d'exemple, les fibres techniques de lin et de chanvre se trouvent entre l'écorce et le bois de la tige soit, dans la partie corticale. Lors de cette seconde étape, après battage des fibres rouies, des granulats, des fibres courtes, des fibres longues sont obtenues, ces dernières démêlées lors du peignage. Processus de séparation des fibres du reste de la plante est composé de trois étapes comme montré sur la figure I.9 :

- la décortication, consiste à désolidariser la biomasse des tiges, en général par une opération mécanique.
- la séparation, vise à séparer les différentes fractions végétales obtenues.
- l'affinage, permet la réduction du nombre de fibres unitaires par faisceau jusqu'à l'obtention de fibres élémentaires

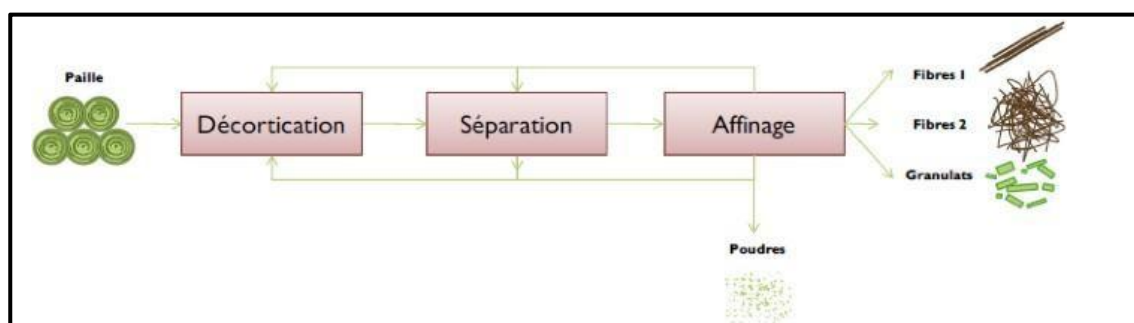


Figure I.9: Processus d'extraction des fibres végétale[19].

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Suivant l'architecture des fibres recherchée, ces dernières, une fois extraites peuvent subir de nouveaux processus de mise en forme comme : le tissage, le tressage, le tricotage, la fabrication de non-tissé [20].

I.7.7 Fibres végétales en Algérie

L'Algérie est un pays très riche en plantes végétales, elles sont dispersées sur tout le territoire national (figure I.10), on les trouve dans les régions côtières beaucoup plus que les régions intérieures du pays. Les fibres naturelles sont présentes en masse dans les régions à climat tempéré ou semi arides. Nous retrouvons ce climat propice à cette végétation en Algérie dans les hauts plateaux ainsi que le nord avec un climat méditerranéen. Ces fibres généralement sauvages ne nécessitent pas de grandes attentions et résistent par leurs natures aux conditions extrêmes, ce qui implique une récolte conséquente sans grands moyens investis dessus.

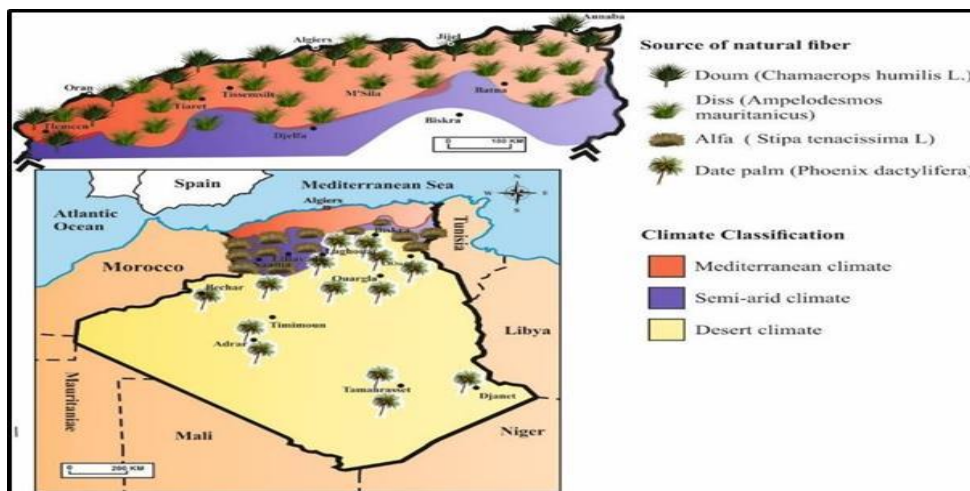


Figure I.10 : Carte de la distribution des plantes de fibres naturelles en Algérie [17].

I.7.8 Avantages des matériaux composites à fibres naturelles par rapport aux matériaux traditionnels

Malgré leurs très grandes différences en termes de propriétés mécaniques, les fibres naturelles sont intéressantes comme renfort dans un matériau composite. Il est certain que les fibres naturelles n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques que les fibres artificielles. Il n'en demeure pas moins que dans certaines applications spécifiques, comme en flexion ou en traction dans le cas pour des patios ou des poutres en composites utilisées dans les bancs de parc, elles sont intéressantes[21]. Les Tableaux (1 à 3) présentent quelques caractéristiques de ces

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

fibres[22][23][24]. Néanmoins, les fibres naturelles se défendent très bien et peuvent même rivaliser avec les fibres artificielles. Le Tableau (I.4) résume assez bien les avantages de chaque type de fibre.

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques des quelques fibres artificielles [22]

Type de fibre	Module de traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)
Kevlar 29	2700	59	1,44
Kevlar 49	2900	127	1,45
Fibre de carbone I	2000	400	1,95
Fibre de carbone II	2600	260	1,75
Fibre de verre	2500	70	2,60
Acier	4000	200	7,80

Tableau I.4 : Propriétés mécaniques de différentes fibres[23]

Fibre	Masse volumique (g/cm ³)	Diamètre (µm)	Module de traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Élongation à la rupture (%)
Jute	1,3 - 1,45	20 - 200	393 - 773	13 - 26,5	7,1 - 8
Lin	1,5 - 3	-	45 - 1100	27,6	2,7 - 3,2
Chanvre	-	-	690	-	1,6
Ramie	1,5	-	400 - 938	61,4 - 128	1,2 - 3,8
Sisal	1,45	50 - 200	468 - 640	9,4 - 22	3,1 - 7
Palme	-	20 - 80	413 - 1627	34,5 - 82,51	1,6
Coton	1,5 - 1,6	-	287 - 800	5,5 - 12,6	7,1 - 8
Coir	1,15	100 - 450	131 - 175	4,1 - 6	15 - 40
Fibre de verre	2,5	-	2000 - 3500	70	2,5
Fibre d'acier	2,5	-	4570	86	2,8
Aramide	1,4	-	3000 - 3150	63 - 67	3,3 - 3,7
Fibre de carbone	1,7	-	4000	230 - 240	1,4 - 1,8

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Tableau I.5: Comparaison entre fibre naturelle et fibre de verre [24]

	Fibre Naturelle	Fibre de verre
Masse volumique	Faible	Le double des fibres naturelles
Coût	Faible	Faible mais plus élevé que les fibres naturelles
Renouvelabilité	Oui	Non
Recyclabilité	Oui	Non
Dépense d'énergie	Faible	Élevé
Distribution	Large	Large
Carbone - neutre	Oui	Non
Abrasion des machines	Non	Oui
Risque à la santé	Non	Oui
Biodégradable	Non	Oui

En résumé, les fibres naturelles sont moins dispendieuses et sont moins dommageables pour l'environnement que les fibres artificielles[25]. D'un point de vue purement mécanique, les fibres artificielles sont intéressantes puisque leurs propriétés en flexion, en traction et en impact sont pratiquement toujours supérieures aux autres fibres.

Cependant, dans certaines applications, comme en emballage, le but est d'avoir un matériau assez résistant mais pas nécessairement le meilleur; i.e. d'avoir des propriétés mécaniques suffisantes tout en réduisant les coûts. C'est dans ce domaine que les fibres naturelles peuvent être beaucoup plus intéressantes que les fibres artificielles, puisqu'elles sont moins dispendieuses.

Il y a également tous les aspects environnementaux dont il faut tenir compte. Les fibres naturelles ont habituellement un bilan net de CO2 moins important que les fibres artificielles[25]. Elles consomment moins d'énergie, sont biodégradables et endommagent habituellement moins les appareils de mise en forme que la fibre de verre ou de carbone[26].

Un dernier point de comparaison est la densité des fibres naturelles habituellement plus faible que celle des fibres artificielles. Ce facteur pourrait être un élément clé dans le domaine du transport, où la réduction de poids signifie une réduction de coût énergétique, donc une économie d'argent

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

I.8 Applications et Développements des Biocomposites dans l'Automobile

L'utilisation des biocomposites dans l'industrie automobile connaît une croissance significative, motivée par les objectifs d'allègement et de réduction de l'empreinte carbone[10]. Ford, pionnier dans ce domaine depuis l'utilisation de fibres de kenaf dans les garnitures de portes de la première génération Mondeo en 1993, intègre désormais au moins 50% de fibres naturelles dans les garnitures de portes de tous ses véhicules[27]. La société automobile américaine incorpore en moyenne 9 à 18 kilogrammes de matériaux biosourcés ou renouvelables par véhicule, incluant des conduites de carburant fabriquées à partir de plastique à base d'huile de ricin[28]. Des développements remarquables incluent le cadre de toit ouvrant produit par IAC en 2017, composé à 70% de fibres de chanvre et de kenaf, pesant 50% de moins qu'un cadre métallique équivalent et utilisé sur toutes les Mercedes-Benz Classe E et Classe A[29]. Ces innovations s'étendent également aux applications structurelles avec des projets comme le Flaxpreg développé par Faurecia, Linéo et PSA en 2015, un composite à base de lin utilisé pour les faux-planchers de coffre et les planchers structurels d'habitacle[30].

I.9 Défis et Limitations des Biocomposites

Malgré leurs avantages indéniables, les biocomposites font face à plusieurs défis techniques et économiques qui limitent leur adoption généralisée dans l'industrie automobile. La principale difficulté réside dans l'incompatibilité entre les matrices polymères non polaires couramment utilisées et les fibres végétales hydrophiles composées de cellulose, entraînant une faible mouillabilité et une adhésion fibre/matrice insuffisante[31]. Cette problématique nécessite des traitements de surface des fibres avant la mise en forme des pièces, augmentant la complexité et les coûts de production[32]. Les propriétés variables des fibres en fonction de leur source et leur caractère hydrophile, pouvant entraîner l'absorption d'importantes quantités d'eau, constituent des défis supplémentaires pour les applications automobiles[33]. La résistance limitée aux hautes températures, restreignant la mise en œuvre à un maximum d'environ 200°C, limite également le choix des polymères thermoplastiques compatibles aux matériaux à faible point de fusion comme le polyéthylène, le polychlorure de vinyle et le polystyrène[34].

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

I.10 Applications Spécialisées : Les Enjoliveurs en Matériaux Composites

I.10.1 Fonctions et Typologie des Enjoliveurs

Les enjoliveurs, également appelés chapeaux de roue, constituent des éléments accessoires circulaires fixés sur les jantes automobiles, remplissant principalement une fonction esthétique tout en apportant une protection fonctionnelle[35]. Leur rôle principal consiste à masquer les parties moins attrayantes des roues, comme les jantes tôles, tout en protégeant les écrous et les composants du système de freinage contre l'accumulation de poussière, de saleté et de débris[36]. Cette protection contribue à réduire les risques de corrosion et à prolonger la durée de vie des éléments constitutifs du système de freinage[36]. Les enjoliveurs se déclinent en plusieurs typologies selon leur construction : les types ouverts, équipés de larges admissions d'air favorisant la circulation d'air mais offrant une protection limitée, et les types fermés, pouvant présenter de petites ouvertures ou être complètement clos, assurant une meilleure protection contre l'encrassement mais limitant le refroidissement du système de freinage [37].

I.10.2 Matériaux et Innovations dans les Enjoliveurs

La fabrication des enjoliveurs fait appel à une diversité de matériaux, chacun présentant des caractéristiques spécifiques adaptées à différents usages et segments de marché. Le plastique, matériau le plus couramment utilisé, offre l'avantage d'être léger, peu coûteux et inoxydable, avec la capacité pour les plastiques souples de reprendre leur forme après un impact mécanique [35]. Les enjoliveurs métalliques, bien que plus lourds, présentent une durabilité exceptionnelle mais nécessitent une protection contre la corrosion en environnement humide [35]. L'innovation dans ce domaine a conduit au développement d'enjoliveurs spéciaux dotés de fonctionnalités avancées, notamment des designs optimisant le flux d'air autour des roues pour réduire la traînée aérodynamique ou facilitant l'évacuation de la chaleur générée par les systèmes de freinage[36]. Ces enjoliveurs techniques, parfois composés de matériaux haut de gamme comme le carbone ou le titane, trouvent leur application sur les véhicules soumis à des conditions de conduite extrêmes [36].

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

I.10.3 Spécifications Techniques et Marchés des Enjoliveurs

Le marché des enjoliveurs se segmente selon plusieurs critères de qualité et de prix, reflétant la diversité des besoins automobiles. Les enjoliveurs d'entrée de gamme en plastique sont proposés entre 20 et 50 euros par ensemble, tandis que les modèles de milieu de gamme, fabriqués en plastique de qualité supérieure ou en matériaux composites, se situent entre 50 et 100 euros [37]. Les enjoliveurs haut de gamme, intégrant des conceptions avancées et des matériaux résistants avec des fonctionnalités supplémentaires, peuvent atteindre plusieurs centaines d'euros par ensemble [38]. La fabrication moderne privilégie l'utilisation de plastique granulé, offrant une résistance supérieure aux chocs et une meilleure tenue dans le temps comparativement au plastique standard [39]. Les systèmes de fixation évoluent également, proposant des solutions à loquets à ressort pour un montage facile ou des fixations par vis de moyeu plus complexes mais offrant une sécurité accrue [40]. Ces développements technologiques s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue de la fonctionnalité et de la durabilité des enjoliveurs automobiles.

I.11 Techniques de Mise en Œuvre des Composites

I.11.1 Procédés pour Petites et Moyennes Séries

Les techniques de mise en œuvre des matériaux composites varient considérablement selon les volumes de production et les spécifications qualitatives requises. Pour les petites séries, le moulage au contact demeure une technique fondamentale, consistant à déposer successivement des couches de résine et de renfort dans un moule, suivies d'opérations de débullage pour éliminer l'air emprisonné[41]. Cette méthode artisanale, bien qu'adaptée aux prototypes et aux faibles volumes, présente des limitations en termes de cadence et de reproductibilité[42]. La projection simultanée offre une alternative pour les moyennes séries, projetant simultanément les fibres de verre coupées et la résine sur le moule, nécessitant ensuite un travail manuel de compactage et de débullage [43]. Le moulage sous vide améliore significativement la qualité des pièces en appliquant une dépression pour éliminer l'excès de résine et les bulles d'air, renforçant la résistance du composite et réduisant la porosité [44]. Ces procédés, bien que

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

moins automatisés, permettent d'obtenir des pièces de qualité pour des applications spécialisées nécessitant des géométries complexes ou des séries limitées.

I.11.2 Technologies Avancées pour la Production de Masse

L'industrie automobile exige des procédés de mise en œuvre capables de répondre aux contraintes de production de masse tout en maintenant une qualité constante. Le moulage par transfert de résine (RTM) constitue une technologie de référence, utilisant un moule fermé dans lequel les préformes fibreuses sont imprégnées de résine sous pression, créant des surfaces propres des deux côtés du composant [45]. Cette technique permet d'atteindre des standards de qualité de surface très élevés grâce à des pressions supérieures à la pression atmosphérique et des temps de cycle courts indispensables à la production automobile [46]. Les procédés de compression à chaud, utilisant des semi-produits comme le SMC (Sheet Molding Compound) ou le BMC (Bulk Molding Compound), permettent d'atteindre des cadences de moulage élevées adaptées aux très grandes séries. L'injection de prémix représente l'aboutissement de cette recherche d'automatisation, injectant les matériaux composites sous forte pression et à grande vitesse dans des moules fermés, permettant de satisfaire aux exigences économiques de la très grande série avec plus de 100 000 pièces par an [47].

I.11.3 Innovations et Procédés Spécialisés

Le développement de techniques spécialisées répond aux besoins croissants de performance et de personnalisation dans l'industrie automobile. Le drapage de préimprégnés utilise des feuilles de fibres pré-imprégnées avec un rapport résine/fibre précis, nécessitant des conditions de polymérisation contrôlées en autoclave pour obtenir des propriétés mécaniques supérieures [48]. Cette technique, largement utilisée dans l'aéronautique, trouve des applications croissantes dans l'automobile haut de gamme. Le moulage par transfert de résine assisté par vide (VARTM) fait passer la résine à travers les couches sèches de fibres sous l'effet d'une pression de vide, assurant un mouillage complet et réduisant l'excès de résine [49]. Les technologies comme la pultrusion permettent la production continue de profilés composites, ouvrant de nouvelles perspectives pour les applications structurelles automobiles. Le choix de ces procédés dépend naturellement du niveau de qualité attendu et du nombre de pièces à produire, mais également de la taille et de la géométrie des pièces, nécessitant une sélection du procédé très en amont lors de la conception[49].

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

I.12 Perspectives et Enjeux Futurs

L'avenir des matériaux composites dans l'industrie automobile s'oriente vers une intégration plus poussée dans les véhicules électriques et autonomes, où leurs propriétés uniques répondent à des défis spécifiques. La réduction substantielle de poids nécessaire pour compenser le poids des batteries dans les véhicules électriques fait des composites des matériaux indispensables, permettant des structures plus minces et plus légères[50].

L'intégration de capteurs pour les fonctions de conduite autonome directement dans les pièces composites pendant la fabrication constitue un avantage clé par rapport aux métaux. Les constructeurs allemands ont misé sur le développement des composites à matrice thermodurcissable tandis que les constructeurs français se tournent vers les composites à matrice thermoplastique, illustrant la diversité des approches technologiques. Cette diversification s'accompagne d'innovations dans les procédés de fabrication, notamment le développement de résines matrices spécialement conçues pour le RTM avec des temps de cycle courts indispensables à la production automobile de masse[51].

I.13 Défis Économiques et Environnementaux

Les matériaux composites doivent surmonter plusieurs défis pour une adoption généralisée dans l'automobile de masse. Le coût au kilogramme reste supérieur à celui des matériaux métalliques traditionnels, nécessitant une compensation par les gains en allègement et en performances[47]. La recyclabilité constitue un enjeu majeur, particulièrement pour les composites thermodurcissables dont la structure réticulée complique le recyclage en fin de vie[33].

Les biocomposites offrent une réponse partielle à ces préoccupations environnementales, étant potentiellement biodégradables et issus de ressources renouvelables[39]. L'industrie automobile doit également adapter ses chaînes de production aux spécificités des composites, nécessitant des investissements en équipements spécialisés et en formation du personnel. Ces transformations s'inscrivent dans une démarche globale de durabilité, où les matériaux

Chapitre I

Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

composites contribuent à réduire l'empreinte carbone des véhicules sur l'ensemble de leur cycle de vie[48].

