

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de génie mécanique

Laboratoire Génie Mécanique et Développement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
Mécanique

**Étude et Analyse par éléments finis d'un composite
renforcé par des fibres de palmier dattier.**

Présenté par :

BENKHELLAT Meriem

Sous la direction de :

M. Saïd RECHAK Pr

M. Zouheyr BELOUADAH MCB

Présenté et soutenu publiquement le : 13/09/2020

Composition du jury :

Président	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP Alger
Promoteur	M. Zouheyr BELOUADAH	MCB	ENP Alger
Promoteur	M. Saïd RECHAK	Pr	ENP Alger
Examineur	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP Alger

ENP 2020

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de génie mécanique

Laboratoire Génie Mécanique et Développement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
Mécanique

**Étude et Analyse par éléments finis d'un composite
renforcé par des fibres de palmier dattier.**

Présenté par :

BENKHELLAT Meriem

Sous la direction de :

M. Saïd RECHAK Pr

M. Zouheyr BELOUADAH MCB

Présenté et soutenu publiquement le : 13/09/2020

Composition du jury :

Président	M. Yacine BELKACEMI	MCA	ENP Alger
Promoteur	M. Zouheyr BELOUADAH	MCB	ENP Alger
Promoteur	M. Saïd RECHAK	Pr	ENP Alger
Examineur	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP Alger

ENP 2020

ملخص

المركبات المعززة بالألياف الطبيعية اثبتت قدرتها كبدائل للألياف الاصطناعية في العديد من التطبيقات. من خلال هذه الدراسة، تمكنا من تخمين الخواص الميكانيكية للمادة المركبة بمصفوفة الايبوكسي معززة بألياف نخيل التمر أحادية الاتجاه بطريقة التجانس. باستخدام تقنيات التحليل والمحاكاة، تم تحليل سلوك الشد لهذه المادة بغرض تقييم تأثير زاوية الطبقة ونسبة الألياف ونوع التعزيز وعدد الطبقات على صلابة هذه المادة متعددة الطبقات. في الجزء الأخير، تمت دراسة تنافسية ألياف نخيل التمر في قطاع السيارات المستدام وفقاً للمعايير المطلوبة في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: المركبات الحيوية، ألياف النخيل، طريقة التجانس، المحاكاة العددية.

Abstract:

Natural fiber-reinforced composites are proven to be capable of replacing synthetic fibers reinforced composites in many applications. Through this study, we were able to enhance the mechanical properties of the unidirectionally reinforced composite material Date Palm Fiber/Epoxy by a homogenization method. Using analysis and simulation techniques, the tensile behavior of our material was analyzed in order to evaluate the effect of the ply angle, percentage of fibers, type of reinforcement and number of layers on the stiffness of the laminate. In a last part, the competitiveness of date palm fiber in the sustainable automotive sector was studied according to the most requested criteria in this field.

Keywords: Bio composites, Date palm fibers, Homogenization method, Numerical simulation.

Résumé :

Les composites renforcés de fibres naturelles sont prouvés être capable de remplacer les composites à fibres synthétiques dans plusieurs applications. À travers cette étude, nous avons pu valoriser les propriétés mécaniques du matériau composite stratifié, à matrice Epoxy renforcé de fibres unidirectionnelles de palmier dattier/époxy par une méthode d'homogénéisation. A l'aide des techniques d'analyses et de simulations, le comportement à la traction de notre matériau a été analysé, dans le but d'évaluer l'effet de l'angle du pli, taux des fibres, type du renfort et le nombre de plis sur la rigidité des stratifié. Dans une dernière partie, la compétitivité de la fibre de palmier dattier dans le secteur automobile durable a été étudié selon les critères les plus demandé dans ce domaine.

Mots clés : Bio composites, Fibres de palmier dattier, Méthode d'homogénéisation, Simulation numérique.

Dédicace

Ce mémoire est dédié,

À ma mère, Samira, qui a été une véritable source d'encouragement et d'inspiration pour moi tout au long de ma vie,

À mon père Mourad, qui n'a jamais refusé mes vœux et qui a encouragé toutes mes décisions,

À mes sœurs Imen, Doudi, Vivi et Ana ma joie de vivre et à mon frère Hamid, ma fierté. Qu'Allah les protège et les bénisse,

À mon oncle Majid, qui a toujours été là pour me guider et m'aider.

À mes grands-parents, mes oncles et mes tantes, symbole d'amour et de soutien,

À mon amie Cyria qui m'a toujours soutenu.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie ALLAH, le tout puissant de m'avoir accordé le savoir, le droit chemin, l'opportunité de poursuivre mes études et la force pour réaliser ce travail.

Le présent travail a été effectué sous la direction du Professeur Said RECHAK et Docteur Zouheyr BELOUADAH que je remercie vivement pour leur encadrement, leurs directives, leurs conseils précieux et surtout la confiance qu'ils m'ont accordée.

Je tiens également à remercier Docteur Yacine BELKACEMI et Docteur Hamid SEDJAL, membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer mon travail.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont à tous les enseignants du département du génie Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour les connaissances et le savoir-faire qu'ils m'ont transmis pendant les trois années de ma formation.

Je tiens à remercier de manière particulière mes chers parents, mon frère et mes sœurs respectives "que Dieu les protège", qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont soutenu pendant toutes ces années d'études. J'espère qu'ils trouvent dans ce mémoire toute ma reconnaissance et tout mon amour.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Je tiens à remercier mes amis et camarades Daoud Babaami, Mouna Mahfoud, Mohamed Fredj, Hamza. Hebhou, et Chourouk Guessoum pour leur aide et leurs encouragements fréquents.

Table des matières

Liste des tables.

Liste des Figures.

Liste des abréviations.

Introduction générale.....	13
Chapitre 1 : Généralité sur les Matériaux Composites	16
1.1 Matériaux composites	16
1.2 Caractéristiques générales.....	16
1.2.1 Éléments constituant des matériaux composites.....	17
1.3 Classification des matériaux composites	20
1.3.1 Classification selon le type de matrice	20
1.3.2 Classification selon la catégorie du renfort	21
1.3.3 Classification selon la forme du renfort	21
1.3.4 Classification selon le marché.....	22
1.4 Architecture des matériaux composites	23
1.4.1 Stratifiés :	23
1.4.2 Composites sandwiches :	24
1.5 Conclusion	25
Chapitre 2 : Les fibres de palmier dattier en tant que renfort pour matériaux composites	27
2.1 Matériaux composites biosourcés	27
2.1.1 Présentation des fibres végétales	27
2.1.2 Classification des fibres végétales.....	27
2.1.3 Structure morphologie.....	27
2.1.4 Propriétés et avantages des fibres végétales.....	28
2.1.5 Autres domaines d'utilisation des fibres végétales.....	29
2.2 Les fibres de palmier dattier en tant que renfort pour matériaux composites	30
2.2.1 Matériaux végétaux du palmier dattier.....	30
2.3 Conclusion :	32
Chapitre 3 : Techniques d'homogénéisation	34
3.1 Méthodologie de l'homogénéisation.....	34
3.1.1 La représentation	34
3.1.2 Localisation	35
3.1.3 L'homogénéisation.....	35
3.2 Modèles d'homogénéisation :	35
3.2.1 Bornes de Voigt et Reuss	35
3.2.2 Modèle d'Eshelby	36
3.2.3 Modèle auto-cohérent.....	36

3.3	Application de la méthode d'homogénéisation :	36
3.3.1	Propriétés intrinsèques	37
3.3.2	Comportement du matériau :	37
3.3.3	Calcul des coefficients homogénéisés pour un simple pli :	38
3.4	Le modèle numérique :	44
3.4.1	Engineering Data	45
3.4.2	Ansys Composite PrepPost (ACP)	46
6.2.2.1.	Géométrie	46
3.4.3	Structure Statique	51
3.5	Conclusion :	51
Chapitre 4 : Analyse par éléments finis du biocomposite		53
4.1	Introduction	53
4.2	Évaluation de la rigidité du matériau Epoxy / Fibres de Palmier Dattier :	53
4.2.1	Effet de la fraction volumique des fibres	53
4.2.2	Effet de l'orientation des fibres	56
4.2.3	Effet du type de renforcement	59
4.2.4	Effet du nombre des plis	62
4.3	Conclusion :	63
Chapitre 5 : Le potentiel des fibres de palmier dattier dans l'industrie automobile durable		65
5.1	Critères de comparaison	65
5.1.1	Densité	65
5.1.2	Disponibilité des fibres naturelles.	66
5.1.3	Coût de la fibre brute	67
5.1.4	Rapport spécifique entre le module d'élasticité et le coût.	68
5.2	Test d'impact	69
5.2.1	Simulation :	70
5.2.2	Comparaison des performances au test d'impact des différents matériaux	72
5.3	Conclusions	76
Conclusion générale		78
Bibliographie		80

Liste des tableaux

TABLEAU 1-1 : EXEMPLE DE QUELQUES CARACTERISTIQUES DU POLYPROPYLENE ET LE POLYAMIDE.....	18
TABLEAU 2-1 : PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES FIBRES VEGETALES	29
TABLEAU 3-1 : PROPRIETES MECANQUES DE FIBRES DE PALMIER.	43
TABLEAU 3-2 : CARACTERISTIQUES MECANIQUE DE L'EPOXY.....	43
TABLEAU 3-3 : LOI DES MELANGES	44
TABLEAU 3-4 : CARACTERISTIQUES DU COMPOSITE EFPN CALCULES PAR LA LOI DES MELANGES.....	44
TABLEAU 5-1 : LES DONNEES RECUEILLIES SUR LES FIBRES NATURELLES UTILISEES DANS CETTE ETUDE.	65
TABLEAU 5-2 : CAPACITE EN ENERGIE ABSORBEE DES PARE CHOC EN EPOXY ET EFPN50.....	76
Tableau 5-3 : COMPARAISON DES RESULTATS DU TEST D'IMPACT.....	77

Liste des figures

FIGURE 1-1 : MATERIAUX COMPOSITES A PARTICULES, A FIBRES ET STRATIFIES...	16
FIGURE 1-2 : MATERIAUX COMPOSITES.	17
FIGURE 1-3 : TYPES DE MATRICE.	17
FIGURE 1-4 : TYPES DE RENFORTS.	19
FIGURE 1-5 : CLASSIFICATION DES COMPOSITES SELON LA CATEGORIE DU RENFORT.	21
FIGURE 1-6 : CLASSIFICATION DES COMPOSITES SELON LA FORME DES RENFORTS.....	22
FIGURE 1-7 : SCHEMA ILLUSTRATIF D'UN MATERIAU COMPOSITE STRATIFIE.....	23
FIGURE 1-8 : DESIGNATION D'UN STRATIFIE.	24
FIGURE 1-9 : DESIGNATIONS D'UNE AME NID D'ABEILLES.	24
FIGURE 2-1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PLANTE A CELLULE FIBREUSE	28
FIGURE 2-2 : REPARTITION DES PALMIERS DATTIERS DE L'ALGERIE PAR WILAYA EN 2014.....	31
FIGURE 2-3 : SCHEMA DE PALMIER DATTIER	31
FIGURE 2-4 : SCHEMA D'UNE PALME DE PALMIER DATTIER.	32
FIGURE 3-1 : V.E.R	35
FIGURE 3-2 : COMPOSITE A CHARGEMENT DANS LA DIRECTION DES FIBRES.	39
FIGURE 3-3 : COMPOSITE A CHARGEMENT DANS LA DIRECTION TRANSVERSALE PAR RAPPORTS AUX FIBRES. [36].	40
FIGURE 3-4 : LE VOLUME ELEMENTAIRE REPRESENTATIF DE CHARGEMENT DE CISAILLEMENT	41
FIGURE 3-5 : SOURCES DATA ENGINEERING.	45
FIGURE 3-6 : BIBLIOTHEQUE DES MATERIAUX UTILISES DANS CE TRAVAIL.....	46
FIGURE 3-7 : FENETRE ACP (PRE).	46
FIGURE 3-8 : EPROUVETTES D'ESSAI DE TRACTION ET SES DIMENSIONS.	46
FIGURE 3-9 : GEOMETRIE DE L'EPROUVETTE SUR SOLIDWORKS.	47
FIGURE 3-10 : MAILLAGE SUR ANSYS WB.....	48
FIGURE 3-11 : INTERFACE DE ACP (PRE).	49
FIGURE 3-12 : CREATION D'UN FABRIC.	48
FIGURE 3-13 : CREATION D'UN STACKUP.....	49
FIGURE 3-14 : CREATION DE ROSETTES.....	50
FIGURE 3-15 : CREATION DE ROSETTES.....	50
FIGURE 3-16 : CREATION DU MATERIAU FINAL.	51