I.14 Conclusion

Les matériaux composites et biocomposites représentent une révolution technologique majeure pour l'industrie automobile, offrant des solutions innovantes aux défis contemporains d'allègement, de performance et de durabilité environnementale. Leur intégration croissante dans les véhicules modernes, des applications esthétiques comme les enjoliveurs aux composants structurels critiques, démontre leur polyvalence et leur potentiel d'innovation.

Les techniques de mise en œuvre ont évolué pour répondre aux exigences de production de masse tout en maintenant des standards de qualité élevés, depuis les procédés artisanaux pour les petites séries jusqu'aux technologies automatisées comme le RTM pour la grande série. Les biocomposites émergent comme une alternative prometteuse, combinant performances mécaniques et respect de l'environnement grâce à l'utilisation de fibres naturelles comme le lin ou le chanvre.

Cependant, des défis persistants en termes de coût, de recyclabilité et d'adaptation des processus industriels nécessitent des innovations continues. L'avenir s'oriente vers une intégration plus poussée dans les véhicules électriques et autonomes, où les propriétés uniques des composites répondent à des besoins spécifiques d'allègement et d'intégration de fonctionnalités avancées. Cette évolution s'inscrit dans une transformation globale de l'industrie automobile vers des solutions plus durables et performantes, positionnant les matériaux composites comme des enablers technologiques essentiels pour la mobilité du futur.

Chapitre I
Matériaux Composites et Biocomposites dans l'Industrie Automobile

Chapitre II
Conception d'enjoliveur automobile en
biocomposite

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

II.1 Introduction

La conception d'un enjoliveur en biocomposite s'inscrit dans une volonté croissante d'intégrer des matériaux innovants et durables au sein de l'industrie automobile. Face aux exigences de légèreté, de performance mécanique et de respect de l'environnement, les biocomposites, et en particulier les composites à base de fibres naturelles comme le jute/époxy, offrent une alternative crédible aux matériaux conventionnels.

L'enjoliveur de roue, bien qu'il s'agisse d'un composant non structurel, remplit plusieurs fonctions essentielles : protection du moyeu, amélioration de l'aérodynamisme, et surtout valorisation esthétique du véhicule. Dès lors, sa conception doit répondre à des contraintes précises en termes de forme, résistance, durabilité et facilité de fabrication.

Ce travail s'articule autour de la conception assistée par ordinateur (CAO) de cet enjoliveur, réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks, et adaptée aux spécificités du matériau biocomposite. La démarche inclut l'élaboration d'une géométrie optimisée, le choix de paramètres adaptés au moulage ou à la fabrication par compression, ainsi que la préparation des données techniques nécessaires à la simulation mécanique et à la production.

En intégrant les propriétés physiques du jute/époxy dès les premières étapes de modélisation, cette approche vise à garantir la cohérence entre conception, performance et faisabilité industrielle, tout en respectant les principes de l'écoconception.

II.2 Présentation de SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) en 2D et 3D, largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie mécanique, du design industriel et de la fabrication.

Il permet de créer des modèles paramétriques précis, de simuler le comportement des pièces et d'assembler plusieurs composants dans un environnement virtuel. Grâce à ses fonctionnalités avancées, SolidWorks facilite le passage du concept initial au produit fini, tout en respectant les contraintes géométriques et fonctionnelles du projet.

II.3 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle d'un enjoliveur automobile révèle un composant dont le rôle

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

dépasse largement la simple esthétique. Bien que principalement conçu pour embellir l'apparence des roues, l'enjoliveur remplit également des fonctions protectrices essentielles contre les éléments extérieurs et, dans certains cas, contribue à l'optimisation aérodynamique et thermique du véhicule. Cette double fonctionnalité esthétique-protectrice s'accompagne d'exigences mécaniques et thermiques spécifiques qui déterminent sa conception, sa durabilité et son efficacité dans diverses conditions d'utilisation.

II.3.1 Définition et Place de l'Enjoliveur dans le Système Véhicule

L'enjoliveur, également appelé "chapeau de roue", est un élément circulaire qui se fixe sur la jante d'une roue de véhicule. Sa position périphérique l'expose directement aux contraintes environnementales et mécaniques lors du roulement. Dans l'architecture globale du véhicule, l'enjoliveur constitue une interface entre l'ensemble roue-pneumatique et l'environnement extérieur.



Figure II.1 : Enjoliveur d'une véhicule

II.3.2 Caractéristiques Générales

Les enjoliveurs se caractérisent par leur diamètre (généralement entre 13 et 17 pouces), leurs systèmes de fixation (crochets ou clips) et leurs matériaux de fabrication (principalement plastique ou métal). Ces caractéristiques influencent directement leur capacité à remplir leurs fonctions principales et secondaires.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

II.3.3 Analyse fonctionnelle principales

La première étape consiste à identifier les fonctions principales et contraintes imposées à l'enjoliveur :

- **FP1** : Protéger le moyeu et les écrous de roue contre les projections extérieures.
- **FP2** : Apporter une valeur esthétique à la roue.
- **FP3** : Contribuer à l'allègement global du véhicule.
- **FC1** : Résister aux contraintes mécaniques (chocs, vibrations, déformations).
- **FC2** : S'adapter aux dimensions normalisées d'une jante à 5 goujons.
- **FC3** : Être facilement montable et démontable sans outil spécial.

II.4 Cahier des charges technique

À partir des fonctions identifiées, un cahier des charges a été rédigé :

Matériau : Biocomposite jute/époxy.

Dimensions : Diamètre total \approx 380 mm ; épaisseur moyenne 2 à 3 mm.

Poids visé : inférieur à 500 g.

Contrainte thermique : résistance jusqu'à 100 °C.

Fixation : maintien par clips sur jante standard.

II.5 Conception 2D de l'enjoliveur (dessin technique)

Avant de passer à la modélisation tridimensionnelle, il est essentiel de définir avec précision la géométrie de base de la pièce à l'aide d'une conception 2D (Figure II.2).

Cette étape permet de tracer les profils nécessaires à la génération des volumes en 3D, en respectant les cotes, les contraintes géométriques et les spécifications techniques de la pièce.

Dans ce projet, les esquisses ont été réalisées sur les plans de référence (face, dessus ou droite) en utilisant les outils d'esquisse proposés par le logiciel SolidWorks, tels que les lignes, arcs, cercles, cotations et contraintes.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

Ces esquisses servent de base à toutes les opérations de modélisation ultérieures (révolution, extrusion, coupe, etc.).

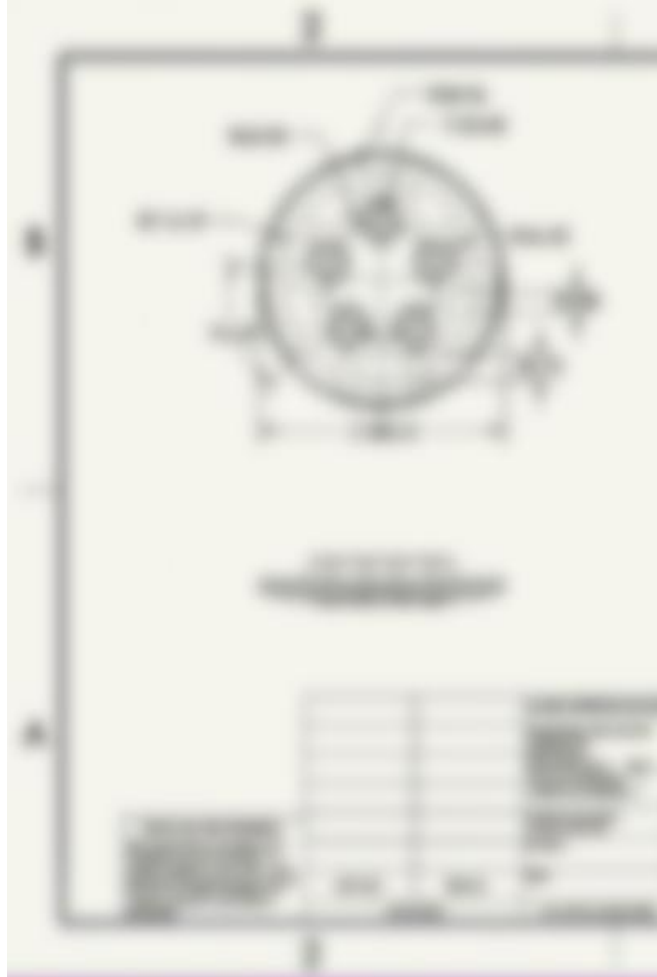


Figure II. 2 : Dessin technique

II.4 Modélisation 3D de la pièce enjoliveur automobile sous SolidWorks

Dans le cadre de ce projet, la modélisation 3D d'un enjoliveur a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks, un outil puissant de conception assistée par ordinateur (CAO).

Cette pièce, utilisée principalement à des fins de protection et d'esthétique, a été conçue de manière précise afin de répondre aux exigences fonctionnelles et géométriques du système.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

La modélisation de l'enjoliveur a été réalisée de manière progressive, en débutant par la création d'un profil 2D, puis en générant le volume principal à l'aide de la fonction de révolution. Par la suite, des fonctions supplémentaires telles que les congés, les coupes et les enlèvements de matière ont été utilisées afin d'aboutir à la forme finale de la pièce.

Les étapes qui suivent décrivent de façon structurée et chronologique le processus complet de modélisation dans SolidWorks.

II.4.1 Définition des cotes

Les dimensions précises sont ajoutées avec l'outil Smart Dimension pour contrôler les rayons, épaisseurs et hauteurs.

II.4.2 Révolution du profil

La modélisation débute par la création d'un profil en 2D sur le plan de face, représentant la section de l'enjoliveur. Ce profil est ensuite revolé à 360° autour d'un axe central à l'aide de la fonction Révolution, ce qui permet de générer le volume de base de la pièce.

Cette opération constitue l'étape fondamentale qui définit la forme globale de l'enjoliveur.

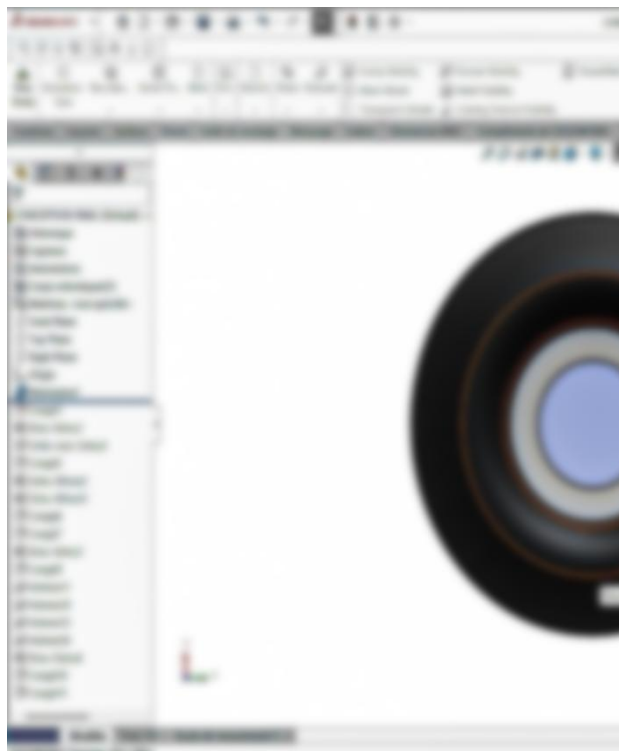


Figure II. 3 : Révolution 1

+++++

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

II.4.3 congés

Après la génération du volume de base, la pièce est affinée par l'application de congés sur les arêtes vives. Cette opération consiste à arrondir les angles afin de réduire les concentrations de contraintes mécaniques, d'améliorer l'esthétique et de faciliter la fabrication.

Les congés sont des éléments cruciaux pour la robustesse et la finition de l'enjoliveur, assurant sa durabilité et sa conformité aux exigences techniques.

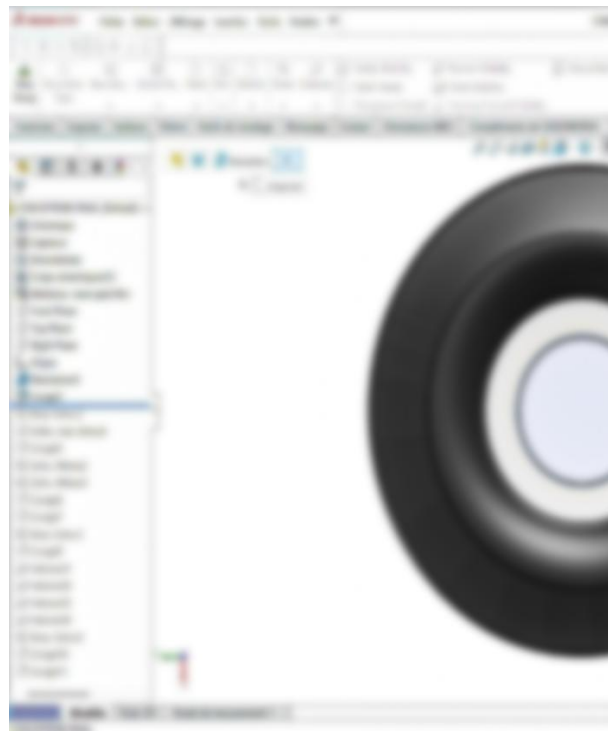


Figure 4 : congé 1

II.4.4 Création des Ailettes par Extrusion et Répétition Circulaire

Après le volume de base, une ailette est modélisée par extrusion (Boss-Extrude). Cette ailette unique est ensuite dupliquée symétriquement autour de l'axe central grâce à la fonction Répétition Circulaire (Motif Circulaire).

Cette opération permet de former rapidement et précisément les éléments répétitifs de la pièce, essentiels à sa fonction et à son équilibre.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

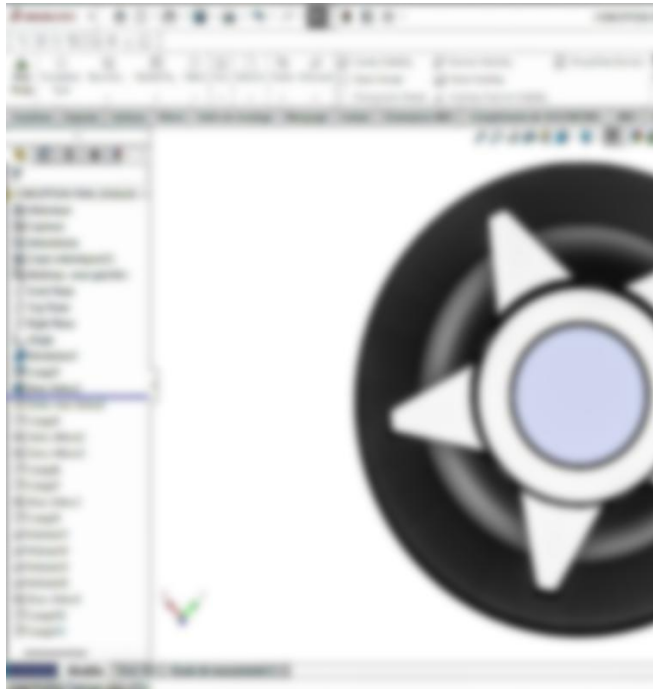


Figure II. 5 : extrusion 1

II.4.5 Réalisation des Motifs et Trous de Fixation

Les découpes et les trous de fixation sont créés par des enlèvements de matière extrudés (Extruded Cut) et répétés circulairement (Motif Circulaire). Cette étape définit les motifs esthétiques et assure la fonctionnalité d'assemblage de l'enjoliveur, complétant sa géométrie finale.

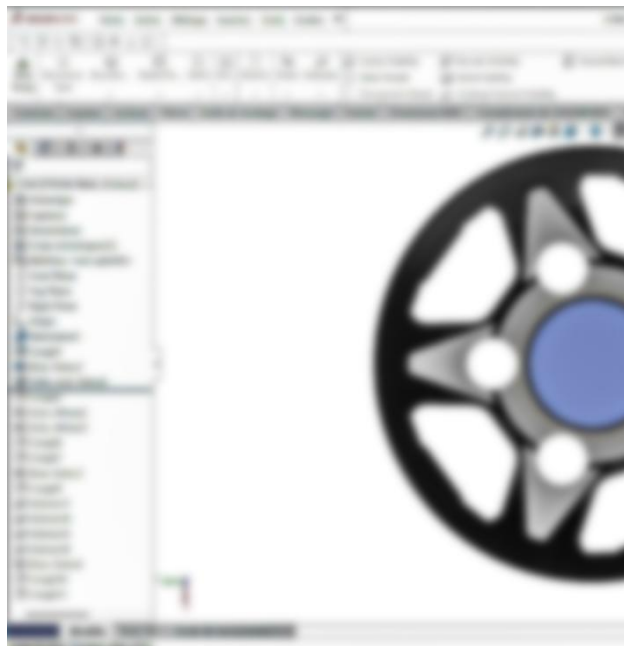


Figure II. 6 : Enlèvement matière, extrusion

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

II.4.6 Achèvement des Motifs Détaillés

Les motifs complexes et évidements sont finalisés par des enlèvements de matière extrudés (Enl. mat. Extru.) incluant des fonctions minces (Extru. Mince).

Cette étape parachève le design esthétique et structurel, optimisant la légèreté de l'enjoliveur.



Figure II. 7 : Extrusion, mince 2

II.4.7 Ajout des Bossages de Fixation

Des bossages cylindriques sont créés par extrusion (Boss-Extrude) autour des trous de fixation.

Ces éléments surélevés renforcent les points de montage et peuvent servir de support pour des capuchons ou des éléments d'assemblage supplémentaires.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

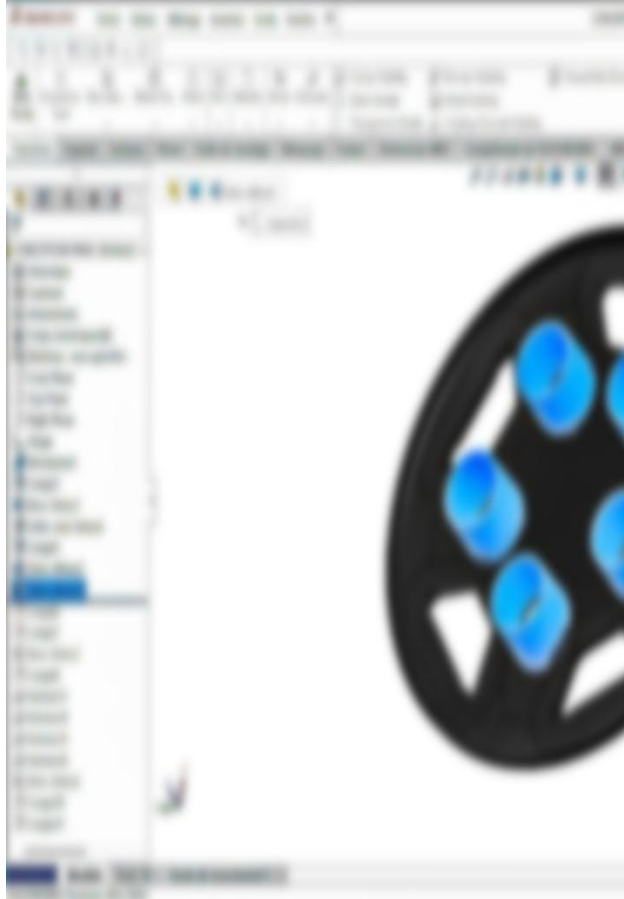


Figure II.8: Extrusion, minces 3

II.4.8 Opérations d'Intersection et de Découpe Finale

Cette étape introduit des opérations complexes, probablement par intersection (Intersect) ou des découpes avancées, pour créer des géométries spécifiques et des fentes sur la surface de l'enjoliveur. Ces actions sont essentielles pour définir la forme finale et les détails fonctionnels ou esthétiques complexes de la pièce.



Figure II. 9 : Intersection 1

II.4.9 Renforcement et Fonctionnalité des Points de Fixation

La création de bossages cylindriques par extrusion (Boss-Extrude) vise à renforcer les zones d'assemblage cruciales. Ces éléments surélevés augmentent la résistance locale aux contraintes et facilitent l'alignement des fixations, assurant ainsi une meilleure durabilité et un montage plus précis de l'enjoliveur.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

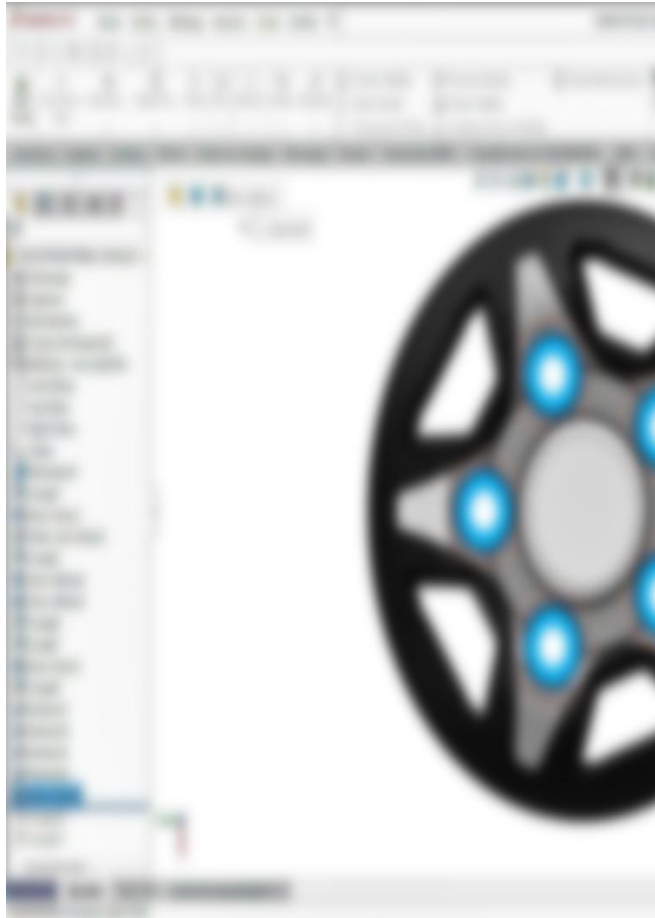


Figure II. 10 : Boss-Extrude 6

La modélisation de l'enjoliveur, illustrée à travers les étapes précédentes, représente une démarche complète de conception paramétrique sous SOLIDWORKS. Partant d'un volume de base généré par révolution, la pièce a été progressivement affinée et détaillée.

Chaque fonction appliquée – de l'ajout des congés pour la robustesse et l'esthétique, à la création des branches principales et des bossages de renfort, en passant par les diverses découpes et motifs complexes – a été intégrée dans une approche méthodique.

Cette séquence de travail démontre l'efficacité des outils de CAO pour :

- Définir précisément la géométrie : Assurant les dimensions exactes et la symétrie requise.
- Intégrer les fonctionnalités : Telles que les points de fixation et les passages d'air.
- Optimiser la fabricabilité : En prévoyant les congés pour l'usinage ou le moulage, et en gérant les épaisseurs.

Chapitre II

Conception d'enjoliveur automobile en biocomposite

- Visualiser le produit final : Permettant une validation esthétique et fonctionnelle avant toute production physique.

Cette phase de modélisation 3D est fondamentale dans le processus de développement du produit, car elle fournit une base numérique détaillée pour les étapes ultérieures d'analyse (calcul de résistance, simulation) et de fabrication (préparation des fichiers pour l'impression 3D ou l'usinage CNC).



Figure II. 11: Enjoliveur 3D

Chapitre III

Simulation numérique

Chapitre III

Simulation numérique

III.1 Introduction

Dans un monde industriel en constante évolution, où l'innovation technique se conjugue aux exigences environnementales, la simulation numérique s'impose comme un pilier fondamental dans le développement des produits. Elle offre la possibilité de prédire, d'analyser et d'optimiser le comportement de pièces mécaniques complexes sans recourir systématiquement à des prototypes physiques, réduisant ainsi les coûts, les délais et l'impact écologique du processus de conception.

L'industrie automobile, en quête permanente de légèreté et de performance, s'intéresse de plus en plus aux matériaux alternatifs, notamment les bio-composites. Dans ce contexte, le présent travail s'attache à étudier le comportement mécanique d'un enjoliveur de roue automobile réalisé en fibre de jute et résine époxy, un matériau écoresponsable alliant propriétés mécaniques intéressantes et impact environnemental réduit.

Grâce à l'utilisation du logiciel SolidWorks pour la modélisation 3D, et de la méthode des éléments finis (MEF) pour l'analyse numérique, cette étude permet d'évaluer la résistance de la pièce sous différentes sollicitations, d'identifier les zones critiques, et d'explorer le potentiel réel de ce bio-composite dans une application industrielle concrète. Ce travail se veut une contribution à la fois technique et écologique à la conception moderne dans le secteur automobile.

III.2 Présentation de SolidWorks Simulation

SolidWorks Simulation est un module d'analyse par éléments finis intégré au logiciel SolidWorks. Il permet de simuler le comportement mécanique des pièces et assemblages 3D soumis à différentes sollicitations (charges, contraintes, température, etc.).

Grâce à son interface intuitive, il facilite l'évaluation des performances mécaniques dès la phase de conception, en fournissant des résultats comme les déformations, contraintes, et facteurs de sécurité. Cet outil permet ainsi d'optimiser les conceptions, de réduire les essais physiques, et de garantir la fiabilité des produits.

Chapitre III

Simulation numérique

III.3 Étapes principales de simulation

III.3.1 Création ou importation du modèle 3D

Avant de lancer une simulation dans SolidWorks, on importe ou crée notre modèle, vérifié soigneusement sa géométrie pour éliminer toute erreur, et simplifié-le en supprimant les éléments superflus (comme les congés et les perçages non essentiels) pour accélérer les calculs (Figure III.1).

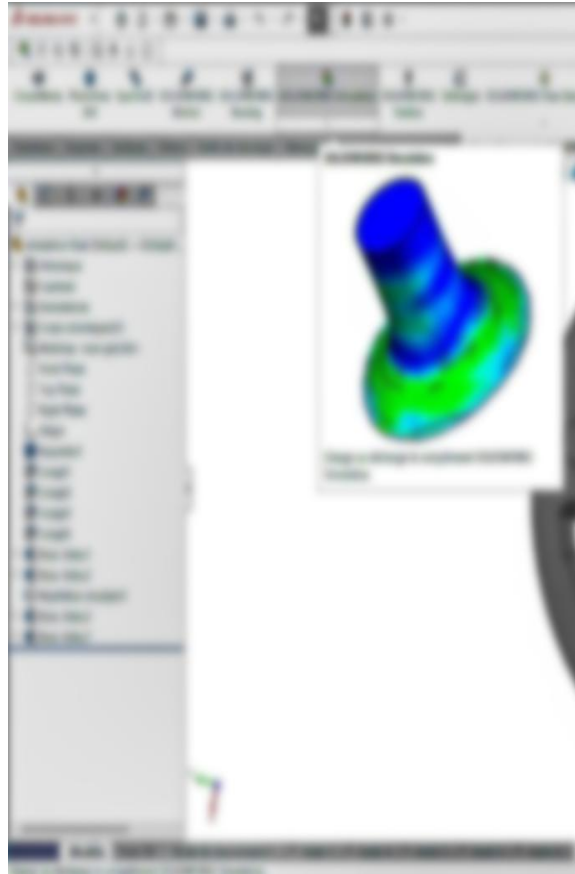


Figure III.1 : Forme géométrique.

III.3.2 Création d'une étude de simulation

- Nouvelle étude : Dans l'onglet *Simulation*, on clique sur Nouvelle étude et choisisse le type d'analyse (statique) (Figure III.2)

Chapitre III Simulation numérique

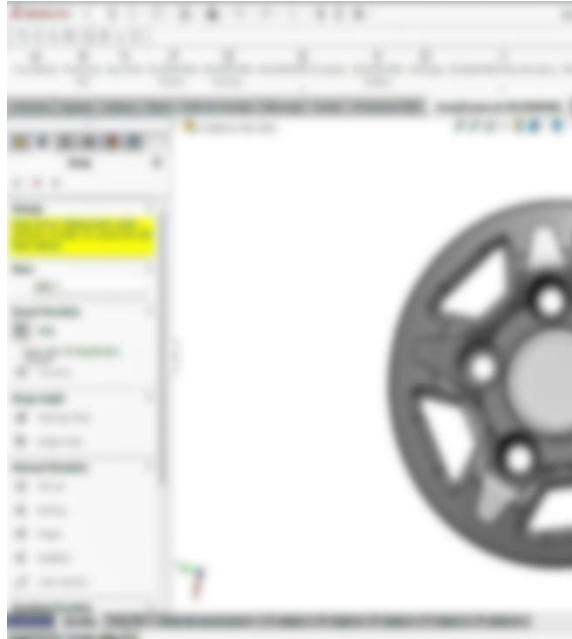


Figure III.2 : Type d'analyse (statique)

III.3.3 Application des matériaux

La figure ci-dessous illustre la fiche technique du matériau composite jute-époxy créée et définie dans SolidWorks Simulation. Ce matériau a été introduit manuellement dans la bibliothèque des matériaux personnalisés afin d'effectuer des analyses numériques par éléments finis(Figure III.3).



Figure III.3 : Définition du matériau.

Chapitre III

Simulation numérique

III.3.4 Fixations /conditions aux limites

Spécifions comment les composants sont maintenus en place (ex : géométrie fixe, support élastique, rouleau/glissière, etc.). Ces fixations représentent les contraintes physiques du monde réel. Dans ce travail, nous avons choisi géométrie fixe.

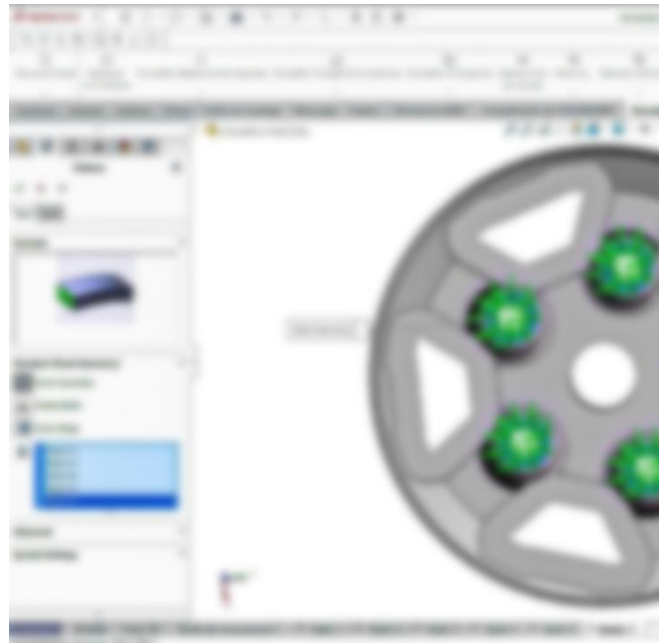


Figure III.4 : Définition de la fixation.

Sur le modèle 3D central, cinq emplacements circulaires des alésages de boulons sont représentés avec des symboles verts de "Fixed Geometry". Ces symboles indiquent les zones où le mouvement de la pièce est restreint (Figure III.4). Le choix de fixer ces zones est pertinent.

III.3.5 Chargements

Appliquons les forces, pressions, températures, force centrifuge etc. Ces options permettent une modélisation réaliste des conditions de fonctionnement.

Chapitre III

Simulation numérique

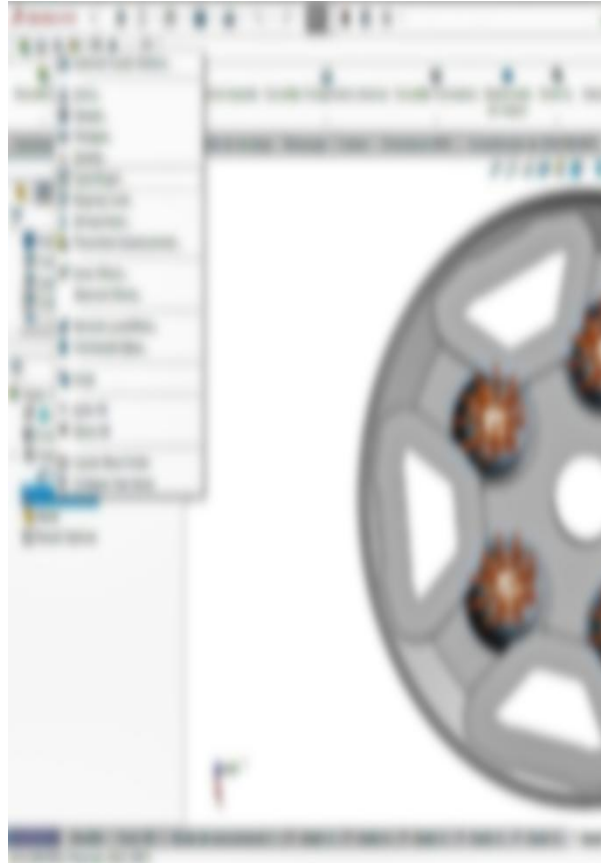


Figure III.5 : Charges appliquées.

III.3.6 Définition du Maillage (Mesh)

Choisissons la taille du maillage (grossier pour un aperçu rapide, fin pour plus de précision dans les zones critiques). SolidWorks peut générer automatiquement le maillage, mais un contrôle manuel est souvent nécessaire pour optimiser la précision et le temps de calcul.

Chapitre III

Simulation numérique



Figure III.6 : Génération du maillage.

La pièce centrale est recouverte d'un réseau de triangles et de quadrilatères (fils gris). Ce réseau représente le "maillage" de la pièce.

Pour qu'un logiciel de simulation puisse calculer comment une pièce se déforme ou se casse sous une force, il ne peut pas analyser la pièce entière d'un coup. Il la divise en petites "briques" appelées éléments. Chaque "brique" est connectée aux autres par des "nœuds". Le logiciel fait ensuite des calculs sur chaque petite brique, puis les combine pour avoir le résultat global.

Chapitre III

Simulation numérique



Figure III.7 : Maillage d`enjoliveur

III.3.7 Exécution de la simulation

- Lancer le calcul numérique.
- SolidWorks Simulation utilise la méthode des éléments finis pour obtenir les résultats.



Figure III.8: Lancement des calculs.

III.4 Résultats et discussion

III.4.1 pression (Contrainte)

III.4.1.1 Contrainte de Von Mises

La carte de contrainte équivalente (Figure III.9) indique des valeurs variant de 600 Pa à 8 MPa.

Chapitre III Simulation numérique

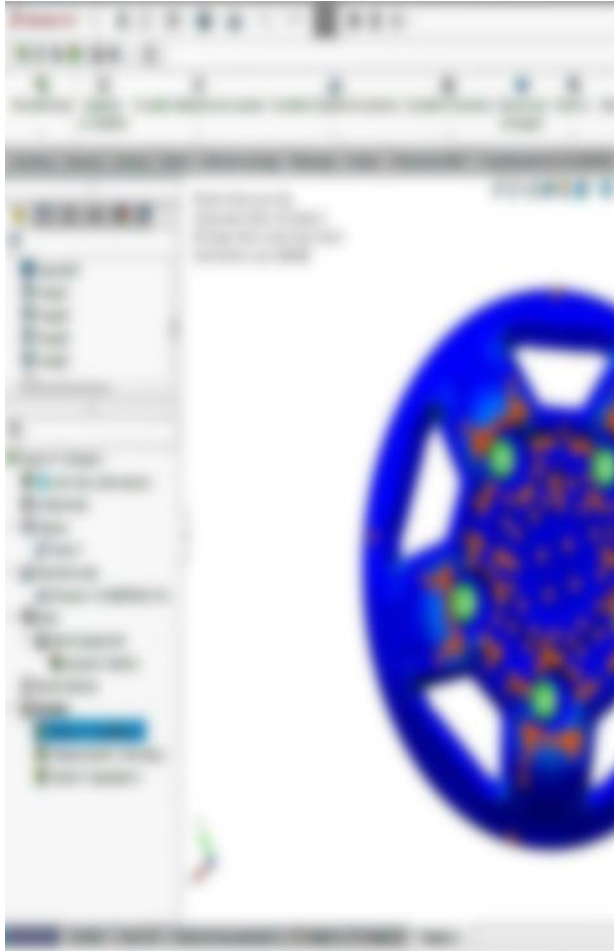


Figure III.9: Contraintes de Von Mises.

L'enjoliveur présente majoritairement des contraintes faibles à modérées (zones bleues/vertes claires), sans zones critiques (rouges) apparentes. Les contraintes relativement plus élevées (bien que faibles) se concentrent autour des trous de fixation et des zones d'application de la charge.

Comparée à la limite d'élasticité typique des matériaux utilisés pour les enjoliveurs (souvent des polymères comme l'ABS, dont la limite d'élasticité est généralement de 20-50 MPa pour les plastiques techniques, ou parfois des métaux légers), la contrainte maximale calculée (8 MPa) révèle un coefficient de sécurité extrêmement élevé. Le design actuel semble très robuste pour sa fonction.

Chapitre III

Simulation numérique

III.4.1.2 Déplacement Résultant

La carte de déplacement (Figure III.10) montre des valeurs maximales de (0.0584 mm).

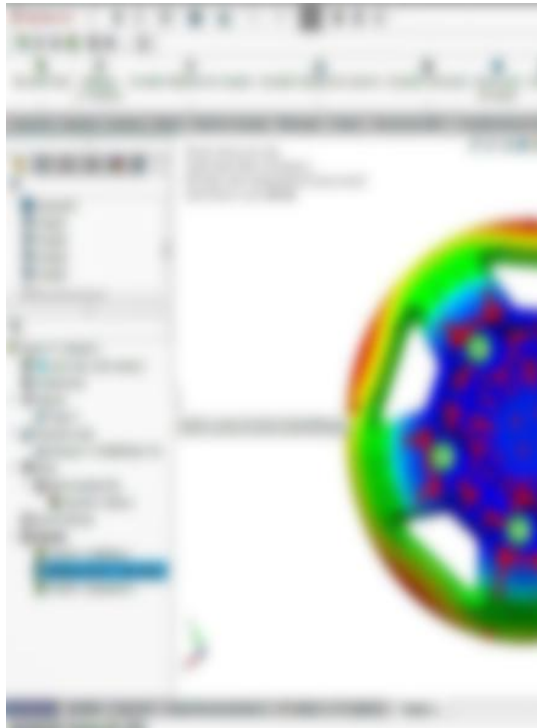


Figure III.10: Déplacement -Res disp-.