FIGURE 3-17 : CONDITIONS AUX LIMITES SUR ANSYS WB.....	52
FIGURE 4-1 : GRAPHE FORCE DEPLACEMENT DES EFPN DE 0% JUSQU' A 100% DE VF	54
FIGURE 4-2 : DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE SOUS L'EFFET D'UNE TRACTION SIMPLE (EFPN 80-90).	56
FIGURE 4-3 : GRAPHE CONTRAINTES-DEFORMATION DES MATERIAUX EFPN.....	56
FIGURE 4-4 : ORIENTATIONS DES PLIS DES STRATIFIES DEVELOPPER.....	58
FIGURE 4-5-A : DIAGRAMME DES DEPLACEMENTS MAXIMAUX DES STRATIFIES. ...	58
FIGURE 4-5-B : DIAGRAMME DES DEFORMATIONS AU NIVEAU DES COUCHES.	59
FIGURE 4-6 : TYPES DU VOLUME REPRESENTATIF SUR MATERIAL DESIGNER.....	60
FIGURE 4-7 : DEFINITION DE LA MATIERE.	60
FIGURE 4-8 : MAILLAGE DU CORPS.....	61
FIGURE 4-9 : CARACTERISTIQUES DU MATERIAU EFPN15 TISSE.....	61
FIGURE 4-10 : TRANSFERT DES DONNEES DE MATERIAL DESIGNER A L'ENGINEERING DATA.	61
FIGURE 4-11 : COURBE FORCE-DEPLACEMENT DES STRATIFIES A DIFFERENTS TYPES DE RENFORCEMENT.	62
FIGURE 4-12 : EXTENSION A LA TRACTION EN FONCTION DU NOMBRE DE PLIS DE MEME EPAISSEUR.....	63
FIGURE 5-1 : COMPARAISON ENTRE LES DENSITES DES DIFFERENTES FIBRES UTILISEES DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE.	67
FIGURE 5-2 : LA PRODUCTION MONDIALE ANNUELLE DE CERTAINS TYPES DE FIBRES NATURELLES.....	68
FIGURE 5-3 : COMPARAISON DU COUT DES FIBRES DE PALMIER PAR RAPPORT A D'AUTRES TYPES DE FIBRES.....	69
FIGURE 5-4 : COMPARAISON DU RAPPORT ENTRE LE MODULE D'ELASTICITE SPECIFIQUE DE LA FIBRE DE PALMIER-DATTIER ET LE COUT D'AUTRES TYPES DE FIBRES.	69
FIGURE 5-5 : STRUCTURE DE LA FACE DU PARE CHOC. [108].....	71
FIGURE 5-6 : STRUCTURE D'ESSAI D'IMPACT.	71
FIGURE 5-7 : FENETRE DE DYNAMIQUE EXPLICITE.	72
FIGURE 5-8 : SECTION EN COUCHES.	72
FIGURE 5-9 : SYSTEME DES COORDONNEES DES FIBRES PAR RAPPORT AU SYSTEME DE COORDONNEES GLOBAL.....	72
FIGURE 5-10 : CONDITIONS LIMITES DES ESSAIS DE L'IMPACT.....	73
FIGURE 5-11 : CONDITION INITIALE DES ESSAIS DE L'IMPACT.....	73
FIGURE 5-12 : HISTORIQUES DES ENERGIES DE L'EPOXY.....	74

FIGURE 5-13 : HISTORIQUES DES ENERGIES DE L'EFPN50.	74
FIGURE 5-14 : COMPARAISON DES HISTORIQUES DES ENERGIES INTERNES (EPOXY- EFPN50).....	75
FIGURE 5-15 : STRUCTURE DEFORMEE DE LA FACE DU PARE CHOC	76

Liste des abréviations

PLA	Acide poly lactique.
ACP	Ansys Composite PrePost.
ν	Coefficient de Poisson.
CFN	Composites à fibres naturelles.
τ_f	Contrainte de cisaillement de la fibre.
τ_m	Contrainte de cisaillement de la matrice.
σ_1	Contrainte dans la direction longitudinale.
σ_2	Contrainte dans la direction transversale.
σ_m	Contrainte de la matrice.
σ_f	Contrainte de la fibre.
ε_1	Déformation dans la direction longitudinale.
ε_2	Déformation dans la direction transversale.
ε_m	Déformation de la matrice.
ε_f	Déformation de la fibre.
γ_f	Distorsion angulaire de la fibre.
γ_m	Distorsion angulaire de la matrice.
ESA	Énergie spécifique absorbée
W	Épaisseur du pli.
EFPN	Epoxy/Fibres de Palmier Dattier.
FPD	Fibre de Palmier Dattier.
P_f	Fraction massique de la fibre.
P_m	Fraction massique de la matrice.
V_m	Fraction volumique de la matrice.
V_f	Fraction volumique de la fibre.
ρ_c	Masse volumique du composite.
E_1	Module de Young dans la direction longitudinale.
E_2	Module de Young dans la direction transversale.
E_m	Module de Young de la matrice.
E_f	Module de Young de la fibre.
G	Module Cisaillement.
OPEFB	Oil Palm Empty Fruit Bunch.
PP	Polypropylène.
PS	Polystyrène.
KLFRT	Thermoplastique renforcé de fibre longues de Kénaf.
MMF	Tissu multiaxial et multi-pli.
UD	Unidirectionnel.
VER	Volume Élémentaire Représentative.
WB	WorkBench.

Introduction Générale

Introduction générale

Au fil des récentes années, les thermoplastiques ont graduellement pris la place des métaux dans une multitude d'applications. La demande commerciale de thermoplastiques augmente malgré la hausse de leur prix, ce qui a poussé les scientifiques à chercher une substance de remplissage dans les thermoplastiques afin de faire baisser leur coût et d'améliorer leurs propriétés.

Le renforcement naturel était alors la première source à viser, en raison des nombreux avantages qu'il présentait par rapport aux renforts inorganiques. Ils sont abondamment disponibles, ont un coût et une densité plus faibles, entraînent une réduction de l'usure des équipements de traitement et sont renouvelables, recyclables, non toxiques et biodégradables.

Pour une telle source naturelle, une très bonne connaissance des propriétés physiques et mécaniques de ces fibres est indispensable, avant qu'elles puissent être utilisées dans divers domaines. Si les travaux de caractérisation ont été suffisamment investis pour certaines fibres telles que le chanvre, le jute et le lin, les études de caractérisation des fibres de palmier dattier ont été considérablement retardées, ce qui a empêché leur exploitation dans divers domaines industriels. Aujourd'hui, les fibres de palmier dattier ont commencé à susciter l'intérêt de nombreux chercheurs en raison de leur disponibilité abondante à un faible coût économique d'une part, leurs performances mécaniques et leur légèreté d'autre part, ce qui a encouragé de nombreux chercheurs à les utiliser dans le développement de matériaux composites biosourcés et suscités un intérêt croissant de la part de nombreux secteurs industriels : transport, l'industrie du bâtiment et de la construction, les produits de consommation et de l'emballage. [1] Cependant, les fibres végétales présentent des inconvénients tels que leur structure anisotrope, un taux élevé d'absorption de l'humidité et leur nature hydrophobe empêche la bonne adhésion avec les matrices polymères. [2,3,4]

L'objectif initial de ce projet était de mener une étude expérimentale sur les fibres de palmier Dattier par leur extraction, élaboration du matériau composite et caractérisation physico-mécanique, mais les conditions sanitaires mondiales avaient rendu cela irréalisable. nous avons donc orienté ce travail vers leur étude et analyse par Eléments Finis.

Dans le contexte actuel, nous proposons d'étudier les caractéristiques des composites biosourcés à fibres longues et unidirectionnelles de palmier dattier. Pour répondre à cette question nous avons tracé les objectifs suivants :

- Calculs des paramètres mécaniques des composites Epoxy/Fibres de Palmier Dattier, par une méthode d'homogénéisation.
- Étude de l'effet de la structure géométriques (Fraction volumique de fibres, Nombre de plis, orientations du renfort...) sur la rigidité des stratifiés à base d'Epoxy et fibres de palmiers dattier.
- Comparaison des fibres naturelles les plus utilisées dans le domaine automobile avec les fibres de palmier dattier, afin d'étudier la possibilité de les introduire dans le domaine de l'automobile durable.

Pour présenter cette étude, le manuscrit de ce projet de fin d'études est articulé en 5 chapitres.

Le premier chapitre est un bilan bibliographique qui consiste à donner des généralités concernant les matériaux composites, leur classification en fonction de plusieurs paramètres, y compris la catégorie du renfort utilisé. En outre, cette présentation vise à démontrer les différents constituants intervenant dans la mise en forme des composites.

Le deuxième chapitre est consacré aux matériaux biocomposites, la classification des fibres végétales, et leurs domaines d'applications. Nous concluons par, une présentation des fibres de palmier dattier et leur importance dans la fabrication des biocomposites.

Dans le troisième chapitre, les caractéristiques des constituants de notre stratifié (Epoxy, Fibres de Palmier Dattier), ont été récoltés des ouvrages de littérature, afin de les utiliser dans le calcul des propriétés du matériau Epoxy/ fibre de palmier dattier par une méthode d'homogénéisation.

Le quatrième chapitre visant à faire des tests par simulation en éléments finis, est constitué de deux parties. En premier lieu, des simulations ont été mené sur notre composite afin d'évaluer sa rigidité face à des changements dans sa géométrie (type de renfort, épaisseur, orientations de fibres... etc.), et les résultats ont été validé par des essais expérimentaux dans le même contexte, figurants dans la littérature.

Finalement, dans le dernier chapitre on a comparées une sélection de fibres naturelles, dans le but d'étudier les avantages de son application dans le domaine automobile durable.

Chapitre 1

Généralité sur les Matériaux Composites.

1 Généralité sur les Matériaux Composites

Dans le but de mieux appréhender ce travail, on donne certaines définitions clés concernant les matériaux composites, leurs classifications sont présentées, selon le type de matrices, la taille et les catégories du renfort. Le développement et l'utilisation des composites biosourcés nécessitent en amont des connaissances sur leur structure et leurs architectures.

1.1 Matériaux composites

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Le nouveau matériau ainsi élaboré possède des performances supérieures à celles des éléments pris séparément.

Il est généralement constitué de deux composants, une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique, et d'une protection appelée matrice qui assure la cohésion de la structure et le transfert de charges entre les renforts. À ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des additifs qui permettent de modifier l'aspect, ou les caractéristiques du matériau. [2,5]

L'intérêt croissant des composites est dû principalement aux possibilités de gain de poids et de réalisation de pièces complexes [6].