L'enjoliveur présente des déformations globalement très faibles, concentrées aux points les moins contraints par les fixations. Cette valeur, bien que petite, confirme une excellente rigidité du design.

Compte tenu de sa fonction principalement esthétique et protectrice, ces faibles déplacements garantissent une parfaite tenue de forme et l'absence d'interférences. Le design est très robuste, suggérant un potentiel d'optimisation (poids/coût).

III.4.2 Force centrifuge (Centrifugal force)

III.4.2.1 Contrainte de Von Mises

La carte de contrainte équivalente (Figure III.11) présente les résultats de contrainte de Von Mises sur l'enjoliveur sous une charge centrifuge (2546 rpm). Les valeurs s'étendent de 8.5 kPa à 9.5 MPa.

Chapitre III

Simulation numérique

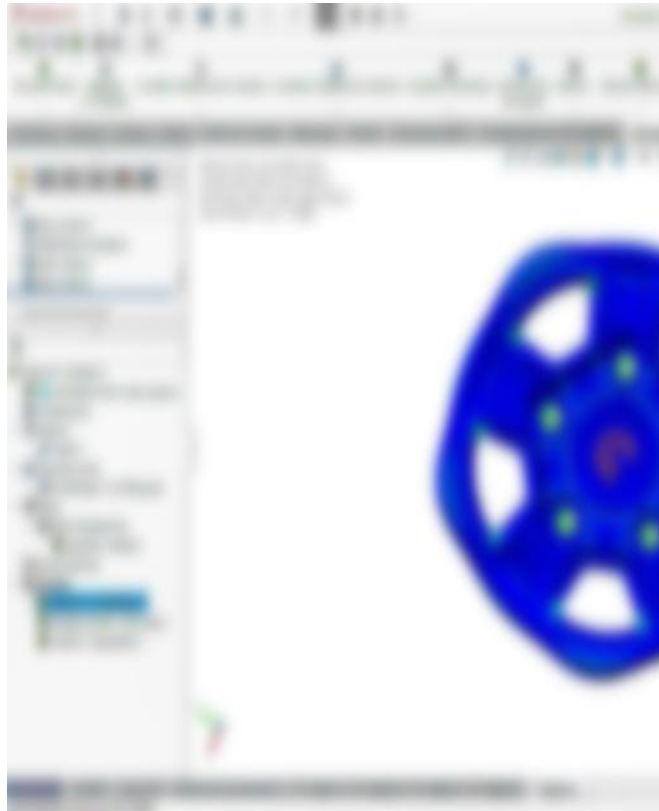


Figure III.11: Contraintes de Von Mises.

L'échelle de couleurs allant du bleu (contrainte minimale) au rouge (contrainte maximale) montre que la majorité de l'enjoliveur est en bleu et vert, indiquant des contraintes faibles. Les zones de contrainte plus élevée, mais non critiques, sont identifiables par des nuances de vert plus foncées ou de jaune.

L'enjoliveur montre des contraintes globalement faibles à modérées, avec un maximum de 9.5 MPa. Comparée à la limite d'élasticité typique des matériaux d'enjoliveurs (souvent 20-50 MPa pour les polymères), cette valeur indique un coefficient de sécurité élevé. Le design est donc robuste et bien adapté pour résister aux forces centrifuges générées, confirmant une bonne performance structurelle pour cette pièce principalement décorative et protectrice.

III.4.2.2 Déplacement Résultant (Sous Charge Centrifuge)

La carte de déplacement (Figure III.12) présente les résultats de déplacement résultant sur l'enjoliveur sous une charge centrifuge de 2546 rpm. Les valeurs s'étendent de $1.000 \cdot 10^{-3}$ mm à $3.14 \cdot 10^{-2}$ mm (0.0314 mm).

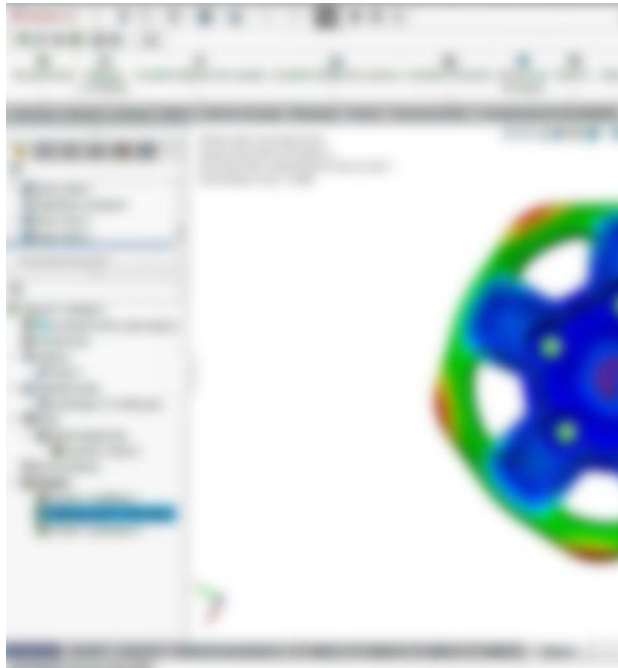


Figure III.12: Déplacement -Res disp-.

L'échelle de couleurs allant du bleu (déplacement minimal) au rouge (déplacement maximal) indique que la majorité de l'enjoliveur (zones bleues et vertes) subit des mouvements très faibles. Les zones rouges, principalement situées sur le périmètre extérieur, représentent les points de déformation la plus élevée.

Cette valeur maximale, bien que petite et imperceptible, confirme une excellente rigidité de la pièce sous la force centrifuge appliquée, assurant la stabilité de sa forme et l'absence d'interférences avec d'autres composants.

III.4.3 Charge Thermique

III.4.3.1 Contrainte de Von Mises (pour Enjoliveur en Composite (Jute-Époxy) Sous Charge Thermique

La carte de contrainte équivalente (Figure III.13) présente les résultats de contrainte de Von Mises sur l'enjoliveur, fabriqué en composite de jute-époxy, sous une charge thermique de 130 °C. Les valeurs s'étendent de 17.3 kPa à 52.3 MPa.

Chapitre III

Simulation numérique

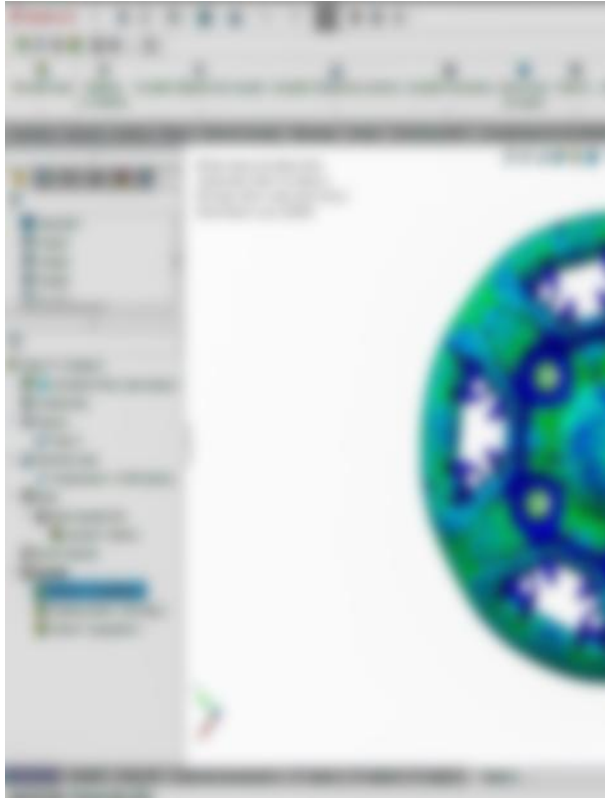


Figure III.13: Contraintes de Von Mises.

L'échelle de couleurs allant du bleu (contrainte minimale) au rouge (contrainte maximale) révèle des zones de contrainte plus élevées (rouge/orange) concentrées dans les segments intérieurs complexes de l'enjoliveur, où des expansions thermiques différentielles et des concentrations de contrainte sont attendues.

Les zones bleues et vertes indiquent des contraintes faibles à modérées sur la majorité de la pièce.

La valeur maximale de 52.3 MPa est particulièrement critique pour un composite de jute-époxy, surtout à une température de 130 °C.

À cette température, les propriétés mécaniques des résines époxy standard et des fibres naturelles peuvent se dégrader significativement. Il est impératif de comparer cette valeur de contrainte maximale à la résistance à la rupture ou à la limite d'élasticité (si applicable) du composite (Jute-Époxy) à 130°C. Si 52.3 MPa dépasse ou est proche de cette limite, le composant est en risque élevé de défaillance prématurée (par délaminage, rupture des fibres ou dégradation de la matrice).

Chapitre III

Simulation numérique

Ceci souligne l'importance cruciale d'une sélection rigoureuse du grade d'époxy et de l'orientation des fibres pour les applications soumises à des contraintes thermiques.

III.4.3.2 Déplacement Résultant (Enjoliveur, Sous Charge Thermique)

La carte de déplacement (Figure III.14) présente les résultats de déplacement résultant sur l'enjoliveur sous une charge thermique de 130 °C. Les valeurs s'étendent de $1.000 \cdot 10^{-3}$ mm à $1.38 \cdot 10^{-1}$ mm (0.138 mm).

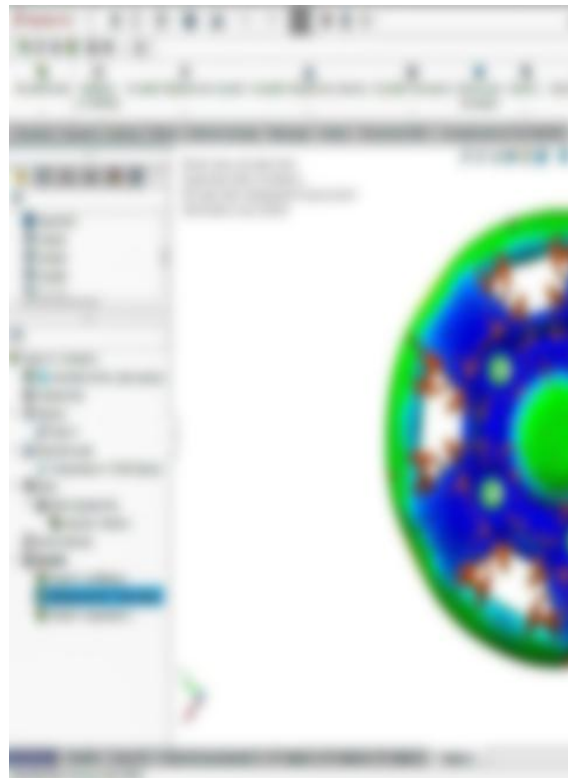


Figure III.14 : Displacement (-Res disp-)

L'échelle de couleurs allant du bleu (déplacement minimal) au rouge (déplacement maximal) indique que les déformations les plus importantes (rouge/orange) sont localisées dans les sections intérieures et les géométries complexes de l'enjoliveur. Le reste de la pièce (bleu/vert) montre des déplacements très faibles.

Bien que 0.138 mm soit une valeur mesurable, elle reste relativement faible pour un composant en composite de jute-époxy soumis à une température élevée.

Chapitre III

Simulation numérique

Ceci suggère que l'enjoliveur possède une bonne stabilité dimensionnelle sous contrainte thermique. Il est crucial de s'assurer que ces déformations n'entraînent pas de contact indésirable avec d'autres composants ou de problèmes d'assemblage, étant donné la nature de la pièce.

III.5 Conclusion

Les simulations de l'enjoliveur en composite Jute-Époxy révèlent une excellente performance structurelle sous les charges mécaniques (faibles contraintes et déformations). La pièce présente une rigidité et une stabilité dimensionnelle très satisfaisantes.

Cependant, l'analyse sous charge thermique (130 °C) indique des contraintes significatives (52.3 MPa max). Ceci est un point de vigilance majeur, nécessitant une vérification approfondie de la résistance du composite à cette température élevée pour assurer la durabilité et prévenir la dégradation.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

IV.1 Introduction

Dans le cadre de ce travail, la partie expérimentale vise à concrétiser la conception d'un enjoliveur automobile en utilisant un matériau biocomposite à base de fibres naturelles.

L'objectif principal est d'évaluer la faisabilité technique de remplacer les matériaux plastiques traditionnels, souvent issus de ressources fossiles, par une solution plus respectueuse de l'environnement, alliant légèreté, rigidité et biodégradabilité partielle.

Cette section présente d'abord le choix des matériaux constitutifs du biocomposite, à savoir la matrice polymère thermdurcissable (résine époxy) et le renfort (fibres de jute), en expliquant leurs propriétés mécaniques et environnementales. Elle détaille ensuite les étapes de fabrication de l'enjoliveur, depuis la préparation des fibres jusqu'au moulage de la pièce finale.

Par ailleurs, des essais mécaniques (notamment le test de traction) sont réalisés afin de caractériser les performances du biocomposite et de les comparer à celles des matériaux conventionnels utilisés dans l'industrie automobile.

L'ensemble de cette démarche expérimentale permet de valider, par une approche pratique, la pertinence de l'utilisation des biocomposites dans des applications automobiles soumises à des exigences mécaniques et esthétiques précises.

IV.2 Choix des matériaux et des fibres naturelles

Dans le cadre de la fabrication d'un enjoliveur automobile à base de matériaux composites, trois composants principaux ont été sélectionnés pour leurs propriétés mécaniques, économiques et écologiques : **les fibres de jute, la résine époxy STR et les nanopoudres d'alumine (Al_2O_3) et de titane (TiO_2).**

VI.2.1 Fibre naturelle de Jute (forme tissu)

La fibre de **jute** est une fibre végétale extraite de plantes du genre *Corchorus*. Elle est largement utilisée dans les composites à matrice polymère en raison de ses performances équilibrées et de sa disponibilité industrielle.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite



Figure VI.1: Tissu de jute

↳ Avantages techniques

- **Densité faible** ($\sim 1,3 - 1,5 \text{ g/cm}^3$), ce qui permet d'alléger la pièce.
- **Résistance à la traction** entre 393 et 800 MPa [54], ce qui permet une bonne tenue mécanique.
- **Module d'élasticité** entre 10 et 30 GPa [54], assurant une rigidité suffisante.
- **Bonne capacité d'absorption des chocs**, utile pour une pièce exposée à des projections de gravier et de débris routiers.
- **Forme tissée** : permet un renfort multidirectionnel et un bon taux d'imprégnation par la résine.

↳ Aspect écologique

- Ressource **renouvelable, biodégradable**, et **faible empreinte carbone**.
- Représente une alternative durable aux fibres synthétiques (comme le verre ou le carbone) pour des applications non structurelles comme les enjoliveurs.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

Tableau VI.1 : Tableau comparatif des fibres naturelles utilisées dans les composites

Critères	Fibre de jute	Fibre de lin	Fibre de diss
Densité (g/cm ³)	1,3 – 1,5	1,4 – 1,5	1,25 – 1,35 [3]
Résistance à la traction (MPa)	393 – 800 [1]	500 – 1500 [2]	250 – 500 [3]
Module d'élasticité (GPa)	10 – 30	40 – 70	5 – 12 [3]
Allongement à la rupture (%)	1,5 – 2,0	2,7 – 3,2	1,0 – 1,5
Coût approximatif (€/kg)	0,5 – 1,0	1,2 – 2,5	~0,3 (fibre brute, locale)
Disponibilité	Très élevée (industrielle)	Moyenne (Europe, Canada)	Locale, saisonnière (Afrique du Nord)
Forme d'utilisation	Tissu tissé / non-tissé	Ruban tissé, mat	Brute, manuellement traitée
Compatibilité avec résine époxy	Bonne après traitement alcalin	Excellente	Moyenne à bonne selon préparation
Impact environnemental	Faible (biodégradable, renouvelable)	Faible également	Très faible (ressource locale durable)

VI.2.2. Résine thermodurcissable (Époxy STR)

Les polyesters, les époxydes, les vinylestes et les phénols insaturés classés comme résines thermodurcissables sont les plus couramment utilisés dans la fabrication des composites.

Dans notre travail, nous avons utilisé la résine d'époxy. Cette résine a une dénomination commerciale « MEDAPOXY STR », fournie par l'entreprise **GRANITEX – GNP Alger, Algérie**. Elle se présente sous forme de kit pré dosé de deux composants : Elément A : Résine, Elément B : Durcisseur [55].

Cette résine présente les propriétés suivantes :

- Très bonne tenue aux produits chimiques.
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier.
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

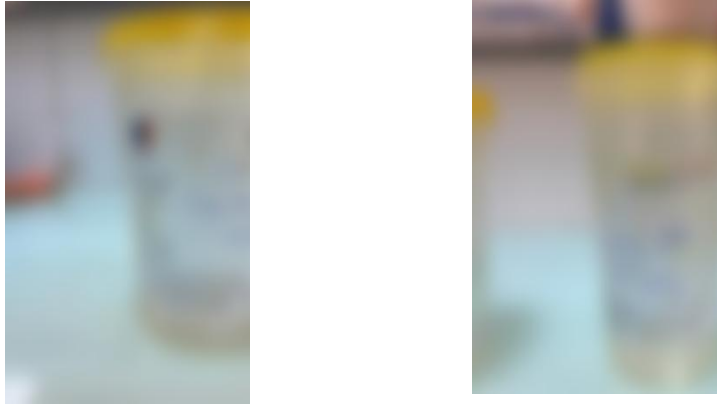


Figure VI.2 : Elément A : Résine Elément, B : Durcisseur.

La résine Epoxy STR est également compatible avec l'incorporation de nanopoudres, ce qui permet l'amélioration ciblée des performances mécaniques.

VI.2.3 Nanopoudres – Alumine (Al_2O_3) et Titane (TiO_2)

Des nanoparticules ont été ajoutées à la résine pour renforcer la matrice sans altérer la légèreté du composite.

a) Alumine (Al_2O_3)

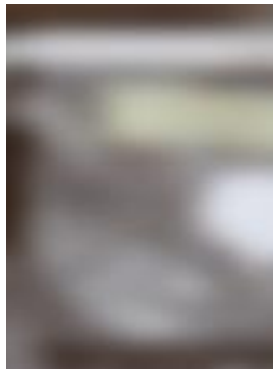


Figure VI.3 : Alumine (Al_2O_3)

- Améliore la rigidité et la résistance à l'usure [56].
- Apporte une meilleure tenue thermique, ce qui permet à la pièce de conserver ses propriétés à haute température.
- Réduit la propagation des microfissures dans le réseau matriciel.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

b) Titane (TiO₂)

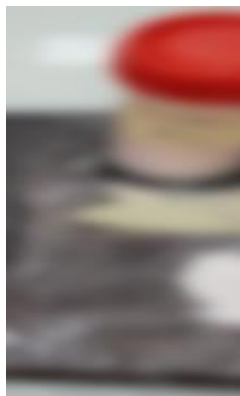


Figure VI.4 : Titane (TiO₂)

- Renforce la résistance à la traction et à la flexion [57].
- Protège le composite contre les rayons UV (vieillesse climatique).
- Améliore l'aspect esthétique de surface (blancheur, brillance).

Les nanopoudres sont utilisées en faible pourcentage (<5 % en masse), mais leur effet sur les propriétés mécaniques est significatif [58].

On résume les caractéristiques de l'ensemble des matériaux utilisés dans le tableau VI.2 :

Tableau VI.1 Caractéristiques et rôles des composants

Composant	Rôle principal	Atouts clés
Fibre de jute	Renfort (structure)	Légèreté, coût faible, biodégradable
Résine STR	Matrice (cohésion)	Résistance, compatibilité, durabilité
Al ₂ O ₃ , TiO ₂	Renforcement de la matrice	Amélioration mécanique et thermique ciblée

Ce système de composite offre une alternative performante, durable et économique pour la production de pièces automobiles non structurales comme les enjoliveurs. Il associe des ressources naturelles (fibre), une matrice technique (époxy) et des renforts nanostructurés (poudres), dans une logique d'éco-conception avancée.

IV3 Fabrication du moule en silicone pour la pièce d'enjoliveur

Dans le cadre de ce projet, un moule en silicone bicomposant a été conçu afin de permettre la fabrication d'un enjoliveur de roue en matériau composite. Ce processus s'est

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

déroulé selon plusieurs étapes bien structurées, alliant conception numérique, impression 3D et à la fin le moulage manuel par compression.

IV31 Modélisation CAO de la pièce

La première phase consiste à la **modélisation 3D** de l'enjoliveur à l'aide du logiciel **SolidWorks** comme il a été expliqué auparavant dans le chapitre de conception. Le modèle a été conçu en prenant en considération les dimensions réelles de la pièce, les formes fonctionnelles ainsi que les contraintes liées au démoulage (ajout de dépouilles, évitement des contre-dépouilles, géométrie symétrique).

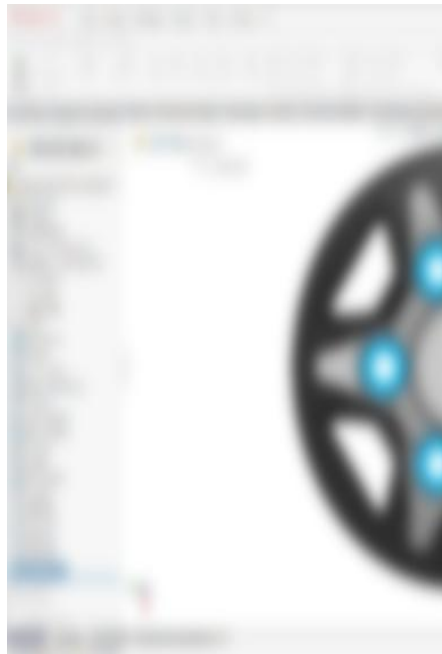


Figure VI.5 : Modélisation 3D de l'enjoliveur à l'aide du logiciel SolidWorks

IV32 Conversion du modèle 3D en données exploitables

Une fois le modèle 3D achevé, il a été exporté au format STL (Stéréolithographie), un format standard utilisé pour l'impression 3D. Ce fichier STL a ensuite été traité par un logiciel de tranchage (slicer). Dans notre cas, **Elegoo Cura** qui a permis de générer un fichier **G-code**. Ce G-code contient toutes les instructions nécessaires à l'imprimante 3D (trajectoires de la buse, températures d'extrusion, vitesses de déplacement, hauteur de couche, taux de remplissage, etc.).

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

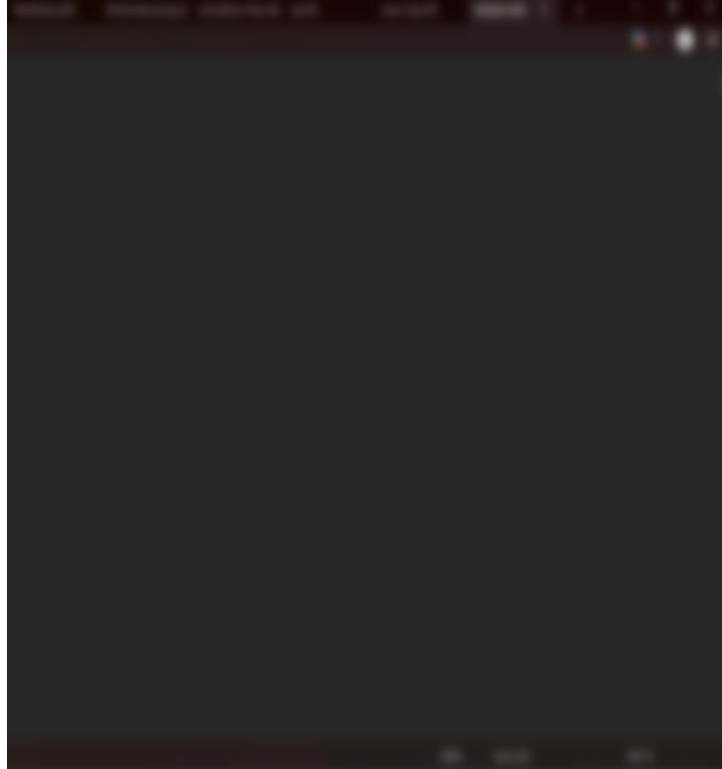


Figure VI.6 : Fichier G- code

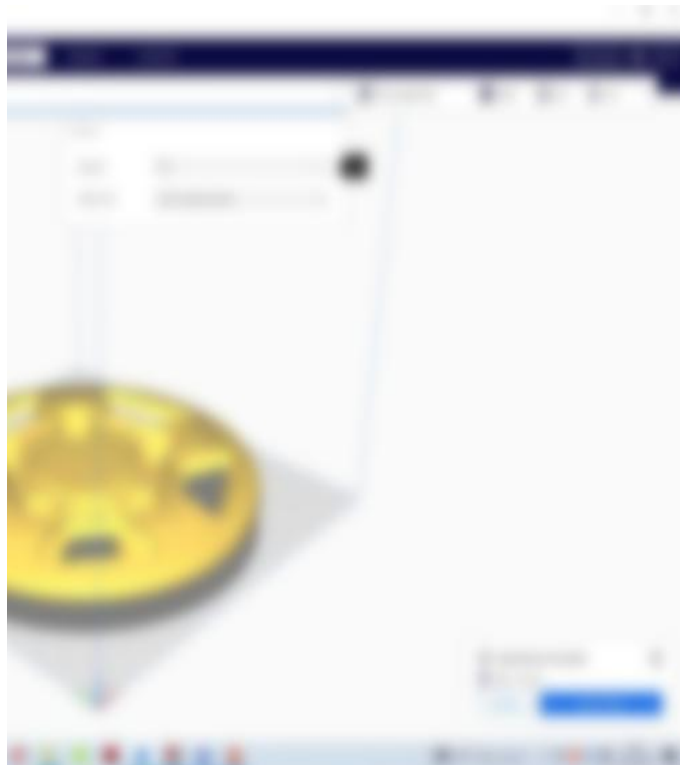


Figure VI.7 : Logiciel de tranchage (slicer) , étape 1 choix de matière

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

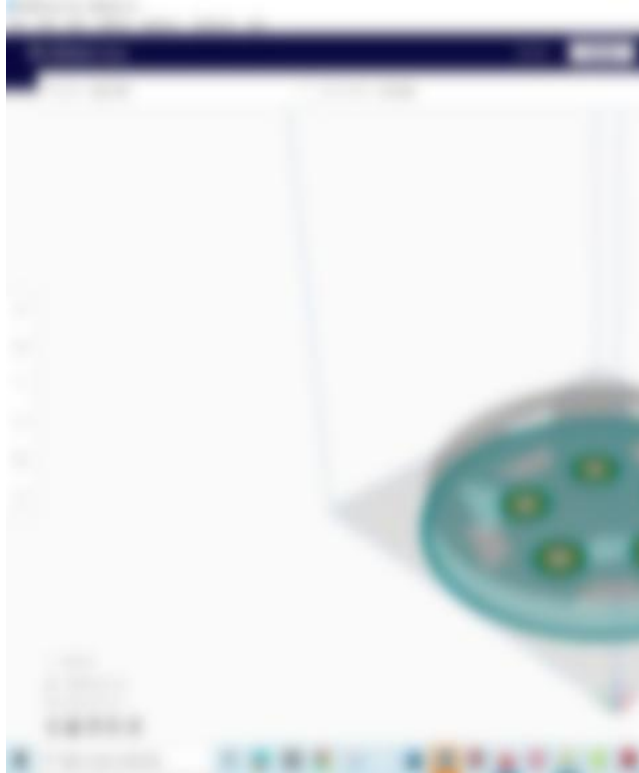


Figure VI.8 : Début de l'impression



FigureVI.9 : Fin de l'impression

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

VI.3.3. Impression 3D du maître-modèle

La pièce a été imprimée à l'aide d'une imprimante 3D Elegoo Neptune 4 Pro, utilisant la technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Le matériau utilisé est le PLA (acide polylactique), un polymère biodégradable d'origine végétale [59]. Ce choix s'explique par sa facilité d'impression, sa rigidité, et sa bonne stabilité dimensionnelle, ce qui en fait un matériau adapté pour les prototypes et les modèles maîtres destinés au moulage [60].

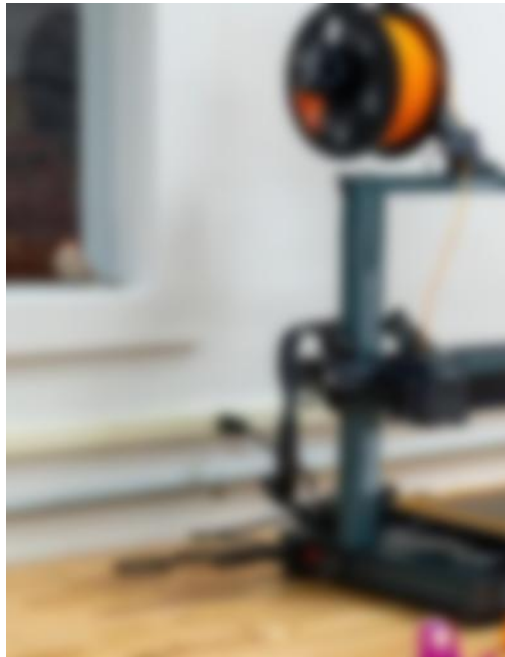


Figure VI.3 : Imprimante 3D Elegoo Neptune 4 Pro

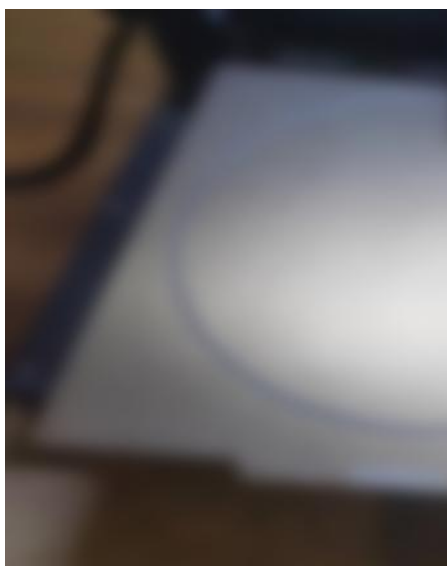


Figure VI.4: Début de l'impression

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite



Figure VI.5 Pièce finale modèle

IV34 Fabrication du moule en silicone (deux parties)

La réalisation du moule s'est faite en deux étapes :

- **Première partie du moule :**

Le modèle imprimé a été fixé sur une plaque rigide, puis placé dans un coffrage. Un mélange de **silicone bicomposant** a été préparé et coulé jusqu'à la moitié de la hauteur du modèle. Des ergots de centrage ont été ajoutés afin de faciliter l'alignement lors de la fermeture du moule. Après durcissement, cette première partie a été soigneusement démoulée.

- **Deuxième partie du moule :**

Une couche d'agent de démoulage a été appliquée sur la première moitié durcie afin d'empêcher l'adhésion entre les deux parties. Le reste du silicone a été versé pour former la deuxième moitié. Après polymérisation complète, le moule a été ouvert pour retirer le modèle d'origine.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

IV35 Finitions et nettoyage

Les deux moitiés du moule ont été nettoyées, et les éventuelles bavures ou irrégularités ont été retirées. Le moule final présente une bonne fidélité de reproduction et peut être utilisé pour plusieurs cycles de moulage (Figure 13 (a et b)).



Figure VI.13 (a): Première Partie du moule



Figure 13(b) : Deuxième partie du moule

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

VI.4 Réalisation de la pièce enjoliveur automobile

Pour fabriquer un enjoliveur par moulage par compression, les matériaux utilisés sont : un moule en silicone (composé de deux parties), deux couches de tissu de jute, une résine époxy enrichie de nanopoudres d'alumine et de titane. La préparation rigoureuse de ces matériaux est essentielle pour garantir la qualité et la durabilité de la pièce finale

VI.4.1 Préparation et séchage du tissu de jute

- Les deux couches de tissu de jute sont découpées aux dimensions requises.



Figure VI.14: Deuxième partie du moule

- chauffage sous pression : Les couches de jute séchées sont placées au centre d'une machine de presse à chaud spécialisée qui applique une pression et une température contrôlées [61]. Cette étape permet d'évacuer l'humidité résiduelle et de stabiliser les fibres, améliorant ainsi leur compatibilité avec la résine époxy. Cette opération optimise la qualité du composite final en assurant une meilleure imprégnation et adhésion.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

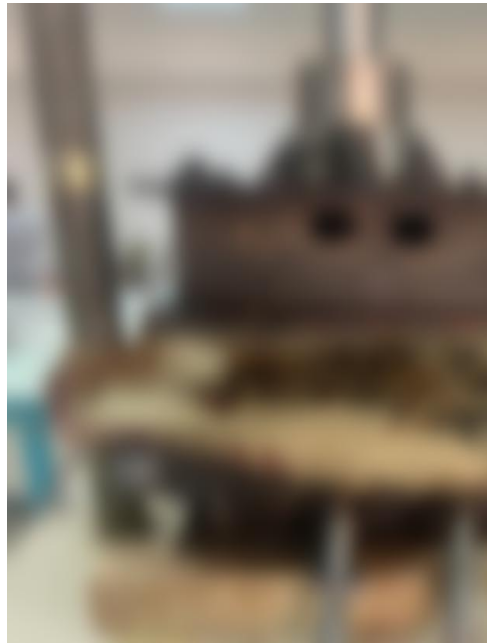


Figure VI.6: Pressage des tissus de Jute

VI.4.2 Préparation de la résine époxy avec les nanopoudres

- La résine époxy est mélangée avec des nanopoudres d'alumine et de titane pour améliorer les propriétés mécaniques, la résistance à l'usure et la durabilité du composite.
- Le mélange doit être homogène afin d'assurer une dispersion uniforme des nanoparticules dans la matrice époxy.

VI.4.3 Pesage des constituants de la pièce

Avant toute opération de moulage, une étape essentielle consiste à peser avec précision les différents constituants du biocomposite afin de garantir un bon rapport entre la matrice (résine + durcisseur) et le renfort (fibres de jute + les nanopoudres).

Le pesage est réalisé à l'aide d'une balance électronique de précision ($\pm 0,001$ g), en suivant strictement les proportions recommandées par le fabricant du système époxy. La résine et le durcisseur sont mesurés séparément selon un rapport massique typique (par exemple 100:40), puis mélangés immédiatement après le pesage pour éviter tout début de polymérisation prématurée. Les fibres de jute sont également pesées afin de déterminer le taux de renfort du composite (souvent exprimé en pourcentage massique), la même chose pour les nanopoudres (Figure VI.16) et (Tableau 3).

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

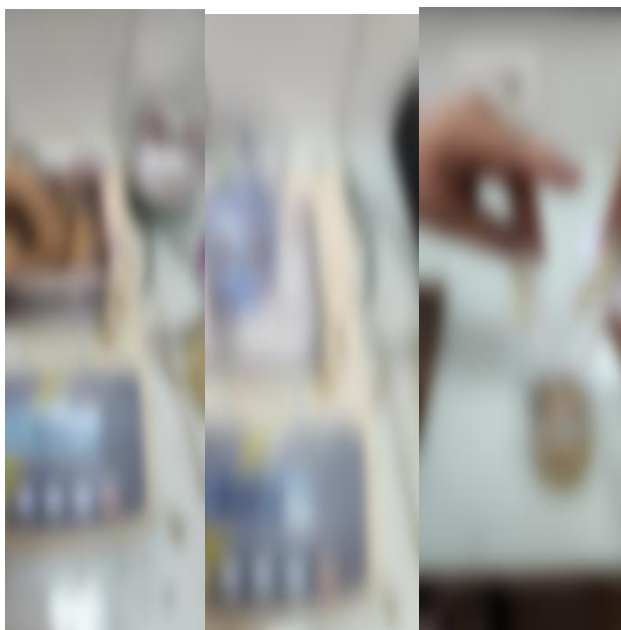


Figure VI.7: Pesage des constituants de la pièce.

Ce qui permet d'optimiser le compromis entre rigidité, poids et facilité de mise en œuvre. Un contrôle rigoureux de cette étape est fondamental pour assurer l'homogénéité du matériau final, ainsi que la reproductibilité des performances mécaniques du biocomposite.

Tableau VI.3 : Matériaux constituant la pièce enjoliveur automobile

Nom de la matière	Poids (g)	Pourcentage (%)
Fibre de jute	74.0	30.96
Résine époxy	160.0	66.95
Poudre nano Al_2O_3	3.5	1.46
Poudre nano TiO_2	1.5	0.63

VI.4.4 Imprégnation du tissu de jute

- Les couches de jute séchées sont imprégnées manuellement ou mécaniquement avec la résine époxy enrichie en nanopoudres.
- Une imprégnation complète est nécessaire pour garantir une excellente adhésion entre les fibres naturelles et la matrice époxy, condition indispensable pour la solidité du composite.

VI.4.5 Mise en place dans le moule et compression

- Les couches de tissu imprégnées sont positionnées avec soin dans la cavité du moule en silicone (Figure VI.17).
- Le moule est fermé (partie 1 et partie 2) puis soumis à une pression contrôlée pour assurer une bonne répartition de la résine et une compaction optimale du composite.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

- Une température adaptée peut être appliquée pour accélérer la polymérisation de la résine.