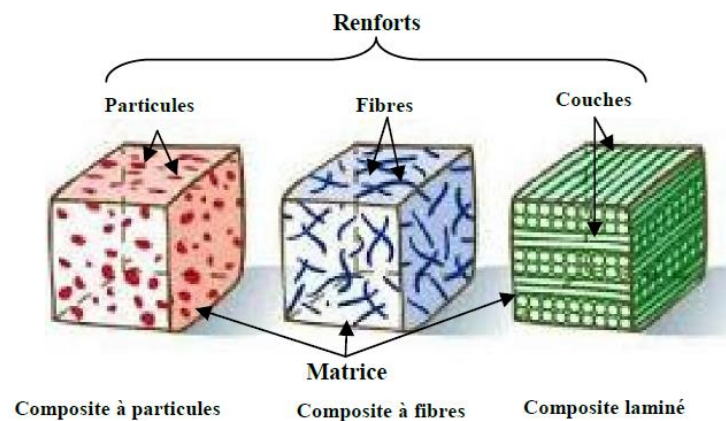


Figure 1- 1: Matériaux composites. [7]

1.2 Caractéristiques générales

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont : [8]

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

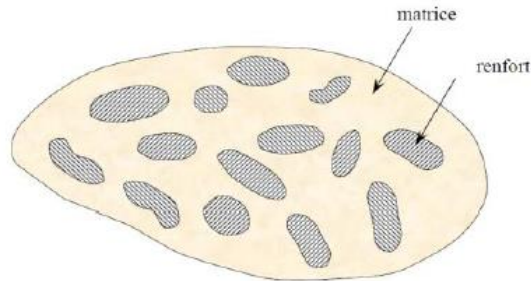


Figure 1- 2: Matériaux composites. [7]

1.2.1 Éléments constitutants des matériaux composites

La liaison entre renfort et matrice est créée pendant la phase d'élaboration du matériau composite.

1.2.1.1 Matrice :

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts. La matrice est généralement homogène et isotrope [8]. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure 1-3.

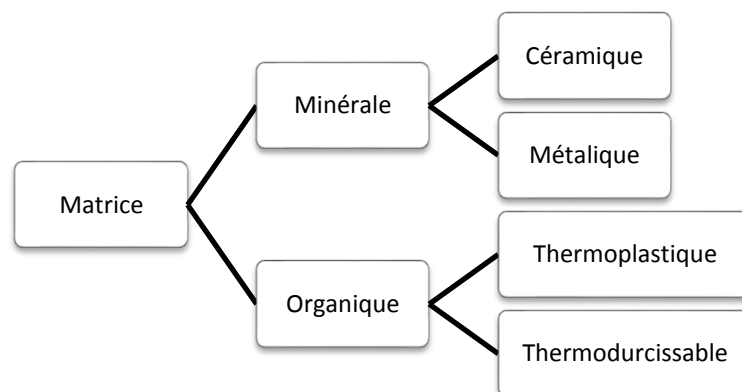


Figure 1- 3: Types de matrice. [9]

1.2.1.1.1 Les divers types de matrices

Les matrices fréquemment utilisées sont les matrices polymères ou naturelles, qui peuvent être modifiés par différents additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc. [7,10]

1.2.1.1.1.1 Matrices polymères

Les résines polymères 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.

- **Les matrices thermoplastiques :**

Résine rendue malléable à la chaleur. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polypropylène et les polyamides.

Tableau 1-1 : Exemple de quelques caractéristiques du polypropylène et le polyamide. [7]

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m³)	900	1140
Contrainte à la rupture (MPa)	20-35	60-85
Module d'élasticité (GPa)	1.1-1.4	1.2-2.5
Température de fléchissement sous charge (°C)	50-60	65-100

- **Les matrices thermodurcissables :**

Résine susceptible d'être transformée qu'une seule fois et qui devient infusible et insoluble après polymérisation. Elles sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites comme les polyesters. [7]

1.2.1.1.1.2 Matrice Naturelle :

La matrice naturelle est composée de polymères d'origine naturelle issus de la transformation chimique de deux ou plusieurs constituants différents, solides et liquides. Les sources d'extraction de la matière solide sont minérales (chaux, argile, enduit), végétales (chimie des sucres ou lipo chimie) ou animales (graisse, os). Les liquides peuvent être des huiles végétales, de l'alcool végétal ou tout simplement de l'eau.

Les industriels se montrent de plus en plus intéressés par l'utilisation de ces matrices naturelles dans la mise en œuvre des éco-composites qui représentent une solution d'avenir et durable pour de nombreux secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, l'ameublement, et l'industrie du sport. [9]

1.2.1.2 Renforts :

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine ; son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres : [8]

- Fibres longues unidirectionnelles (carbone, verre),
- Fibres longues tissées,
- Fibres courtes réparties aléatoirement sans directions privilégiées.

La classification des types de renforts couramment rencontrés est aussi indiquée sur la figure 1-4.

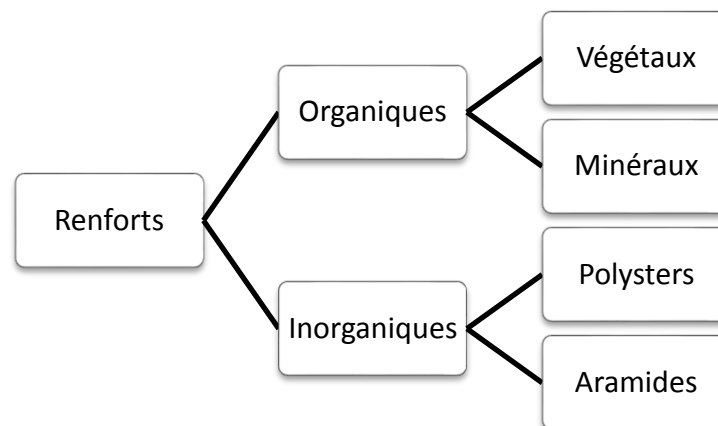


Figure 1- 4: Types de renforts. [9]

Parmi les fibres les plus employées on peut citer :

1.2.1.2.1 Fibres inorganiques

Parmi les fibres inorganiques synthétiques, celles les plus demandées en industrie sont :

- Les fibres de verre
- Les fibres de carbone
- Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées :

1.2.1.2.2 Fibres végétales :

Une fibre végétale est principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines, et de pectines. Elle est isolée ou compose avec d'autres un faisceau. Ces fibres ne manquent pas d'atouts pour la fabrication de matériaux composites alliés aux polymères et trouvent de nouvelles applications dans la plasturgie, le bâtiment et dans l'automobile, elles peuvent être utilisés "comme renfort de polymère en substitution des fibres synthétiques (verre, kevlar, carbone...). [11,12]

- **Remarque :**

Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface. 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.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : [5]

- Sa forme,
- Sa taille,
- La concentration du renfort,
- Disposition du renfort (son orientation), etc.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique, et c'est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, car :

- Une distribution uniforme assurera une "homogénéité" du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure.
- Une distribution non uniforme du renfort : la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

1.3 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites se classifient selon plusieurs critères comme suit :

1.3.1 Classification selon le type de matrice

La classification habituellement utilisée dans ce cas est décrite selon les trois matrices les plus utilisées : [13]

- Les composites à matrice organique CMO,
- Les composites à matrice céramique CMC
- Les composites à matrice métallique CMM.

Mais pour l'impérieuse nécessité de protection de la santé environnementale, des matrices naturelles sont aussi utilisées [14].

1.3.2 Classification selon la catégorie du renfort

La matrice est renforcée avec différentes fibres en termes d'origine ou de forme. Les composites fibreux peuvent être classés en deux catégories selon les fibres avec lesquelles ils sont renforcés : Fibres inorganiques ou Fibres organiques. Ces fibres peuvent exister sous différentes formes (Linéique, Surfaccique ou multidirectionnelle)

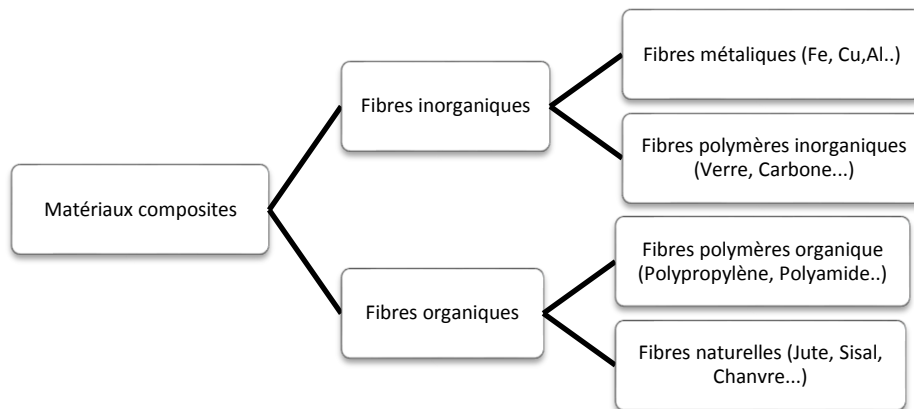


Figure 1- 5: Classification des composites selon la catégorie du renfort. [6]

1.3.3 Classification selon la forme du renfort

La Figure 1.6 présente la classification du composite selon la forme des renforts, que nous pouvons classer en trois familles :

Les composites à fibres : Constitués de fibres continues ou discontinues (fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau. [8]

Les composites à particules : Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux. [8]

Les composites structuraux : Nous pouvons souligner que la troisième famille “structuraux” de cette classification est le résultat de l'intégration des deux premières familles. Ces deux premières familles se différencient à partir de la valeur du facteur de forme qui est égale à la longueur divisée par le diamètre du renfort. [15]

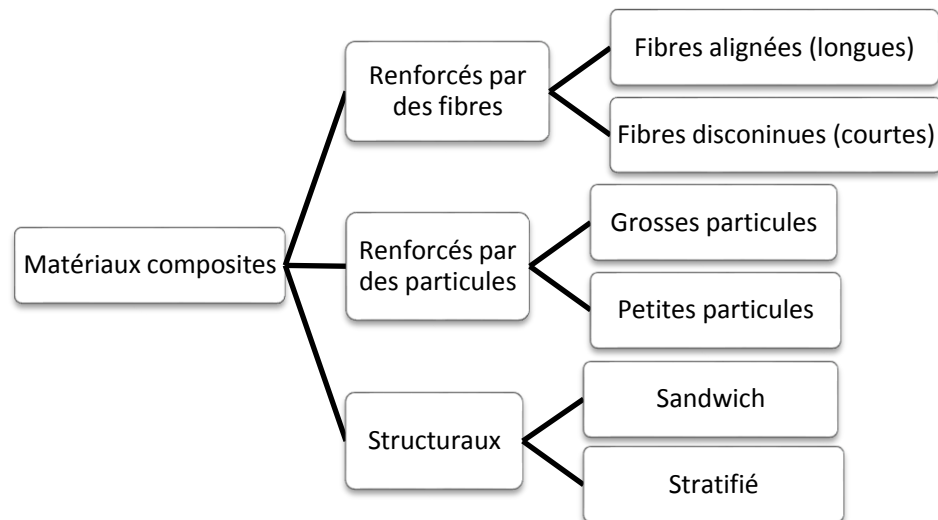


Figure 1- 6: Classification des composites selon la forme des renforts. [6]

1.3.4 Classification selon le marché

Les matériaux composites sont en général scindés en deux catégories ; les composites de Grande Diffusion (GD), les composites Hautes Performances (HP) et les biocomposites..