Figure VI.8: Mise en place dans le moule

VI.4.6 Démoulage et finition

- Après durcissement complet, le moule en silicone est ouvert et l'enjoliveur est démoulé délicatement grâce à la souplesse du silicone (Figure VI.18).
- Les bavures et excès de résine sont éliminés, puis la pièce peut être poncée ou traitée selon les exigences finales.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

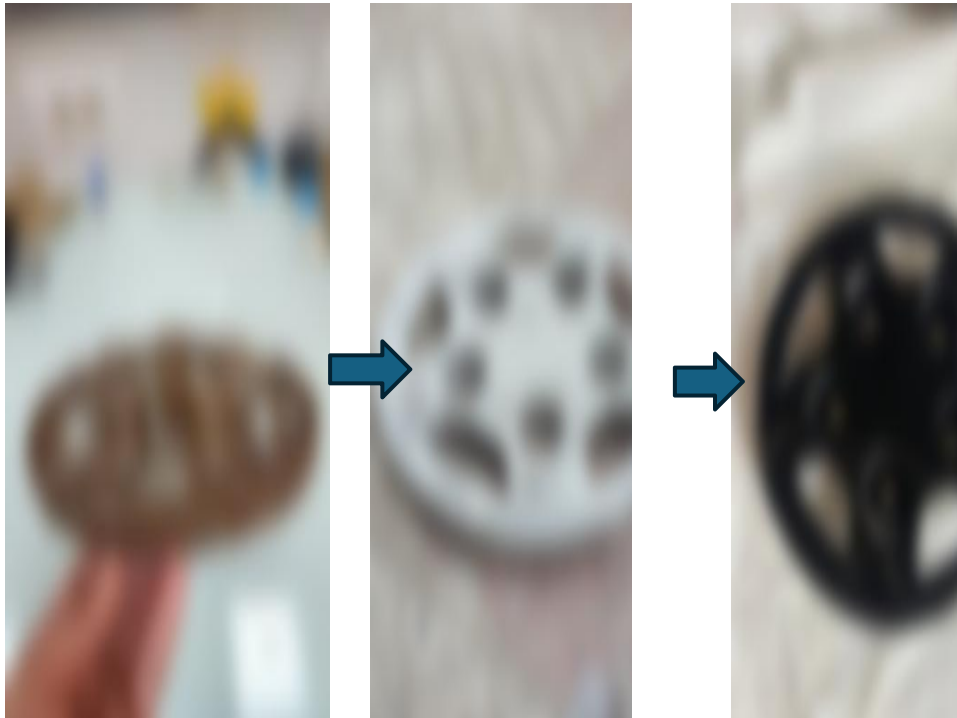


Figure VI.9: Pièce finale.

VI.5 Problèmes rencontrés pendant la fabrication et solutions apportées

➤ **Formation de bulles d'air dans le composite :**

Des bulles d'air sont apparues lors de l'imprégnation du tissu de jute avec la résine époxy, provoquant des défauts dans la pièce finale.

Solution : Augmentation de la pression pendant le moulage pour extraire l'air, et séchage rigoureux des couches de jute avant imprégnation afin d'éliminer l'humidité.

➤ **Adhésion insuffisante entre la résine et le tissu :**

Un délaminage partiel des couches a été observé après moulage.

Solution : Allongement du temps de compression pour améliorer l'imprégnation, et ajout d'une proportion de nanopoudres de titane pour renforcer l'adhésion.

➤ **Variation de la viscosité de la résine:**

Difficulté à obtenir une répartition uniforme de la résine en raison de changements de viscosité.

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

Solution : Mélange prolongé de la résine avec contrôle strict de la température pour maintenir une viscosité stable.

VI.6 Tests de qualité et contrôle de la conformité du produit

- **Tests dimensionnels :**

Mesure précise des dimensions de la pièce avec un outil de métrologie, en vérifiant la conformité aux tolérances $\pm 0,5$ mm.

- **Tests mécaniques :**

Essais de résistance à la traction et à la flexion

Ces procédures assurent un contrôle continu de la qualité du produit fini, contribuant à l'amélioration des performances et à la conformité aux exigences industrielles.

VI.6.1 Caractérisation mécanique pour le matériau utilisé

Les essais mécaniques visent à évaluer les caractéristiques mécaniques et le comportement des matériaux dans diverses conditions de charge. La mise en œuvre du matériau est effectuée au sein du laboratoire du moulage de génie mécanique (université de M'sila).

VI.6.1.1 Réalisation des plaques de test de l'enjoliveur (jute/ résines)

➤ **Préparation du renfort :** Après le découpage, les tissus de jute sont pressés un pressage à chaud à l'aide d'une presse dans le même laboratoire afin d'assurer une orientation planaire des fibres. la température est de l'ordre de 100°C et la pression utilisée est 4 bar pendant 5 minutes (Figure VI.19).

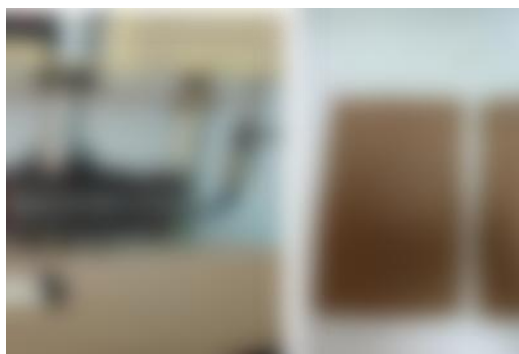


Figure VI.19 : Préparation du renfort

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

- **Préparation de la résine :** Dans notre travail on a utilisé : la résine polyester avec 2% de durcisseur et la résine époxy avec son durcisseur on ajoutant les nanopoudres de (Al_2O_3 et TiO_2)(Figure VI.20).

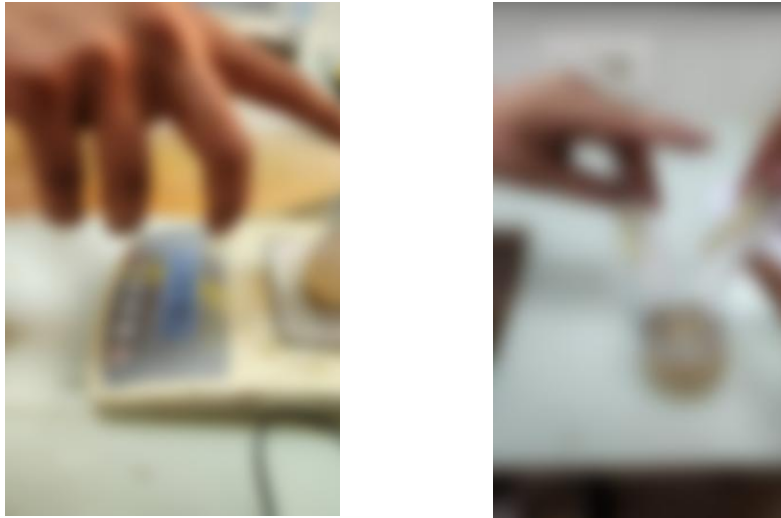


Figure VI.20 : Préparation de la résine sans et avec poudres

- **Elaboration des plaques sous vide**

Pour la réalisation des plaques, la méthode de moulage sous vide a été employée. Le moulage sous vide consiste à placer des couches de matériau (fibres, tissus, etc.) sur un moule, puis à recouvrir l'ensemble d'une membrane plastique. On fait le vide d'air, ce qui plaque les couches contre le moule et permet une imprégnation optimale par la résine. Ce procédé permet d'obtenir des plaques solides, sans bulles d'air, avec une belle finition de surface. Il est utilisé principalement pour fabriquer des plaques composites dans l'industrie (aéronautique, automobile, nautisme, etc.) grâce à sa simplicité, sa qualité et sa polyvalence [62].

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

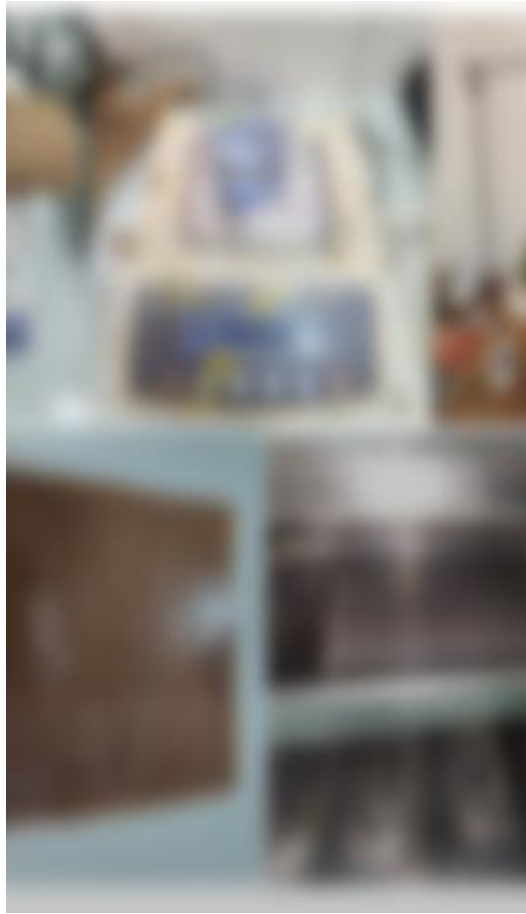


Figure VI.21 : Etapes d'obtention des plaques par moulage sous vide.

Les plaques finales (pour chaque résine) que nous avons obtenues et qui sont en tout quatre plaques sont présentées dans la Figure (VI.22).

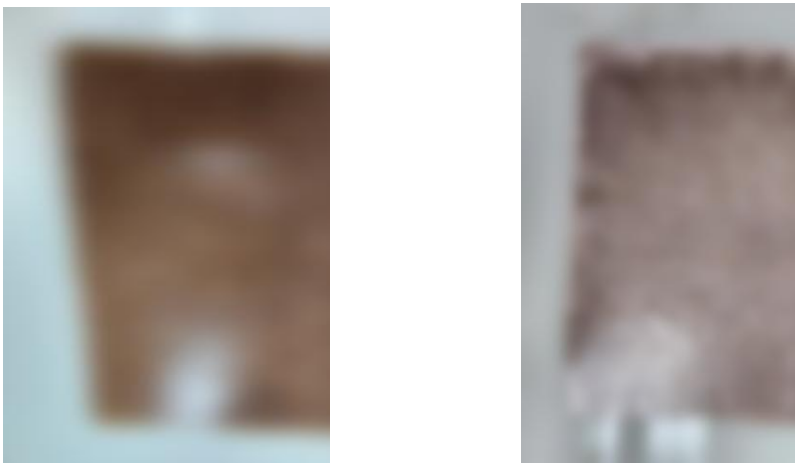


Figure VI.22 : Plaques finales du bio-composite

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

VI.6.1.2 Pesage des composants du biocomposite

Le pesage des composants est présenté suivant le tableau illustré sous dessous

Tableau VI.4 : Taux des composants dans le composite

Composant	Masse (g)	Pourcentage (%)
Tissu de jute	39,0	18,57 %
Résine (Polyester ou Epoxy)	166,0	79,05 %
Alumine (Al_2O_3)	3,5	1,67 %
Titania (TiO_2)	1,5	0,71 %
Total	210,0	100,00 %

VI.6.1.3 Découpage des éprouvettes

A partir des plaques élaborées, nous avons découpé 4 éprouvettes de chaque plaque pour les essais de (traction et flexion). Chaque éprouvette contient deux plis.

Une fois la résine est complètement polymérisée, les échantillons sont prélevés sur chaque plaque à l'aide de marqueur permanent. Les éprouvettes d'essai de traction standard selon (ASTM 3039) et de flexion selon (ASTMD790°) sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque avec lubrification pour faciliter la découpe comme le montre la Figure (VI.23).

Après le découpage des éprouvettes de nos composites qui contiennent chacune deux plis, nous avons effectué un polissage afin d'avoir une bonne planéité et dimension.

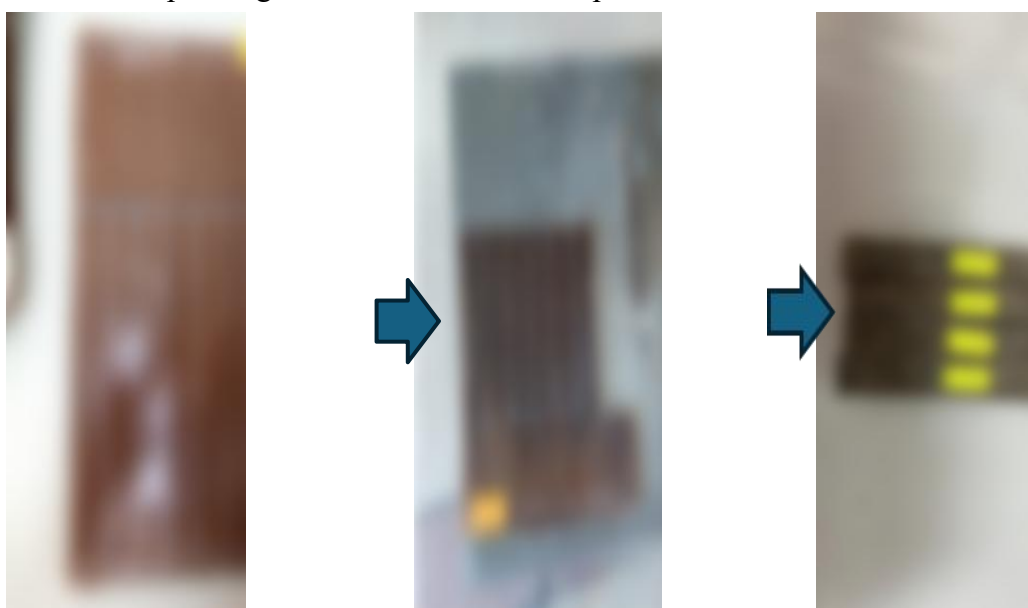


Figure VI.23 : Etapes de découpage des éprouvettes

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

VI.7 Essais de caractérisation mécaniques

Les essais mécaniques (traction et flexion) visent à évaluer les caractéristiques mécaniques et le comportement des plaques dans diverses conditions de charge (Figure VI.24).

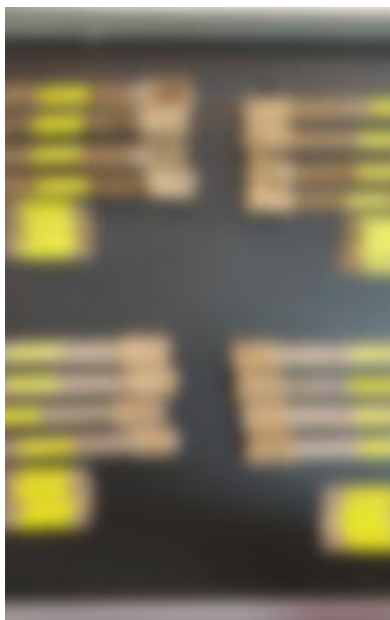


Figure VI.24 : Eprouvettes pour essais de traction et flexion

VI.7.1 Essai de traction

Les essais de traction permettent de mesurer des grandeurs normalisées telles que la contrainte à rupture, la contrainte maximale, et la limite d'élasticité. L'application directe de la contrainte de traction uniaxiale est la méthode la plus précise, essentielle et simple pour obtenir ces mesures.

Tout d'abord, une description générale de la machine de traction est présentée, suivie des informations sur les échantillons, les mesures de déformation et de la charge appliquée [63]. Une machine de traction se compose d'un corps principal avec une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou serrée entre des mors en fonction de sa géométrie, est fixée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile.

Cette machine est équipée d'une cellule de charge permettant d'évaluer l'effort appliqué à l'éprouvette et de suivre le déplacement de l'éprouvette de diverses manières. En général, les appareils expérimentaux sont asservis et peuvent être configurés pour fonctionner à vitesse de charge, à charge constante, ou à vitesse de déformation constante, en fonction des options

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

disponibles sur le système de pilotage [64].

La machine de traction utilisée est nommée (TesT 112), un modèle traditionnel pour évaluer les matériaux et les composants (voir Figure VI.25). Cette série à deux colonnes couvre une plage de mesure allant jusqu'à 5 kN et peut être utilisée de manière flexible pour diverses applications en traction, compression et flexion [65].

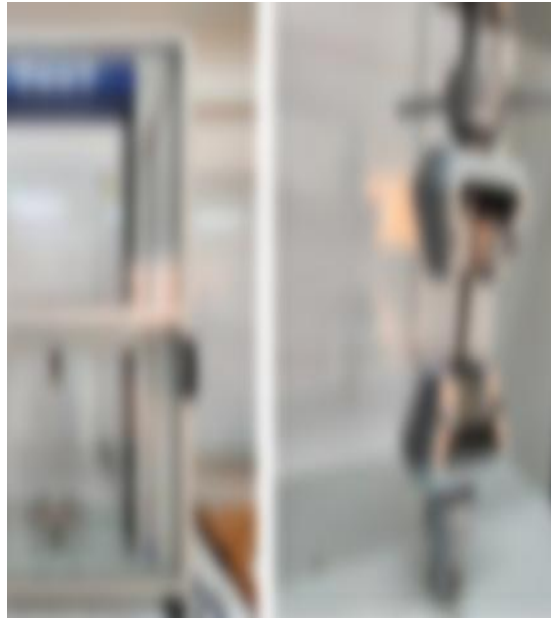


Figure VI.25 : Machine de traction

➤ **Paramètres d'études**

Les caractéristiques mécaniques déterminées de l'essai de traction sont :

- **Contrainte de rupture**

La contrainte de rupture est donnée par la relation[68] :

$$\sigma = F/S$$

Avec : **F** : Force de traction (N)

S : Section rompue (mm²)

σ : Contrainte de rupture (MPa)

- **Module de Young [69] :**

Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ϵ

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

$$E = \sigma / \varepsilon = (F * L_0) / (S * \Delta L)$$

Avec : **E** : Module d'Young (Mpa).

L₀: Distance entre mords (mm).

S₀: Surface ou section (mm²).

ε : La déformation de la longueur des éprouvettes.

ΔL : L'allongement des éprouvettes (mm).

VI.7.2 Essai de flexion trois points

Les essais de flexion sont effectués à température ambiante sur des échantillons élaborés suivant la norme (ASTMD 790) qui précise les dimensions de l'éprouvette, la distance L entre les appuis. Les essais sont effectués sur la même machine de type (Test) dans laboratoire de mécanique M'sila, équipée d'un capteur de force de 5 kN et piloté par le logiciel Text Xpert 9.0. (Figure VI.26).