Les composites de grande diffusion (GD) : ce sont des composites peu coûteux (< 10 à 40 €/kg) qui occupent une large part du marché, représentant 95 % des matériaux composites utilisés. Les principaux constituants de base des composites GD sont les fibres de verre avec des résines polyesters, ils conviennent donc aux applications de grandes séries pour l'industrie des transports. [2,16]

Les composites à hautes performances (HP) : assez onéreux mais dont les propriétés de la structure sont importantes. Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique, l'aérospatial et les sports de pointe (Formule 1...). Les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues principalement en carbone avec des taux de renfort supérieur à 50 %. Contrairement aux composites GD, les composites HP se caractérisent par des propriétés mécaniques plus élevées que celles des métaux. [2,5,16,17]

Les bio-composite : Récemment, l'industrie a été amenée à exploiter des matériaux naturels et à les utiliser pour produire des matériaux composites écologique. Nous pouvons donc rajouter une nouvelle classification des matériaux composites que l'on nomme "bio-composites". Il n'existe pas de définition encore officielle des bio-composites, mais il est maintenant admis que ces matériaux doivent être fabriqués impérativement à partir de ressources naturelles plus ou moins transformées mécaniquement et/ou chimiquement. Les bio composites sont ainsi composés dans le principe de

renforts généralement en fibres naturelles et d'une matrice issue préférentiellement de la biomasse. [18]

1.4 Architecture des matériaux composites

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- Par surface : plaques, coques,
- Par stratification de couches successives.

1.4.1 Stratifiés :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches (appelées parfois plis), de renforts (fils, stratifiés, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines, ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (figure 1.7). [7,8]

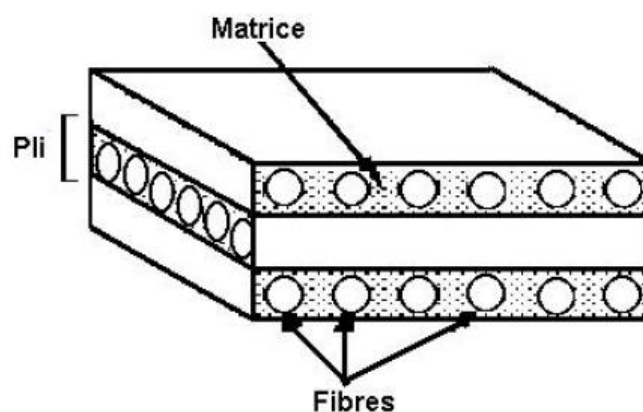


Figure 1- 7: Schéma illustratif d'un matériau composite stratifié. [8]

On a les divers types de stratifiés :

1.4.1.1 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :

Représente un type de stratifié basique. Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche est généralement très faible et dépend de son grammage. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente décalée dans chaque couche à l'autre, afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale. [19]

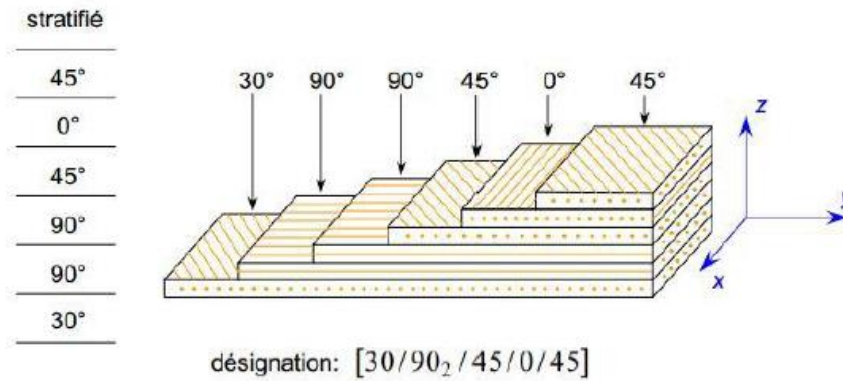


Figure 1- 8: Désignation d'un stratifié. [10]

1.4.1.2 Stratifiés symétriques :

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est un plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives. [9]

1.4.2 Composites sandwiches :

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs, qui est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence.

Les structures sandwichs sont de plus en plus utilisées dans le domaine du transport ferroviaire et dans la construction marine. Comparés aux matériaux traditionnels employés dans ces secteurs industriels, les panneaux sandwichs offrent de nombreux avantages comme une réduction de masse, une liberté de conception et une grande raideur en flexion.

Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure (1.9). [20]

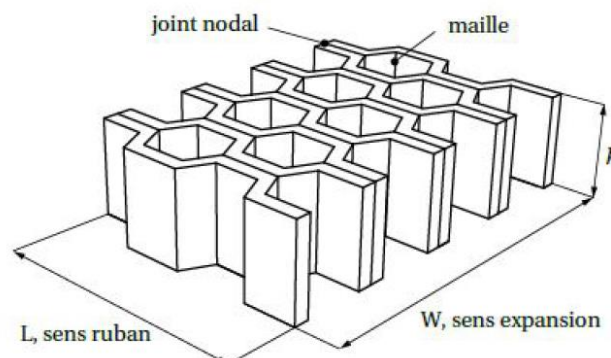


Figure 1- 9: Désignations d'une âme nid d'abeilles. [20]

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique concernant les matériaux composites, dans le but de constituer une base de connaissances qui pourra être utilisée par la suite, dans le choix des différents matériaux nécessaires à la modélisation des éprouvettes.

Nous allons voir à travers ce qui sera présenté, une revue sur les fibres de palmier dattier, leur composition et caractéristiques. Cette partie fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

**Les fibres de palmier
dattier en tant que renfort
pour matériaux composites.**

2 Les fibres de palmier dattier en tant que renfort pour matériaux composites

La disponibilité mondiale et l'image écologique des fibres naturelles, leur prix de plus en plus attractif par rapport aux fibres synthétiques, et un ensemble de propriétés physiques qui ont conduit l'industrie à adopter une attitude favorable à l'égard des renforcements en fibres végétale. Dans le présent chapitre nous présentons des définitions sur les fibres végétales et leurs classifications. Nous nous concentrons plus tard sur la caractérisation des fibres végétales locales du palmier-dattier, la composition de l'arbre et définition de ces différentes parties.

2.1 Matériaux composites biosourcés

La classification des matériaux composites biosourcés est généralement dépendante de la nature du renfort, de la matrice ou des composants réunis. De nombreux travaux sont toujours en cours pour produire des matériaux biocomposites avec un mélange de fibres naturelles et différentes matrices.

Cependant, à ce jour, l'idéalisation des composants généraux et des caractéristiques de ces matériaux est encore insuffisante pour produire des pièces techniques.

2.1.1 Présentation des fibres végétales

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, comme dans l'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Ceci dû à la variété et la multiplicité de leurs propriétés comme leur biodégradabilité et recyclabilité. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges. [4,21]

2.1.2 Classification des fibres végétales.

Les fibres se classifient selon leurs zones d'extraction en :

Les fibres de feuilles : Ce sont des fibres dures et rigides, elles entourent les feuilles pour les renforcer. Les fibres de feuille les plus cultivées sont : la fibre de Sisal, d'Henequen et d'Abaca [6].

Les fibres de tiges : Ce sont des fibres qui donnent une bonne rigidité aux tiges des plantes. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin et de chanvre [6].

Les fibres de bois : Ce sont des fibres courtes, efficace dans le renforcement des ciments. Elles proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. [6]

Les fibres de surface : Elles entourent la surface de la tige, le fruit ou les grains de la plante. Nous citons par exemple le coton et le coco. [6]

2.1.3 Structure morphologie

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. [16]

Les parois cellulaires d'une même cellule fibreuse sont différentes, en raison de la différence de leurs contenu chimique (cellulose, lignine et hémicellulose), leurs épaisseurs et de la différence de l'angle de l'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la fibre. [4]

La Figure (2.1) illustre l'architecture de la plante à la cellule fibreuse.

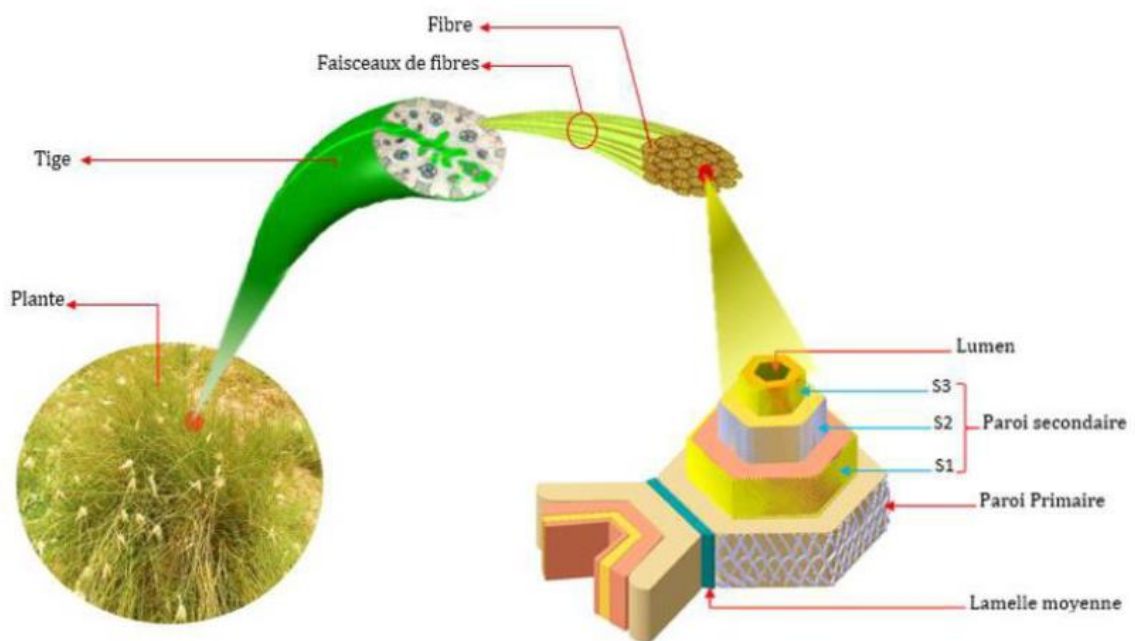


Figure 2- 1: Représentation schématique de la plante à cellule fibreuse [4]

2.1.4 Propriétés et avantages des fibres végétales

Bien que les propriétés physico-mécaniques des fibres végétales soient affectées par certaines conditions de croissance, de climat, d'âge et d'origine végétale, les fibres végétales ont un effet bénéfique sur les propriétés physico-mécaniques du composite. L'utilisation des ressources agricoles et forestières ouvre des possibilités supplémentaires de développement commercial dans les pays qui manquent de ressources en combustibles fossiles.

Cependant, malgré ces nombreux avantages, la fibre végétale a certaines limites à être utilisée et qui sont des inconvénients. Ce n'est pas pour rien que les fibres de verre, de carbone et d'aramide, ainsi que leurs tissus, sont encore les renforts les plus couramment utilisés dans la formulation des polymères. [16,17,22]

Le Tableau 2-1 présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales.

Tableau 2-1: Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [24]

Attributs d'intérêt	Points préoccupants
<ul style="list-style-type: none"> _ Réduire le coût du produit ; _ Diminue la densité du composite ; _ Propriétés mécaniques spécifiques plus élevées ; _ Réduction de la consommation d'énergie et l'émission de pollution lors de la fabrication ; _ L'utilisation de matériaux provenant de sources renouvelables (illimitées) ; _ Nature biodégradable et écologique des fibres ; _ Moins d'abrasivité pour les équipements de traitement. 	<ul style="list-style-type: none"> _ Grande dispersion des propriétés physiques ; _ La structure des fibres végétales est très inhomogène ; _ Les fibres sont courtes ; _ Niveau élevé d'absorption de l'humidité ; _ Instabilité dimensionnelle comme effet négatif de l'absorption d'eau ; _ La sensibilité aux attaques microbiennes et à la moisissure ; _ Température de traitement limitée en raison de la faible température de dégradation des composants chimiques ; _ Adhésion insuffisante et incompatibilité avec la matrice ; _ Dégradation et vieillissement.