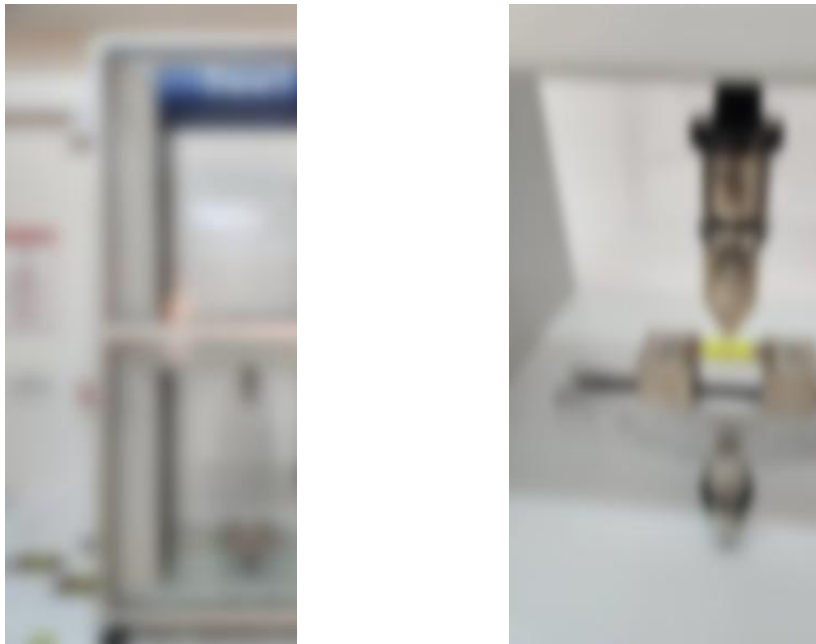


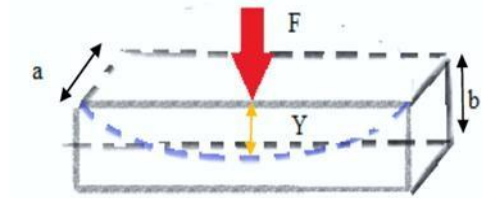
Figure VI.26 : Test de flexion

Chapitre : IV

Réalisation d'enjoliveur automobile en biocomposite

Les résultats obtenus déterminent le déplacement et la force à la rupture. La contrainte à la Flexion σ_f et le module de Young E_{ef} sont calculés respectivement selon les formules suivantes [70]:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2ab^2}$$
$$= \frac{FL^3}{4^3}$$



σ_f : la contrainte à la flexion (MPa)

E_{ef} : le module à la flexion (MPa) ;

a et **b** : largeur et épaisseur de la section (mm);

L : distance entre les appuis (mm);

Y : la flèche de l'éprouvette (mm).

Chapitre V
Résultats et discussions des courbes

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

V.1. Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats expérimentaux issus des essais mécaniques réalisés sur les plaques en biocomposite destinées à la fabrication des enjoliveurs automobiles. L'objectif principal de ces essais est de caractériser le comportement mécanique des matériaux sélectionnés, en particulier leur réponse en traction et en flexion, afin d'évaluer leur aptitude à satisfaire les exigences du cahier des charges automobile en termes de résistance, de rigidité et de durabilité.

Les essais de traction permettent de déterminer des propriétés fondamentales telles que le module d'élasticité, la résistance à la rupture et l'allongement à la rupture, qui sont des indicateurs clés de la capacité du matériau à supporter des efforts de tension sans défaillance prématurée. Les essais de flexion, quant à eux, évaluent la capacité du matériau à résister aux sollicitations en courbure, simulant ainsi les contraintes réelles auxquelles un enjoliveur peut être soumis lors de son utilisation (chocs, flexions lors du montage/démontage, etc.).

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes effort-déformation (traction) et effort-flèche (flexion), puis discutés en détail pour en extraire les paramètres caractéristiques et interpréter le comportement des plaques testées. Une attention particulière est portée à la comparaison des performances obtenues avec les exigences normatives et les données de la littérature pour des matériaux similaires. Cette analyse permet de valider le choix du biocomposite et d'identifier d'éventuelles pistes d'optimisation pour les applications automobiles.

V.2. Discussion des résultats des courbes de traction et de flexion

Dans ce paragraphe, les résultats des tests mécaniques, obtenus à la suite d'essais de traction et de flexion des bio-composites, sont illustrés et discutés.

V.2.1 Résultats des essais de traction

Dans ce qui suit, les résultats des tests mécaniques, obtenus à la suite d'essai de traction des bio-composites selon la norme ASTM 3039D avec une vitesse constante de 2mm/min,

La figure IV. 1 représente une éprouvette du composite Jute/Polyester durant l'essai de traction après rupture.

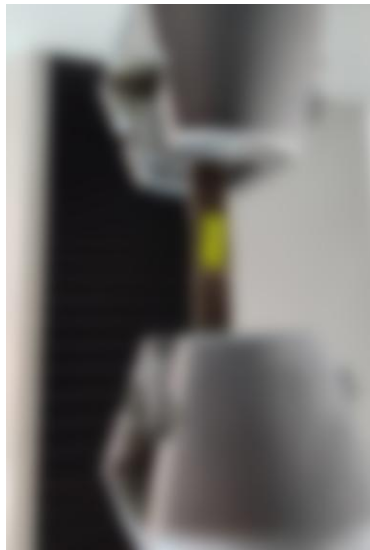


Figure V.1 : Rupture du biocomposite durant l'essai de traction

L'importance des composites à matrice polymère renforcée de fibres naturelles provient de l'amélioration substantielle de la résistance et du module, qui offre une possibilité d'utilisation de ces composites dans des applications pratiques.

Il est bien connu que la résistance à la traction des composites renforcés de jute dépend de la force des deux les constituants et l'adhérence entre le renfort et la matrice.

Cette partie vise à déterminer les performances mécaniques des composites à la traction **de quatre éprouvettes pour chaque cas** : (polyester (**P**), Polyester +Al₂O₃+TiO₂ (**PAT**), Epoxy (**E**) et Epoxy +Al₂O₃+TiO₂ (**EAT**).

Les résultats des tests statiques des différents matériaux testés sont représentés par les figures suivantes. Ces Figures illustrent les évolutions typiques de la contrainte en fonction de la déformation des éprouvettes sollicitées en traction statique.

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

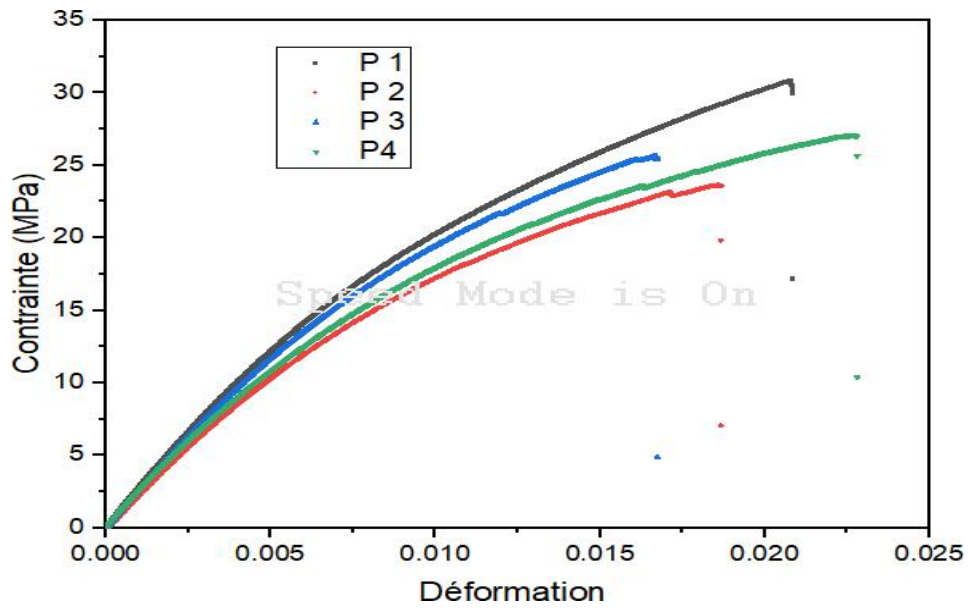


Figure 102 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/polyester)

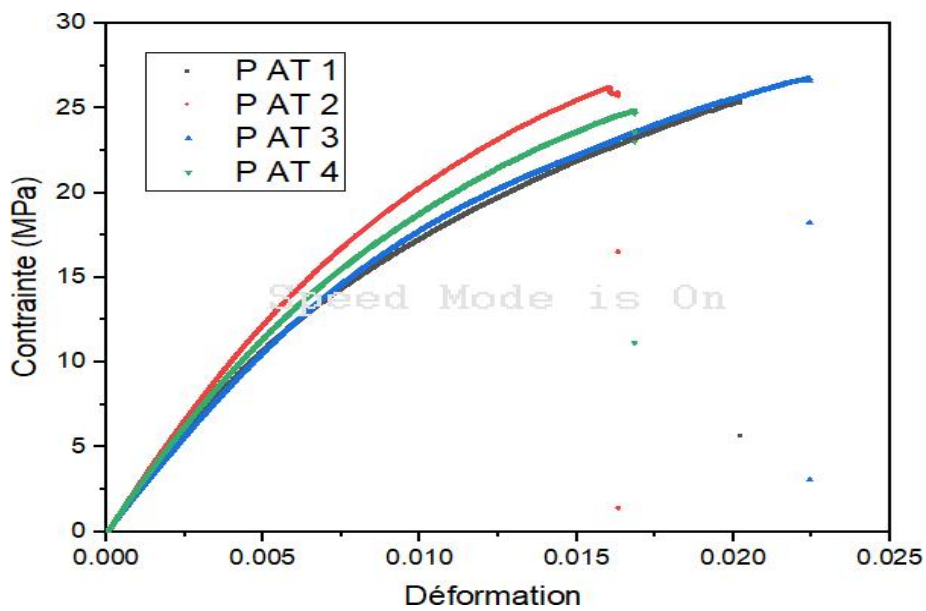


Figure V.3 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes du (Jute/polyester/Al₂O₃ /TiO₂)

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

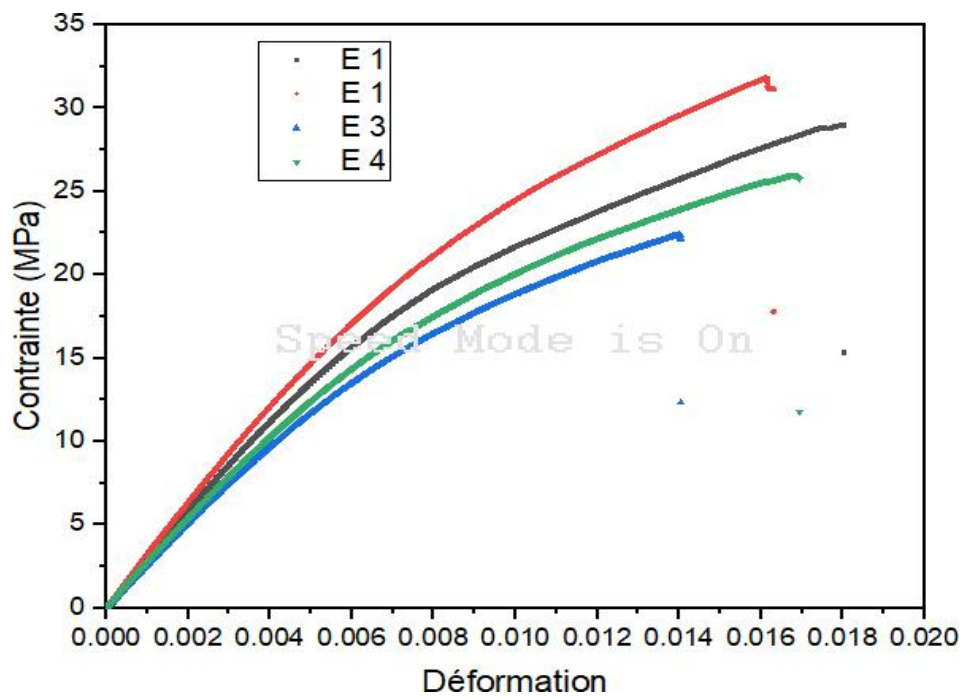


Figure V.4 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/époxy)

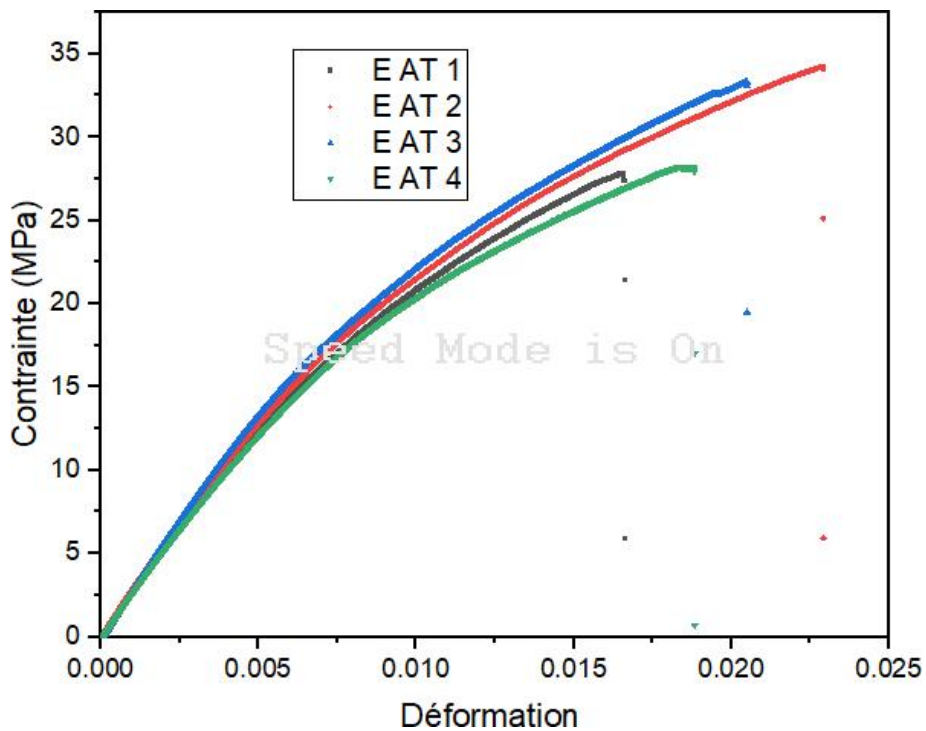


Figure V.4 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/polyester/Al₂O₃ /TiO₂)

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

Les courbes de traction obtenues pour les plaques en biocomposite des quatre types présentent généralement une phase linéaire initiale, correspondant au comportement élastique du matériau, suivie d'une zone de transition vers la rupture. Le module d'élasticité, déterminé à partir de la pente de la portion linéaire de la courbe, reflète la rigidité du composite et permet de comparer la performance du matériau testé à celle des composites traditionnels ou des polymères non renforcés.

La résistance maximale à la traction (contrainte à la rupture) est extraite du pic de la courbe et indique la capacité du matériau à supporter des charges importantes avant la rupture. L'allongement à la rupture, quant à lui, renseigne sur la ductilité du composite, un paramètre important pour prévenir la fragilité et assurer une certaine tolérance aux défauts ou aux chocs.

Dans le cas des quatre types de nos biocomposites, il est fréquent d'observer dans les figures (V.2, V.3, V.4 et V.5) une variabilité des résultats liée à la nature des fibres naturelles (hétérogénéité, orientation, adhésion fibre/matrice).

Les courbes des quatre types d'éprouvettes du même échantillon de la figure V.2 ont des comportements similaires et presque identiques, avec une petite dispersion sûrement elle est due aux étapes de l'élaboration *in situ*. L'évolution se produit en trois étapes, on constate, au début une courbure jusqu'à une certaine valeur, qui est de l'ordre de 0,5% de la déformation, puis une linéarité caractérisée par une augmentation jusqu'à la contrainte maximale. Cette dernière varie presque à mesure que la déformation augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale lorsqu'une rupture soudaine est atteinte.

C'est la même observation pour les trois autres biocomposites des figures (V.3, V.4 et V.5).

Les valeurs des contraintes moyennes sont respectivement de l'ordre de **23.2 MPa**, **26.19 MPa**, **25.97 MPa** et **34.09 MPa** pour les quatre bio composites. Le module de Young a été calculé conformément à la norme ASTM 3039 et les principales propriétés mécaniques obtenues sont regroupées dans le tableau (V.1).

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

Tableau V.1 Propriétés mécaniques moyennes des essais de traction des bio composites.

Eprouvettes Composites	Module de Young (GPa)	Contrainte (MPa)	Déformation
Jute/Polyester (P)	1.973	23.2	0.018
Jute/Polyester +Al ₂ O ₃ +TiO ₂ (P AT)	2.427	26.19	0.016
Jute/Epoxy (E)	2.471	25.97	0.016
Jute/Epoxy + +Al ₂ O ₃ +TiO ₂ (E AT)	2.512	34.09	0.022

L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'influence des renforts nanométriques sur les performances mécaniques des matrices polymères en traction, en mettant l'accent sur le rôle fondamental des nanopoudres utilisées.

➤ Rôle des nanopoudres dans le renforcement des bio-composites

Les nanoparticules jouent un rôle fondamental dans l'amélioration des performances mécaniques des matrices polymères. Leur **taille nanométrique** leur confère une **surface spécifique élevée**, permettant une interaction plus étroite avec la matrice et un renforcement plus efficace.

Renforcement structurel:

Les nanoparticules d'**alumine** et de **titania** augmentent la rigidité et la résistance des composites en agissant comme **charges rigides** réparties dans la matrice. Elles limitent la déformation des chaînes polymères sous contrainte.

Blocage de la propagation des fissures:

Ces nanopoudres agissent comme **barrières mécaniques** qui empêchent ou ralentissent la croissance des microfissures, améliorant ainsi la résistance à la rupture. Grâce à leur surface active, les nanoparticules favorisent une **meilleure adhésion interfaciale**, permettant un

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

transfert de charge plus efficace entre la matrice polymère et les renforts. Cela se traduit par une meilleure capacité à répartir les contraintes appliquées.

Effet synergique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$:

L'**alumine**, par sa dureté et sa rigidité, confère au composite une excellente résistance à la traction, tandis que la **titania**, reconnue pour sa bonne dispersibilité, facilite une **distribution homogène** des particules dans la matrice. Ensemble, ces deux nanopoudres améliorent simultanément la **rigidité**, la **résistance mécanique** et la **ductilité** [56].

En conclusion l'utilisation conjointe de **nanopoudres d'alumine et de titania** dans des matrices polymères, qu'il s'agisse de polyester ou d'époxy, s'avère être une stratégie efficace pour optimiser les propriétés mécaniques en traction.

Le composite **PAT** montre que le polyester peut être significativement renforcé grâce à ces nanoparticules, tandis que le composite **EAT** représente la formulation la plus performante, combinant rigidité, résistance et aptitude à la déformation.

Ces résultats confirment l'intérêt croissant pour les **renforts nanostructurés** dans les bio-composites, notamment pour des applications dans les secteurs **automobile, aéronautique ou du bâtiment**, où l'allègement des structures ne doit pas compromettre leur résistance mécanique.

V.2.2 Résultats des essais de flexion

Les essais de flexion fournissent des courbes effort-flèche caractérisant la résistance du matériau aux sollicitations en courbure. La pente initiale de la courbe permet de déterminer le module de flexion, indicateur de la rigidité en flexion du composite. La charge maximale supportée avant rupture ou avant l'apparition de la première fissure est également relevée, tout comme la déformation maximale admissible avant défaillance.

Les résultats des figures (V.6, V.7, V.8, et V.9) qui sont présentées au-dessous, montrent généralement une bonne corrélation entre la rigidité en traction et en flexion, bien que la résistance en flexion puisse être influencée par la distribution et l'orientation des fibres, ainsi que par la qualité de l'interface fibre/matrice.