2.1.5 Autres domaines d'utilisation des fibres végétales

Les fibres végétales voient leurs applications se développer fortement ces dernières années aussi bien dans l'habitat que dans les transports et les loisirs.

2.1.5.1 Domaine du textile :

Plusieurs fibres végétales sont utilisées dans le domaine du textile [7,25]. A titre d'exemple nous citons les fibres :

- De graine : tel que le coton et le kapok.
- De tige : tel que le lin, le chanvre et le jute.
- De feuille : tel que le sisal et le raphia.

2.1.5.2 Domaine des matériaux composites :

La production de nouveaux matériaux composites à base de fibres végétales est l'un des domaines les plus récemment exploités, où l'usage de fibres naturelles comme renfort de matériaux est souvent associé à une démarche d'éco conception.

Citons donc quelques domaines d'application selon les performances du matériau : [2,26]

- Hautes performances : domaine aérospatial et naval, les satellites, les coques d'avion, etc.
- Moyennes performances : La mécanique automobile, Génie Civil, etc.
- Faibles performances : pêches, sport et électroménager, etc.

2.1.5.3 Domaine automobile :

Concernant le secteur automobile, un véhicule peut contenir plusieurs kilos de chanvre, de lin, voire de sisal ou d'abaca : tablettes arrière, médaillon de porte, dossier de siège. Ces fibres naturelles participent en effet à la réduction du poids des pièces du véhicule. Les composites thermoplastiques chargés de fibres naturelles, plus légers de 20 à 30 % que les fibres de verre, permettent ainsi de réduire le poids des véhicules et les émissions de CO₂. Toutefois, ces matériaux "verts" restent pour l'instant utilisés pour les parties non visibles de la voiture. [12]

2.2 Les fibres de palmier dattier en tant que renfort pour matériaux composites

Parmi les fibres naturelles, ou plus précisément, les fibres agricoles on cite les fibres de palmier dattier qui ont montré des caractéristiques mécaniques très satisfaisantes [21].

2.2.1 Matériaux végétaux du palmier dattier

Dans certains ouvrages le palmier est considéré comme une herbe géante. Sa hauteur varie de 20 à 30m, avec un tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles (les palmes). Les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles. Les fruits du palmier (dattes) sont portés par les grappes. [27]

Selon les données du ministère de l'Agriculture et du développement rural de l'Algérie ; il y a environ 18.4 millions de palmier dattier répartis sur une superficie de plus de 160 milles hectares. Bien que ce patrimoine soit reparti dans 17 wilayas (départements), il se concentre principalement dans les wilayas Sud- Est et Sud-Centre d'Algérie. La wilaya de Biskra est la première région d'Algérie en termes de nombre de palmiers dattiers avec 4,3 millions de palmiers. [6]

La Figure 2.2 montre la répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014.

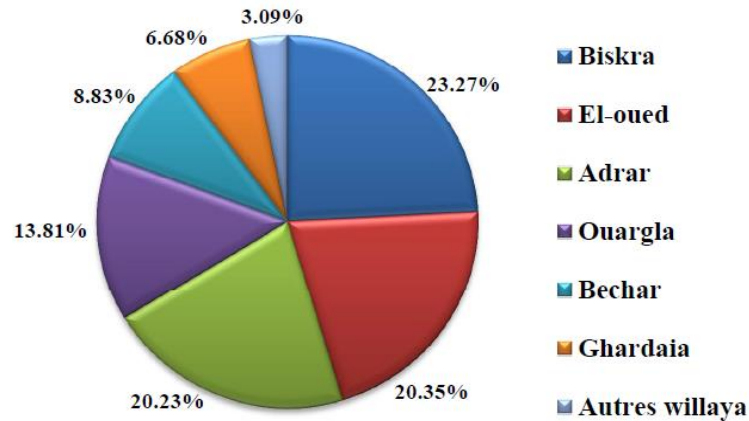


Figure 2- 2: Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014. [6]

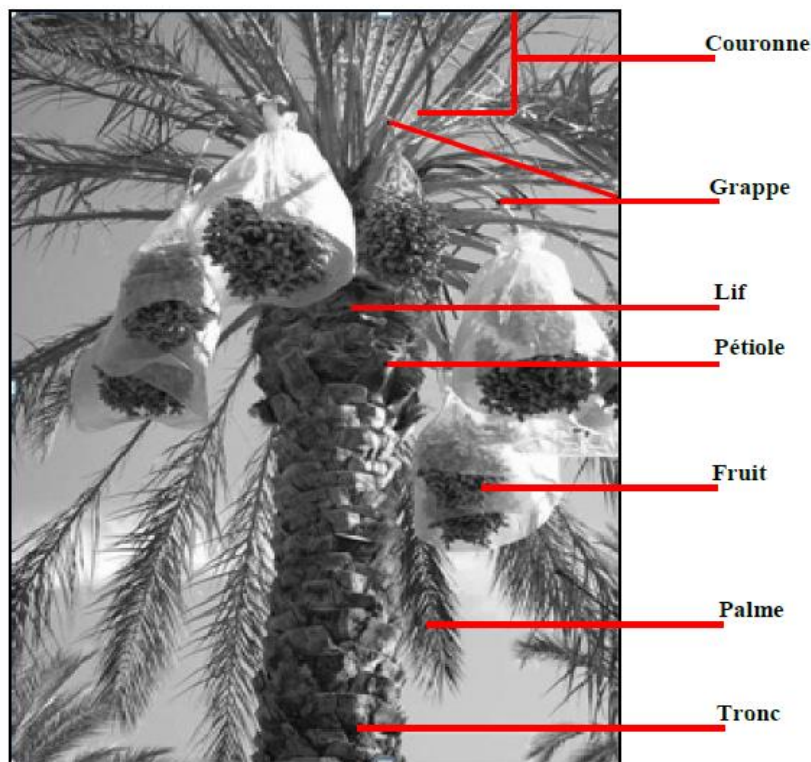


Figure 2- 3: Schéma de palmier dattier [27]

Le palmier se compose principalement de 8 parties :

Racines : Le système racinaire très développé comprend une racine primaire unique et temporaire et des racines secondaires grêles. [28]

Le tronc : Appelé le stipe, est la tige rigide du palmier, qui existe sous forme d'une colonne cylindrique unique sans branche, selon le climat son diamètre est légèrement variable. [27]

La palme : Les palmes appelée localement *Djérid* sont les feuilles du palmier constitués de rachis le long duquel sont déposés des folioles. Elles sont longues de 4 à 7 mètres. L'ensemble des feuilles au sommet du stipe est appelé couronne. [27]

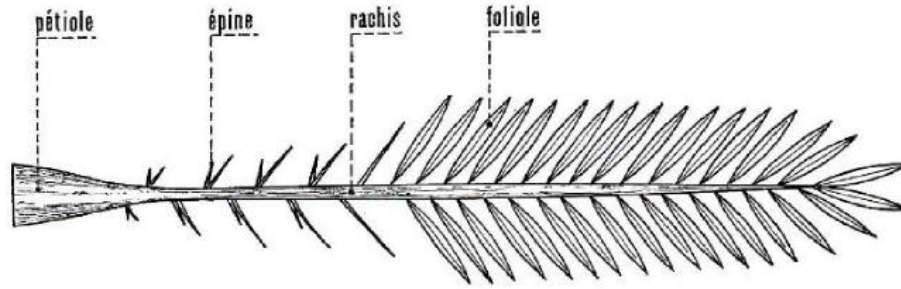


Figure 2- 4: Schéma d'une palme de palmier dattier [27]

Le fruit : La datte est le fruit comestible du dattier. C'est un fruit charnu, de 4 à 6 cm de long, contenant un « noyau » allongé. [29]

Pétiole : Est la partie qui n'est pas garnie de folioles et qui relie la feuille au stipe. Il est semi- cylindrique, épineux vers la base et constamment dur. [30]

Rachis : C'est la partie en prolongement du pétiole jusqu'à l'extrémité de la feuille. [30]

La couronne : Représente toutes les palmes vertes. Dans un palmier dattier mature, on trouve 50 jusqu'à 200 palmes. [27]

Le grappe : Le grappe, appelée régime de dattes, est la partie qui supporte les fruits du palmier, il est accroché par la hampe, qui est tellement résistante. [27]

2.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur les matériaux composites à renforts naturels, dits composites biosourcés, en présentant les éléments les constituants, les fibres végétales et leur avantage.

En effet, les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont utilisés dans plusieurs domaines, et leur utilisation est limitée en dépendance de leurs propriétés.

La partie suivante aura pour but, le calcul par méthode d'homogénéisation les propriétés mécaniques des composites Epoxy/Fibres de palmier dattier.

Chapitre 3
Techniques
d'homogénéisation.

3 Techniques d'homogénéisation

Avant d'envisager l'utilisation de matériaux composites pour fabriquer des structures mécaniques complexes (pièces mécaniques et coques aéronautiques), il est nécessaire de développer des modèles appropriés, pour parvenir à modéliser les comportements mécaniques de ces matériaux. Pour une étude plus réaliste et plus naturelle des matériaux composites on les considère comme des matériaux macroscopiquement homogènes. C'est une technique, connue sous le nom d'homogénéisation, dont il existe de nombreuses méthodes numériques, mais le modèle recherché doit être rapide, facilement applicable et basé sur des définitions physiques pour faciliter l'étape de prédimensionnement. [27,31]

On va donc présenter les techniques d'homogénéisation des matériaux composites et de fournir des résultats sur le composite homogène à partir de la connaissance des caractéristiques mécaniques des constituants et de la disposition des renforts. Les calculs seront développés dans les domaines de comportement élastique.

Dans ce chapitre, on liste quelques méthodes d'homogénéisation des matériaux composites, en donnant des définitions des coefficients à calculer, puis on propose la méthode analytique d'homogénéisation la plus convenable à notre cas, dans le but de déterminer les propriétés mécaniques du matériau composite, constitué d'une matrice Epoxy et renforcé par des fibres longues de palmier dattier.

3.1 **Méthodologie de l'homogénéisation**

L'objectif de l'étude est la mise en place d'un modèle de prédiction des propriétés mécaniques des matériaux composites à partir d'une technique d'homogénéisation. Cette technique nécessite de procéder en trois étapes d'opérations qui sont :

3.1.1 **La représentation**

Cette étape caractérise les différents constituants du matériau composite pour permettre de préciser les échelles macroscopiques et microscopiques du volume élémentaire représentatif. Dans ce dernier, les constituants du matériau composite sont considérés comme des milieux homogène et continu avec des propriétés spécifiques. Le VER est constitué de la matrice est un nombre n de phases relatives aux fibres. Une phase est définie par une famille de fibres ayant les mêmes propriétés mécaniques, la même géométrie, et la même orientation. [27,31]

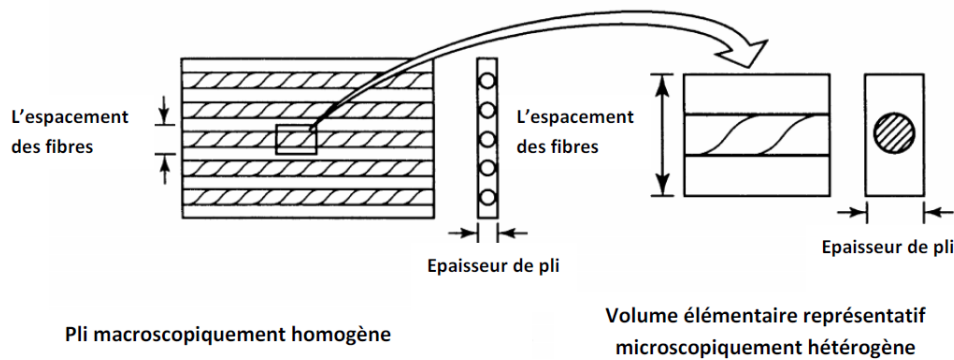


Figure 3- 1: V.E.R [32]

3.1.2 Localisation

Les relations entre les grandeurs microscopiques (σ, ε) et macroscopiques (Σ, ξ) sont obtenues par la résolution d'un problème posée sur le domaine Ω occupée par le VER.

On formule un problème soit de contraintes homogènes (solicitation homogène en contrainte) soit de déformations homogènes (solicitation homogène en déformation) au contour du domaine du V.E.R. [27]

3.1.3 L'homogénéisation

Cette étape permet finalement de déterminer le comportement effectif du matériau hétérogène en effectuant le passage des grandeurs locales aux grandeurs macroscopiques. [27]

3.2 Modèles d'homogénéisation :

Selon la nature du composite plusieurs modèles d'homogénéisations sont développés, sous forme de modèles mathématiques, dont on cite les plus utilisés :

3.2.1 Bornes de Voigt et Reuss

Les approximations de Voigt (1889) et Reuss (1929) ont été obtenues en modélisant les propriétés élastiques (tenseur de rigidité C ou de souplesse S) de matériaux composites.

L'approximation de Voigt considère que les déformations sont uniformes dans le matériau alors que celle de Reuss considère que ce sont les contraintes qui sont uniformes. [7,10]

Les formules 3.1 et 3.2 donnent respectivement le tenseur de rigidité et le tenseur de souplesse en fonction de ceux des composantes des matériaux composites et les fractions volumiques.

$$C_{Voigt} = (1 - f_m)C_m + \sum_{i=1}^n f^i C^i \quad (3.1)$$

$$S_{Reuss} = (1 - f_m)S_m + \sum_{i=1}^n f^i S^i \quad (3.2)$$

3.2.2 Modèle d'Eshelby

Le théorème d'Eshelby (1957) est considéré comme la première méthode d'homogénéisation développée pour les matériaux composites. Son résultat est le fondement de la plupart des approximations de milieux effectifs, qui permettent de déterminer le comportement d'un milieu hétérogène (un matériau contenant des fissures par exemple) en considérant celui-ci comme homogène. La matrice de rigidité estimée par le modèle d'Eshelby est donnée par [33,34,35] :

$$C_{Esh} = C_m + \sum_{i=1}^n f^i (C^i - C_m) : [I + S_{Esh}^i : S_m : (C^i - C_m)]^{-1} \quad (3.3)$$

3.2.3 Modèle auto-cohérent

Dans *ce modèle*, tous les renforts sont supposés noyés dans un milieu dit homogène équivalent, ayant les propriétés effectives que l'on cherche à déterminer. [36]

Dans le cas d'un composite isotrope à n constituants (phases) isotropes, la matrice de rigidité estimée par le modèle auto-cohérent est donnée par :

$$C_{AC} = C_m + \sum_{i=1}^n f^i (C^i - C_m) L^i \quad (3.4)$$

Le tenseur de localisation des déformations pour le renfort « i » s'écrit au moyen du tenseur d'Eshelby (S_{Esh}^i) comme suit : [10]

$$L^i = [I + S_{Esh}^i (C_{AC})^{-1} (C^i - C_{AC})]^{-1} \quad (3.5)$$

3.3 Application de la méthode d'homogénéisation :

Prévoir les constantes élastiques d'un matériau composite avec une technique d'homogénéisation, les caractéristiques de ces constituants et leur distribution sont obligatoirement définis. On choisit d'utiliser la loi des mélanges pour sa simplicité et ses résultats satisfaisants.

Les phases du composite sont définies par des fibres en tant que renfort et une matrice, supposés homogènes, isotropes et linéairement élastiques avec une répartition régulière des renforts, une parfaite adhésion inter faciale et les fibres sont parfaitement alignées. [32]

3.3.1 Propriétés intrinsèques

Peu importe le type de matériau, son comportement mécanique est défini par ses propriétés intrinsèques. Ses propriétés comportent :

Le module d'élasticité : correspond à la réponse en déformation (ϵ) du matériau à une contrainte appliquée de façon perpendiculaire (σ), ou encore à la contrainte nécessaire pour obtenir une déformation voulue. [37]

Le coefficient de Poisson : Le coefficient de Poisson (ν) correspond à la déformation transverse observée lors de l'application d'une contrainte de tension uni axiale. Les valeurs standard de coefficient de Poisson sont situées entre 0 et 0,5. [38]

Le module de cisaillement : C'est la valeur qui correspond à la rigidité d'un matériau dans la direction tangentielle où une contrainte est appliquée (τ). [39]

3.3.2 Comportement du matériau :

Le comportement mécanique relève de la réponse du matériau lorsqu'une force lui est appliquée.

3.3.2.1 Comportement élastique isotrope

Un matériau isotrope est un matériau dont les propriétés mécaniques sont les mêmes, et ce peu importe la direction dans laquelle il est contraint. La définition de ce type de matériau nécessite de donner une valeur à deux des trois inconnues, et la formule suivante lie les trois variables entre-elles : [40]

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.6)$$

3.3.2.2 Comportement élastique orthotrope

Le matériau orthotrope comporte des propriétés différentes dans chacune de ses directions perpendiculaires. Ceci augmente le nombre de variables nécessaires pour le calcul des déformations et des contraintes dans sa matrice de rigidité à 9 variables

Ces coefficients sont calculés de la façon qui suit : [40,41]

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}$$

3.3.2.3 Comportement élastique isotrope transverse

L'isotropie transverse est un type simplifié de matériau orthotrope. Il signifie que dans les directions transverses (soit 2 et 3), les propriétés du matériau sont les mêmes. Ceci mène à l'élimination de quelques variables dans la définition du matériau puisque : [40,41]

$$E_2 = E_3 \quad (3.7)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} \quad (3.8)$$

$$G_{12} = G_{13} \quad (3.9)$$

Ce type de définition correspond parfaitement à un matériau composé de fibres alignées dans une seule direction, ce qui est le type de composite auquel on s'intéresse dans notre étude.

3.3.3 Calcul des coefficients homogénéisés pour un simple pli :

Dans cette partie on considère la direction 1 comme la direction longitudinale, la direction 2 correspondra à la direction transversale et finalement la direction 3 à l'épaisseur.

En admettant que la direction longitudinale est 1, le plan isotopique sera (2,3).

3.3.3.1 Loi des mélanges

Les équations, dites LOI DES MÉLANGES, sont une analyse simplifiée de la distribution des contraintes dans un composite. Ci-dessous figurent quelques hypothèses avant son utilisation : [31]

a) Les fibres sont considérées comme homogènes et parfaitement alignées dans une seule direction sur toute la longueur.

b) Le diamètre d'une fibre est supposé être constant et toutes les fibres sont de même diamètre.

c) Les vides dans les composites produits par les fibres unidirectionnelles sont supposés être nuls.

3.3.3.1.1 Détermination du module dans la direction longitudinal E1

Le pli de notre matériau, est schématisé sous forme d'un mélange de deux matériaux avec un chargement dans la direction longitudinal notée 1.



Figure 3- 2: Composite à chargement dans la direction des fibres. [36]

La charge appliquée dans le sens longitudinal des fibres sera partagée entre les deux constituants du composite : [31]

$$p = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3.10)$$

La déformation longitudinale égale à :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.11)$$

La contrainte appliquée sur l'aire A de la section transversale du composite :

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (3.12)$$

De même, sous l'action de la contrainte, la matrice et la fibre subiront la même déformation :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (3.13)$$

Par conséquent, la contrainte agissant sur l'aire de la section transversale de la fibre sera égale à :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \quad (3.14)$$

Ainsi que la contrainte σ_m qui agit sur l'aire de la section transversale de la matrice :

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (3.15)$$

Par substitution de (3.12) et (3.14) et (3.15) on obtient :

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (3.16)$$

Dont les fractions volumiques de renfort et de la matrice sont :

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad V_m = \frac{A_m}{A}$$

Et la relation précédente devient :

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.17)$$

3.3.3.1.2 Détermination du module dans la direction transverse aux fibres E2

Le pli de notre matériau, est schématisé sous forme d'un mélange de deux matériaux avec une force appliquée la direction transverse notée 2. [31]



Figure 3- 3: Composite à chargement dans la direction transverse par rapports aux fibres. [36]

Par conséquent, la déformation de fibre et de matrice sous l'effet de la contrainte :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (3.18)$$

La contrainte normale au composite σ_2 occasionnée par le chargement, est supposée la même pour chaque constituant :

$$\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m$$

La variation transverse de l'épaisseur du pli est due à celle des constituants. En tenant compte des fractions volumiques correspondantes, on aura :

$$\begin{aligned} \Delta W &= \varepsilon_2 W = V_f W \varepsilon_f + V_m W \varepsilon_m \\ \varepsilon_2 &= \frac{\Delta W}{W} = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m \end{aligned} \quad (3.19)$$

En substitution la relation de déformation (3.18) dans (3.19) ça donne :

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = E_2 \left[\frac{V_f \sigma_2}{E_f} + \frac{V_m \sigma_2}{E_m} \right] \quad (3.20)$$

D'où enfin :

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_f E_f + V_m E_m} \quad (3.21)$$

3.3.3.1.3 Détermination du coefficient de poisson ν_{12} :

En considérant de nouveau le pli composite chargé suivant le sens des fibres. Le coefficient de poisson est calculé comme suit : [31]

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.22)$$

La déformation du composite dans sa direction transversale occasionnée par l'action de la contrainte, sera alors exprimée par :

$$\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_1 = -\nu_{12} \varepsilon_1 \quad (3.23)$$

Et qui se résulte de la déformation des deux constituants suivant les teneurs de volume correspondantes :

$$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta w}{w} = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \quad (3.24)$$

Dont les déformations transverses de la fibre et de la matrice sont écrites respectivement :

$$\varepsilon_m = -\frac{\nu_m}{E_m} \sigma_1 \quad \varepsilon_f = -\frac{\nu_f}{E_f} \sigma_1 \quad (3.25)$$

En tenant compte des relations (3.24) et (3.25) on trouve :

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (3.26)$$

3.3.3.1.4 Détermination de module de cisaillement G_{12} :

Dans le plan du pli, le module de cisaillement G_{12} est calculé en présumant que les contraintes sur la fibre et sur la matrice sont égales. La figure 3.4, schématise la force de cisaillement.