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

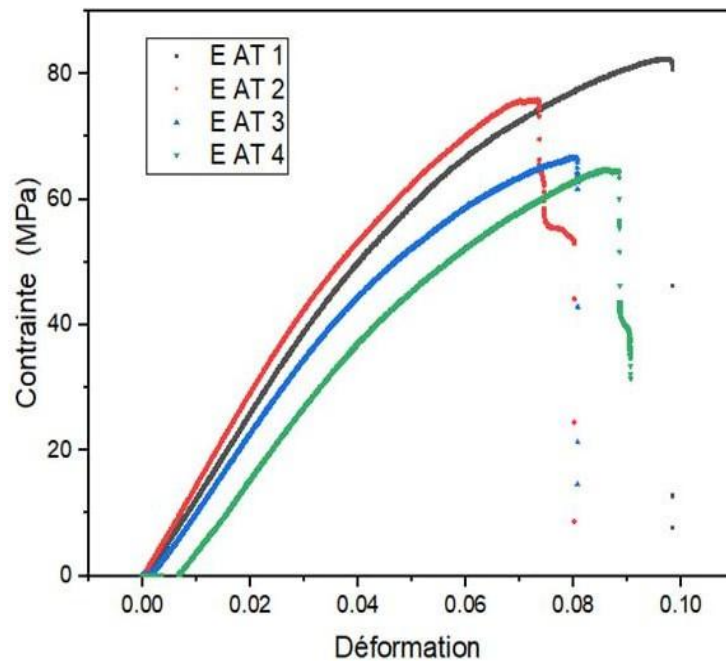


Figure 116 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/polyester)

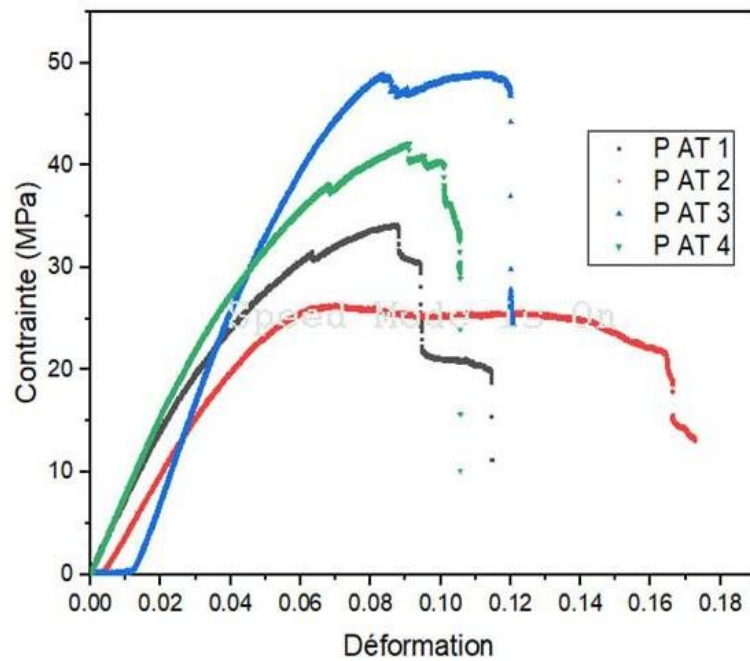


Figure 127 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/polyester)

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

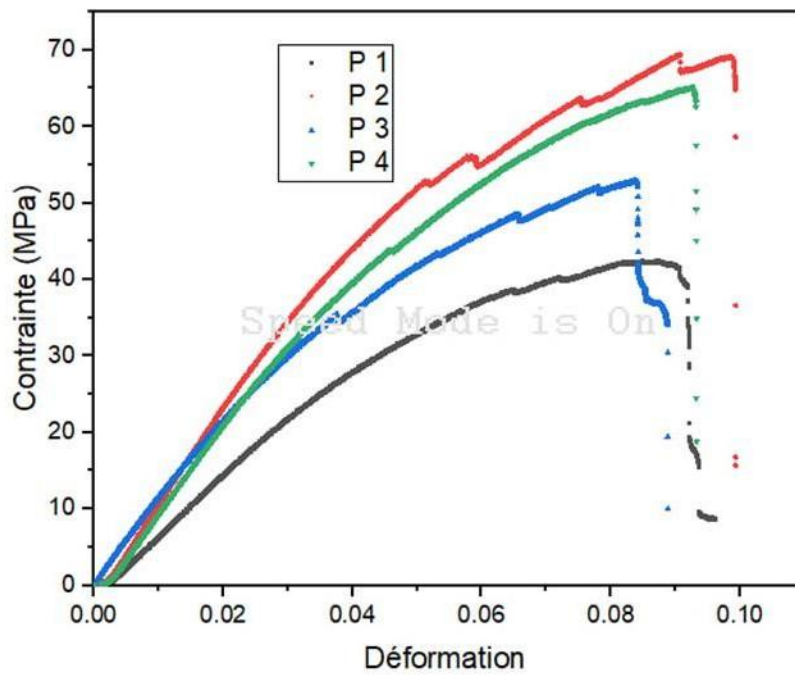


Figure 138 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/polyester)

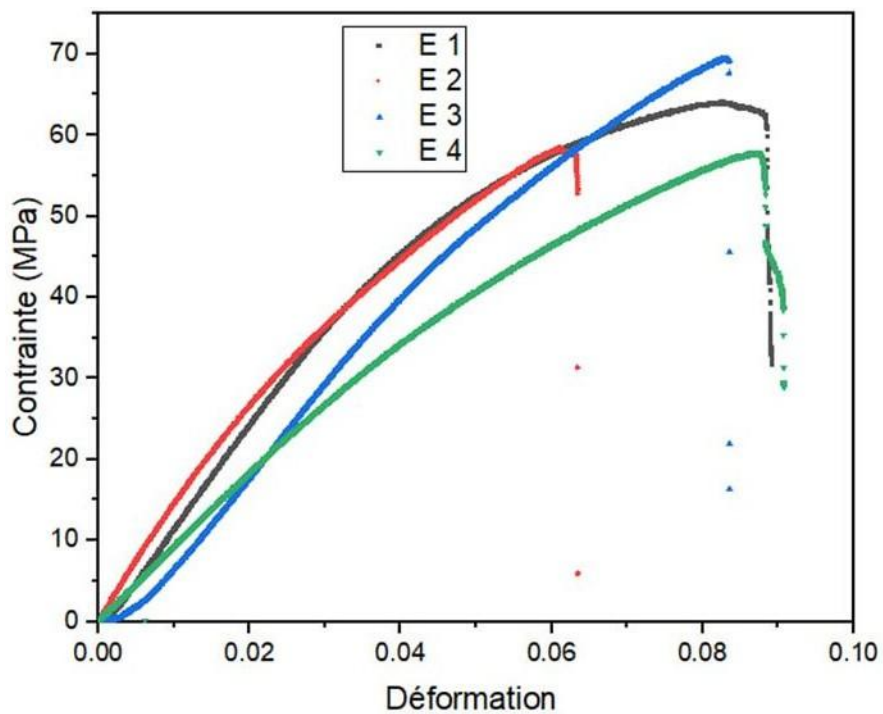


Figure 149 : Evolutions de la contrainte en fonction de déformation (σ - ϵ) des éprouvettes (Jute/polyester)

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

Les courbes des figures (V.6, V.7, V.8 et V.9) présentent un comportement bilinéaire ou quasi linéaire selon la nature du composite et le mode de rupture (cassure nette, fissuration progressive, délaminage).

Les courbes des éprouvettes de chaque échantillon présentent une grande similitude et une faible dispersion surtout dans la première phase. Cela explique sûrement le bon processus d'élaboration des bio composites par la méthode sous vide.

Par comparaison entre les quatre types des biocomposites, la résistance en flexion maximale des **biocomposites (E AT): ~80 MPa, est la plus élevée** indiquant un module de flexion important et déformation à la rupture relativement faible (~0.08), comportement fragile mais résistant suivie par les biocomposites (P AT) avec une valeur de contrainte à la rupture de 50 MPa.

Les principales propriétés mécaniques obtenues sont regroupées dans le tableau (V.2).

Tableau V.2 Propriétés mécaniques moyennes des essais de flexion des bio composites.

Eprouvettes Biocomposite	Module de Young (GPa)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Jute/Polyester (P)	1.177	69.42	0.089
Jute/Polyester +Al ₂ O ₃ +TiO ₂ (P AT)	1.107	48.49	0.080
Jute/Epoxy (E)	1.205	69.41	0.083
Jute/Epoxy+ +Al ₂ O ₃ +TiO ₂ (E AT)	1.215	82.40	0.097

L'ajout de nanopoudres (Al₂O₃ + TiO₂) a un effet dépendant de la matrice :

- Effet renforçant très net dans l'époxy (EAT) avec amélioration de toutes les propriétés mécaniques [56].

Chapitre V

Résultats et discussions des courbes

- Le composite EAT se démarque comme la formulation la plus performante, combinant rigidité, résistance et ductilité, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications structurelles exigeantes.

CONCLUSION

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a permis d'étudier le potentiel des biocomposites à base de fibres de jute pour la conception d'un enjoliveur automobile, dans le contexte actuel d'allègement des véhicules et de respect de l'environnement. L'objectif principal était d'évaluer la faisabilité d'un tel composant en remplaçant les matériaux pétrochimiques traditionnels par une solution plus écologique, économique et renouvelable.

La synthèse bibliographique a montré que les fibres de jute possèdent des propriétés mécaniques intéressantes pour une application dans les composites. Leur faible densité, leur faible coût de production et leur culture peu impactante sur l'environnement en font une alternative prometteuse aux fibres de verre. Cependant, leur variabilité naturelle ainsi que leur sensibilité aux conditions ambiantes (humidité, chaleur) constituent des freins importants à leur utilisation dans des composites structuraux.

Sur le plan de la conception, l'enjoliveur a été modélisé en 3D sous SolidWorks à partir d'un cahier des charges précis. La simulation par éléments finis (EF) a permis d'évaluer son comportement sous des sollicitations typiques (pression, forces centrifuges, variations thermiques). Les résultats de la simulation indiquent que le design retenu présente une bonne tenue mécanique dans des conditions normales d'utilisation : les contraintes maximales restent inférieures aux limites élastiques du composite, et les déplacements induits sont négligeables, ce qui garantit la stabilité dimensionnelle du composant monté sur la roue.

En revanche, la simulation thermique à 130 °C a révélé une augmentation des contraintes locales (jusqu'à 52 MPa), ce qui nécessite une attention particulière dans le choix de la résine (notamment sa température de transition vitreuse) et le taux de fibres pour garantir la durabilité du composant sous températures extrêmes.

Enfin, la fabrication d'un prototype par moulage par compression a validé la faisabilité industrielle du projet. La pièce réalisée présente une surface régulière, une bonne rigidité et une masse réduite par rapport aux enjoliveurs traditionnels. Ce résultat est prometteur et ouvre la voie à des développements ultérieurs.

Références

1. B. Mazères et P. Verdy, *Matériaux composites : principes et caractéristiques*, Lavoisier, 2014.
2. M. Berthier, *Les fibres naturelles : lin, chanvre, jute*, Dunod, 2016.
3. P. Ienny, *Biocomposites : matériaux, procédés et applications*, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2018.
4. P. Baley et A. Bourmaud, *Propriétés mécaniques et applications des biocomposites*, Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud, 2012.
5. C. Rolland, *Anisotropie et modélisation des composites*, Presses des Ponts, 2018.
6. J.-L. Chabert, *Absorption d'énergie et comportements aux chocs des matériaux composites*, Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2013.
7. D. Leclercq, *Comportement à la corrosion des matériaux composites*, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2014.
8. S. Sankaram, *Techniques de stratification et structures sandwich*, Éditions Ellipses, 2015.
9. A. Müller et al., *Intégration de structures composites en carrosserie automobile*, Thèse de l'École Centrale de Lyon, 2020.
10. A. Gossein, *Les composites : matériaux et procédés*, Hermes, 2015.
11. Şafak, Y, Ahmet, Ç., Mustafa, Ö., Hasan, S. (2018). *Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications*. *European Mechanical Science*, 2(3): 83-91. Doi: <https://doi.org/10.26701/ems.369005>
12. Toupe, J.L., *Optimisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles: application à un composite de fibre de lin avec un mélange de polyéthylène/polypropylène d'origine post-consommation*. 2015, Université Laval.
13. Baley, C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. 2005: Ed. Techniques Ingénieur.
14. Azwa, Z., et al., *A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres*. *Materials & Design*, 2013. 47: p. 424-442.
15. Pandey, J.K., et al., *Recent advances in the application of natural fiber based composites*. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2010. 295(11): p. 975-989.

Références Bibliographiques

16. John, M.J. and R.D. Anandjiwala, *Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. Polymer composites*, 2008. **29**(2): p. 187-207.
17. Sjostrom, E., *Wood chemistry: fundamentals and applications*. 2013: Elsevier.
18. Boustingorry, P., *Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté. Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse*. 2002, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
19. Laraba, S.R., et al., *Development of sandwich using low-cost natural fibers: Alfa-Epoxy composite core and jute/metallic mesh-Epoxy hybrid skin composite. Industrial Crops and Products*, 2022. **184**: p. 115093.
20. Meirhaeghe, C. and H. Bewa, *Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France. Étude FRD subventionnée par l'ADEME*, 2011. **16**: p. 65.
21. Klyosov, A.A. (2007). *Wood-Plastic Composites*. New Jersey, Wiley Interscience.
22. Mwaikambo, L.Y., Ansell, M. P. (2006). *Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. J. Mater. Sci.*, 41, 2483-2496.
23. Kalia, S., Kaith, B.S., Kaur, I. (2009). *Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites - A review. Polym. Eng. Sci.*, 49, 1253-1272.
24. Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I. (2003). *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? Comp. Sci. Tech.*, 63, 1259-1264. 91
25. Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., Arora, S. (2003). *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? Composites Part A: Appl. Sci. Manuf*, 35, 371-376.
26. Robert, R. F. (2005). *Bast and other plant fibres*. Cambridge, Angleterre : Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute.
27. M. Lemoine, « *Bio-based Plastics in Fuel Systems* », *Rapport technique Renault*, 2018.
28. IAC, *Rapport R&D 2017 : composites à base de fibres naturelles*, IAC, 2017.
29. S. Dupont, *Flaxpreg pour applications structurelles*, Thèse, Université de Technologie de Compiègne, 2016.
30. V. Marchal et P. Thiry, *Interface fibre/matrice : enjeux et traitements*, Hermes, 2018.

Références Bibliographiques

31. *A. Bernard, Traitements de surface pour fibres naturelles, Thèse, INP Grenoble, 2017.*
32. *C. Petit, Variabilité des fibres naturelles et propriétés composites, Presses Universitaires de France, 2019.*
33. *E. Robert, Polymères thermoplastiques compatibles pour biocomposites, Lavoisier, 2021.*
34. *L. Durand, Enjoliveurs et design automobile, Dunod, 2017.*
35. *P. Moreau, Protection des freins et éléments esthétiques, Presses des Mines, 2018.*
36. *J.-P. Lefèvre, Typologies et performances des enjoliveurs, Lavoisier, 2019.*
37. *C. Martin, Analyse du marché des enjoliveurs en Europe, Thèse, Université de Bordeaux, 2020.*
38. *S. Robert, Produits haut de gamme et personnalisation automobile, Lavoisier, 2019.*
39. *A. Gauthier, Matières plastiques granulées pour l'automobile, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2018.*
40. *D. Lefort, Systèmes de fixation et innovations en carrosserie, Dunod, 2021.*
41. *P. Bernard, Le moulage au contact : principes et applications, Thèse, Université de Strasbourg, 2017.*
42. *L. Fournier, Limitations et reproductibilité des procédés artisanaux, Presses Universitaires de Grenoble, 2018.*
43. *M. Dubois, Projection simultanée et compactage dans les composites, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2019.*
44. *H. Martin, Moulage sous vide pour composites, Thèse, Université de Toulouse, 2016.*
45. *S. Leroy, RTM : transfert de résine et production de masse, Hermes, 2020.*
46. *F. Durant, Qualité de surface par RTM, Lavoisier, 2018.*
47. *E. Petit, SMC et BMC en grande série, Thèse, Université de Nancy, 2017.*
48. *C. Roch, Composite et véhicules électriques : perspectives, Dunod, 2021.*
49. *B. Rousseau, Intégration de capteurs dans les composites, Thèse, INSA Lyon, 2020.*
50. *J. Martin, Comparaison des matrices thermodurcissables et thermoplastiques, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2022.*
51. *V. Legrand, Résines pour RTM : cycles courts en production automobile, Lavoisier, 2021.*
52. *Vroomly – Rôle, entretien et prix des enjoliveurs (plateforme spécialisée en entretien automobile).*
53. *IDGarages – Enjoliveur et roulement de voiture (site d'informations techniques sur les pièces automobiles).*

Références Bibliographiques

54. Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). *Composites reinforced with cellulose based fibres*. *Prog. Polym. Sci.*, 24(2), 221–274.
55. *Granitex, Notice technique, Alger, 2019*
56. Mahato, K. K., et al. (2017). *Effect of alumina nanoparticles on epoxy composites*. *Mater. Today Proc.*, 4(2), 3160–3164.
57. Kumar, R., et al. (2020). *UV resistance of natural fiber composites with TiO₂*. *Polym. Compos.*, 41(9), 3872–3881.
58. Rahman, M. M., et al. (2019). *Nanofillers in natural fiber composites*. *Mater. Res. Express*, 6(8), 085335.
59. *Elegoo, Elegoo Neptune 4 Pro User Manual, Elegoo, 2024.*
60. S. Miller, *Guide pratique du PLA en impression 3D*, Dunod, 2023. V. Legrand, *Résines pour RTM : cycles courts en production automobile*, Lavoisier, 2021.
61. J. Dupont, *Technical Hot Press Processes for Composite Manufacturing*, Éditions Techniques, 2022
62. *Machine d'essai en traction compression 112* <https://www.directindustry.fr/prod/test-gmbh/product-14815-8874c3.html>
63. Dai, Y., et al., *Characterization of tensile failure behaviour of magnesia refractory materials by a modified dog-bone shape direct tensile method and splitting tests*. *Ceramics International*, 2020. 46(5): p. 6517-6525.
64. Blétry, M., *Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
65. A. Petit, « *Optimisation du procédé de moulage sous vide pour composites renforcés de fibres naturelles* », *Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019.*
66. N. Martin, « *Caractérisation mécanique des composites à fibres naturelles selon la norme ASTM D638-03* », *Mémoire de Master, Université de Montpellier, 2020.*
67. M. Leroy & A. Fontaine, « *Influence des paramètres d'usinage sur les essais de traction des polymères selon ASTM D638* », *Revue Française de Plasturgie*, vol. 12, no 3, pp. 45–58, 2019.
68. Nicolas Tessier- Doyen, « *Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles* », *L'université de limoges, 2003*
69. CARMA, « *Glossaire des matériaux composites renforcés des fibres d'origine renouvelable* », *centre d'animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006.*

Références Bibliographiques

70. **AFNOR NF EN ISO 178** – *Plastiques : Détermination des propriétés flexionnelles*, Association Française de Normalisation, 2019.