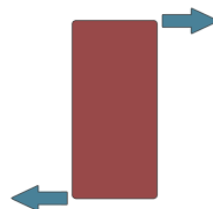


Figure 3- 4: Le volume élémentaire représentatif de chargement de cisaillement [42]

Cette contrainte de cisaillement est supposée la même pour la matrice et pour le renfort :
[31]

$$\tau = \tau_m = \tau_f \quad (3.27)$$

Mais elle entraîne des distorsions angulaires différentes, c'est-à-dire :

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \quad (3.28)$$

D'autre part, la déformation globale du pli composite peut être exprimée par :

$$\Delta = \gamma W = \frac{\tau}{G_{12}} W \quad (3.29)$$

Et la déformation dans chaque constituant est :

$$\Delta_m = V_m \gamma_m W \quad \Delta_f = V_f \gamma_f W \quad (3.30)$$

Supposée le résultat de la déformation :

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_f \quad (3.31)$$

C'est-à-dire :

$$\gamma = \gamma_m V_m + \gamma_f V_f \quad (3.32)$$

En substitution l'équation (3.28) dans (3.32) on trouve :

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{12}} = \frac{V_m \tau}{G_m} + \frac{V_f \tau}{G_f} \quad (3.33)$$

Finalement :

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f V_m} \quad (3.34)$$

3.3.3.2 Caractérisation mécanique du matériau composite :

Le but de cette partie est de calculer les caractéristiques de notre matériau, composé de matrice Epoxy et fibres de palmier, avec les relations déduites précédemment de la loi des mélanges, et cela pour s'en servir dans le chapitre suivant.

3.3.3.2.1 Les caractéristiques des constituants :

Les calculs sont effectués avec des caractéristiques de constituants du matériau EFPN trouvés dans la littérature. Dans cette partie, quelques résultats de travaux expérimentaux ont été résumés.

3.3.3.2.1.1 Fibres :

Le Tableau 3.1 présente une comparaison des résultats de différentes références bibliographiques.

Tableau 3-1: Propriétés mécaniques de fibres de palmier

Références	Type du palmier	Module de Young [GPa]
[6]	Palme Deglate Nour	5.28-23.85
[27]	Différents types de Palmier	3.30-9.86
[43]	Tige Berhi	2.7-5.8
[44]	Fibre de la tige de palmier de Palmyre	8.99
[45]	Fibre de feuilles de palmier-dattier	6.2
[46]	Lif Palmier dattier	1.55-8.25

3.3.3.2.1.2 Matrice :

Le tableau 3-2 donne les caractéristiques mécaniques de la résine vierge résultant de différents essais de tractions :

Tableau 3-2: Caractéristiques mécanique de l'Epoxy

Références	Type d'Epoxy	Module de Young [GPa]
[4]	MEDAPOXY STR	3.30 ± 0.32
[9]	Epoxy G50	2.86 ± 0.32
[6]	Résine Scapa Polymeric 41	0.31 ± 0.01
[45]	Epolam	3.10

3.3.3.2.2 Calcul des caractéristiques du matériau composite :

Pour la caractérisation du composite Epoxy/Fibres de Palmier Dattier (EFPN), on utilise les relations trouvées par la loi des mélanges, grâce à un code de calculs Excel, avec les caractéristiques des constituants citées dans la partie précédente (la moyennes des valeurs

citées dans [6] sont considérés dans ce calcul). Rappelons les relations utilisées dans le calcul [31,47] :

Tableau 3-3: Loi des mélanges.

Constantes	Masse volumique	Fraction volumique	Module de Young	Coefficient de Poisson	Module de cisaillement
Longitudinale	$\rho_c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_m}{\rho_m}}$	Fibres $V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} P_f$	$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$	$\vartheta_{12} = \vartheta_m V_m + \vartheta_f V_f$	$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f V_m}$
Transversale		Matrice $V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} P_m$	$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_f E_f + V_m E_m}$	$\vartheta_{23} = \vartheta_{13} = \frac{\vartheta_{12}}{E_1} E_2$	$G_{23} = G_{13} = \frac{E_2}{2(1 + \vartheta_{23})}$

Les résultats des calculs par Excel, viennent comme suit :

Tableau 3-4: Caractéristiques du composite EFPN calculés par la loi des mélanges.

P_f [%]	P_m [%]	ρ_c	V_f [%]	V_m [%]	E_{c1} [MPa]	E_{c2} [MPa]	E_{c3} [MPa]	ϑ_{c12}	ϑ_{c21}	ϑ_{c13}	G_{c12} [MPa]	G_{c21} [MPa]	G_{c13} [MPa]
0,1	0,9	1,00	0,12	0,87	1456,28	2300,86	2300,86	0,37	0,585	0,37	531,37	725,80	531,37
0,2	0,8	0,97	0,24	0,75	2491,33	1344,94	1344,94	0,34	0,184	0,34	928,14	567,63	928,14
0,3	0,7	0,95	0,35	0,64	3474,40	964,39	964,39	0,31	0,087	0,31	1320,72	443,38	1320,72
0,4	0,6	0,92	0,45	0,54	4409,3	759,91	759,91	0,28	0,049	0,28	1709,17	361,87	1709,17
0,5	0,5	0,90	0,55	0,44	5299,48	632,26	632,26	0,26	0,031	0,26	2093,57	306,42	2093,57
0,6	0,4	0,88	0,65	0,34	6148,08	544,99	544,99	0,24	0,021	0,24	2473,98	266,76	2473,98
0,7	0,3	0,86	0,74	0,25	6957,96	481,56	481,56	0,22	0,015	0,22	2850,46	237,16	2850,46
0,8	0,2	0,84	0,83	0,16	7731,69	433,37	433,37	0,19	0,011	0,19	3223,06	214,29	3223,06
0,9	0,1	0,82	0,91	0,08	8471,65	395,51	395,51	0,17	0,008	0,17	3591,85	196,11	3591,85
1	0	0,81	1,00	0,00	9180	365	365	0,16	0,006	0,16	3956,89	181,34	3956,89

3.4 Le modèle numérique :

L'objectif de la présente partie est de modéliser notre matériau, pour simuler les tests de traction. À une charge statique, l'extension des matériaux peut être utilisée pour comparer leurs rigidités. Pour cela des étapes de modélisation et simulation bien précises ont été suivi.

3.4.1 Engineering Data

Avec l'installation de l'ACP, un nouveau catalogue de matériaux appelé Matériaux composites est disponible dans la base de données. Ce catalogue contient les matériaux typiques utilisés dans les structures composites, comme le carbone et le verre unidirectionnels et tissés, ou les matériaux de base. Cette bibliothèque est modifiable, on peut donc en ajouter des matériaux en spécifiant les paramètres nécessaires.

	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
2	★ Favorites			Quick access list and default items
3	General Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials	<input type="checkbox"/>		General use material samples for use in non-linear analyses.
5	Explicit Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples for use in an explicit analysis.
6	Hyperelastic Materials	<input type="checkbox"/>		Material stress-strain data samples for curve fitting.
7	Magnetic B-H Curves	<input type="checkbox"/>		B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
8	Thermal Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for use in a thermal analysis.
9	Fluid Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for use in a fluid analysis.
10	Composite Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for composite structures.
*	Click here to add a new library		...	

Figure 3- 5: Sources Data Engineering.

Dans le cadre du Workbench de l'ACP (au lieu de la version indépendante de ACP), les matériaux doivent être définis dans le Data Engineering et non dans l'ACP (Pre). Et pour répondre aux exigences de l'ACP, les matériaux de l'ANSYS Workbench ont des propriétés supplémentaires dans la bibliothèque, comme le type de pli.

Pour le cas de ce travail, les matériaux composites à différentes fraction volumiques ont été créé sur le Data Engineering pour les utiliser dans les différents essais.

	A	B	C	D	E
1	Source de données		Emplacement	Description	
6	Matériaux hyper-élastiques	<input type="checkbox"/>		Exemple de données matériau contrainte-déformation pour l'ajustement de courbe.	
7	Courbes magnétiques B-H	<input type="checkbox"/>		Exemples de courbes B-H pour une utilisation spécifique en analyse magnétique.	
8	Matériaux thermiques	<input type="checkbox"/>		Exemples de matériaux pour une utilisation spécifique en thermique.	
9	Matériaux fluides	<input type="checkbox"/>		Exemples de matériaux pour une utilisation spécifique en analyse fluide.	
10	Matériaux composites	<input type="checkbox"/>		Échantillons de matériau spécifiques pour les structures composites.	

	A	B	C	D	E
1	Contenu de My Biblio		Ajouter	Source	Description
2	Material				
3	EFPN10_deg			D:\raya\3 eme	
4	EFPN15_deg			D:\raya\3 eme	
5	EFPN10			D:\raya\3 eme	
6	EFPN100			D:\raya\3 eme	
7	EFPN15			D:\raya\3 eme	
8	EFPN10			D:\raya\3 eme	

	A	B	C
1	Propriété	Valeur	Unité
2	Masse volumique	1030	kg m ⁻³
3	Elasticité isotrope		

Figure 3- 6: Bibliothèque des matériaux utilisés dans ce travail.

3.4.2 Ansys Composite PrepPost (ACP)

L'ingénierie des composites stratifiés implique des définitions complexes qui comprennent de nombreuses couches, matériaux, épaisseurs et orientations. Le défi de l'ingénierie consiste à prévoir les performances du produit fini dans des conditions de travail réelles. Cela implique de prendre en compte les contraintes et les déformations ainsi qu'une série de critères de défaillance. ANSYS Composite PrepPost étant que module d'Ansys WB, fournit toutes les fonctionnalités nécessaires à l'analyse des structures composites en couches.

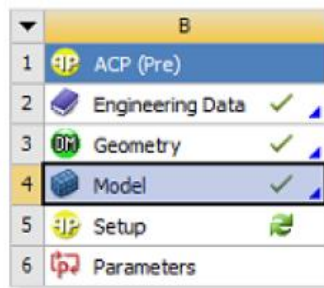
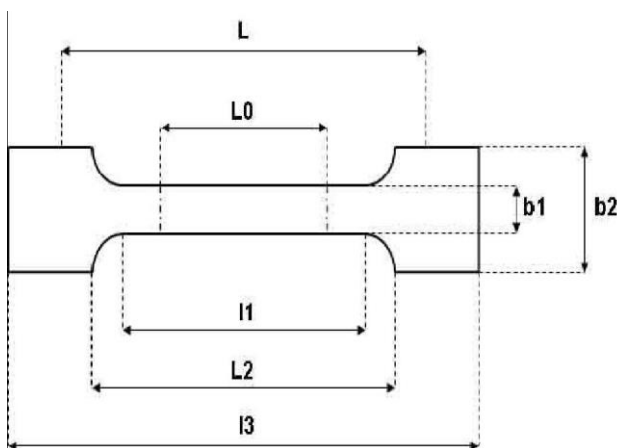


Figure 3- 7: Fenêtre ACP (Pre). [48]

Afin de faire une simulation complète on passe par les étapes suivantes :

6.2.2.1. **Géométrie :**

L'éprouvette en forme d'haltère pour les tests mécaniques de traction a été conçue à l'aide d'un outil CAD (SolidWorks) conformément à la norme NF ISO 527.



Dimensions	[mm]
L	115±4.5
L0	50±2
L1	57±2.25
L2	110±2
L3	165±6.5
b1	13±0.5
b2	19±0.75
e	3.2±0.4

Figure 3- 8: Eprouvettes d'essai de traction et ses dimensions. [27]

Un modèle bidimensionnel de la coque de l'éprouvette a été réalisé sur le logiciel de conception SolidWorks, puis transféré en fichier STEP sur Ansys, et par extrusion en utilisant la méthode d'empilement des plis on obtient un modèle tridimensionnel de l'éprouvette d'essai de traction.

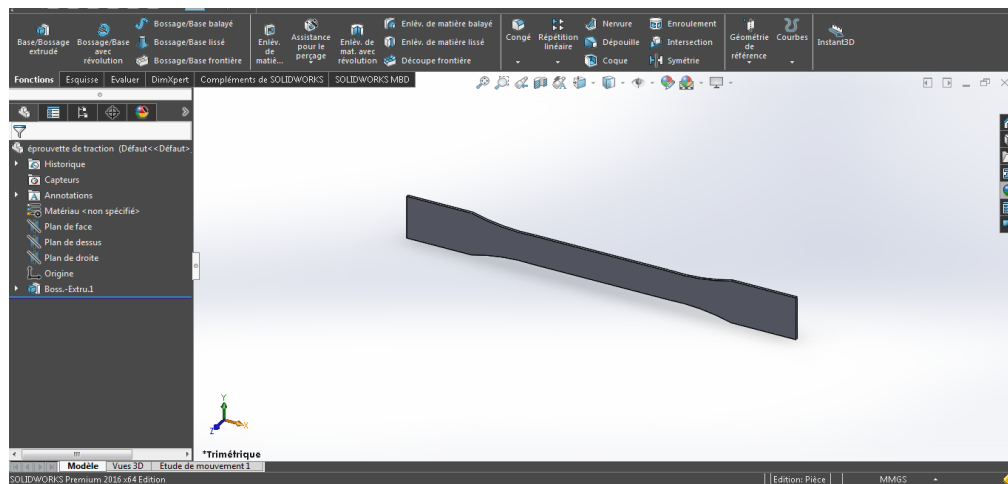


Figure 3- 9: Géométrie de l'éprouvette sur SolidWorks.

3.4.2.1 Modèle :

Dans un but d'analyse du comportement du composite, on procède à une discrétisation du modèle réalisé, en faisant un maillage adapté à la forme de notre éprouvette, avec un effet uniforme et un dimensionnement approprié, qui donne des résultats constants.

Après avoir effectué différents essais avec divers options, un maillage à partir duquel on a des résultats convergents, de type multizone avec des éléments à une dimension de 2mm a été choisi, puis généré, comme suit :

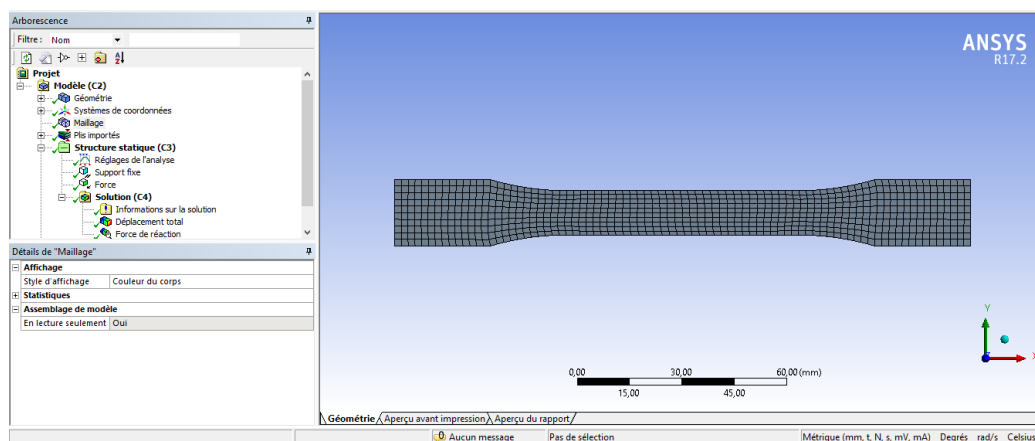


Figure 3- 10: Maillage sur Ansys WB.

3.4.2.2 Setup :

C'est là où le composite est défini, grâce aux différentes options disponibles :

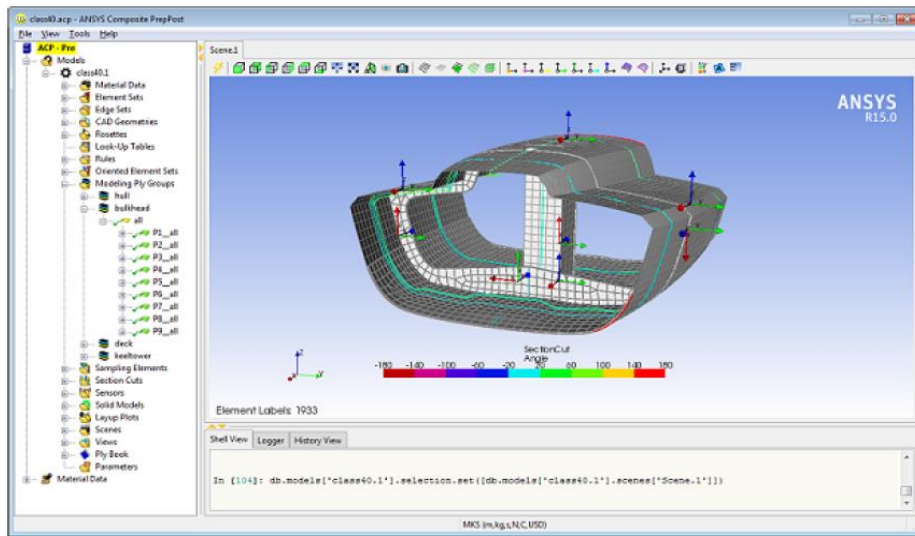


Figure 3- 11: Interface de ACP (Pre). [48]

On commence toujours par définir les plis, par leur matière, leurs épaisseurs et l'orientation des fibres en créant un « fabric » sur la plateforme de l'ACP.

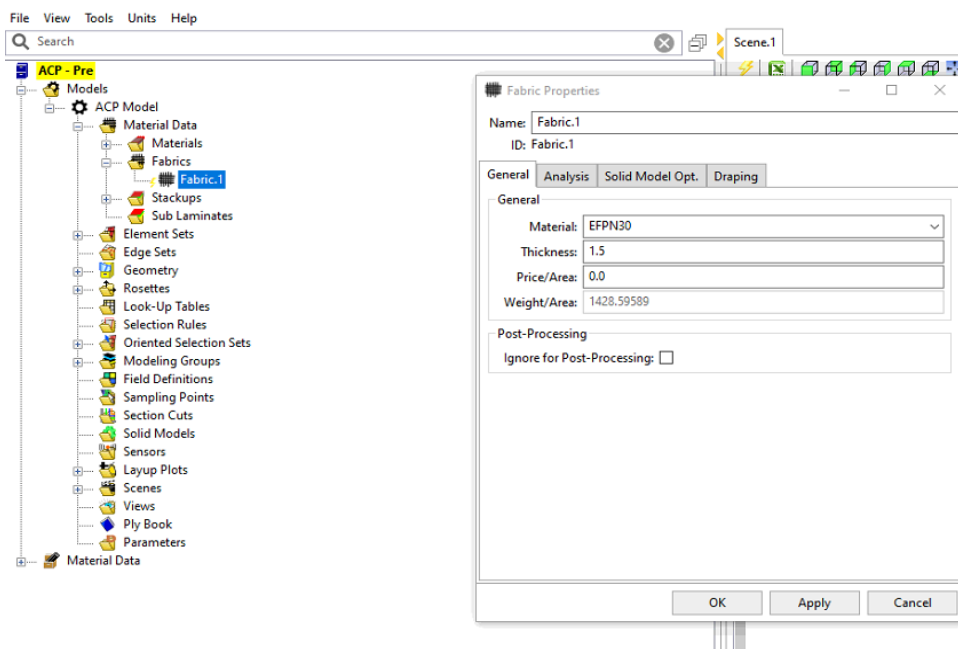


Figure 3- 12: Création d'un fabric.

On peut plus tard passer par la création de stackups qui est un ensemble de plis, qui peut représenter un stratifié ou une peau d'un matériau sandwich. Cette étape n'est pas nécessaire mais elle peut faciliter la tâche dans certains cas.

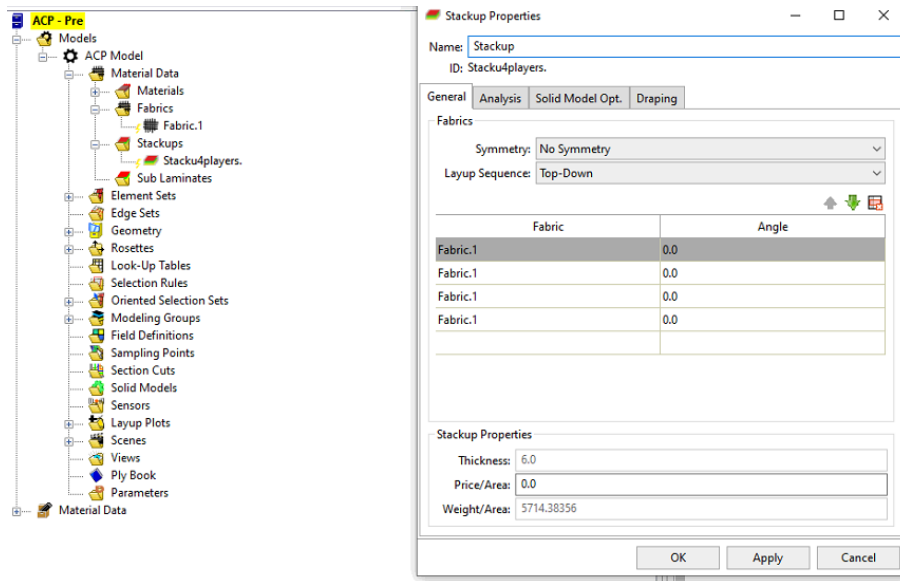


Figure 3- 13: Création d'un Stackup.

Une étape essentielle est de définir une rosettes, qui est un système de coordonnées, défini par un point d'origine au choix, et deux directions (1 qui est la direction des fibres, et 2 la direction transversale).

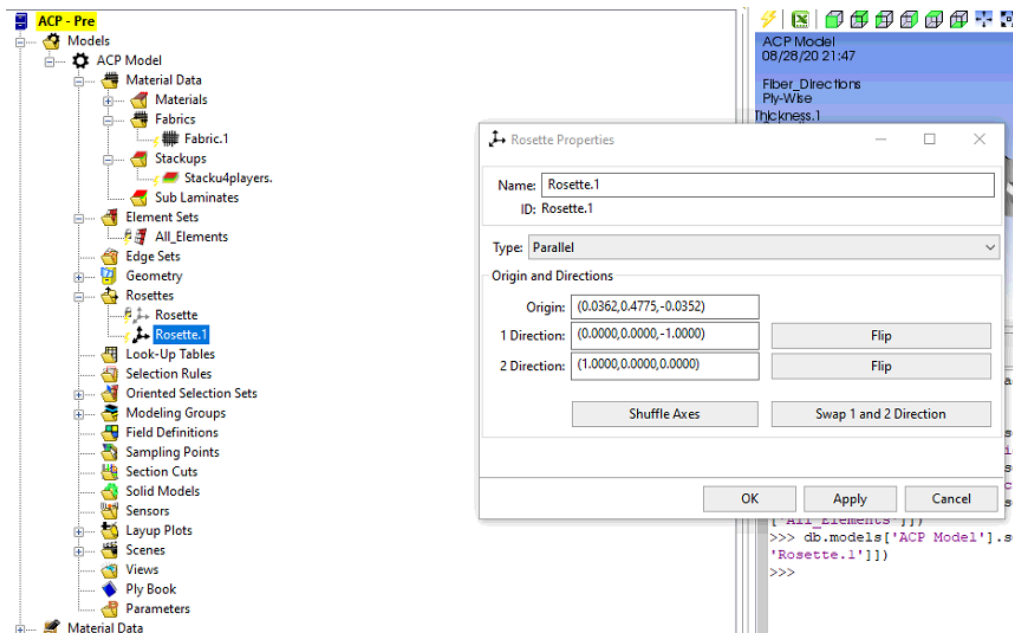


Figure 3- 14: Création de rosettes.

De même on doit définir un Oriented Element Sets, qui est un 2^{ème} système de coordonnées qui montre la direction d'empilement des plis, mais en choisissant les éléments et la rosette auxquels on l'attribut.

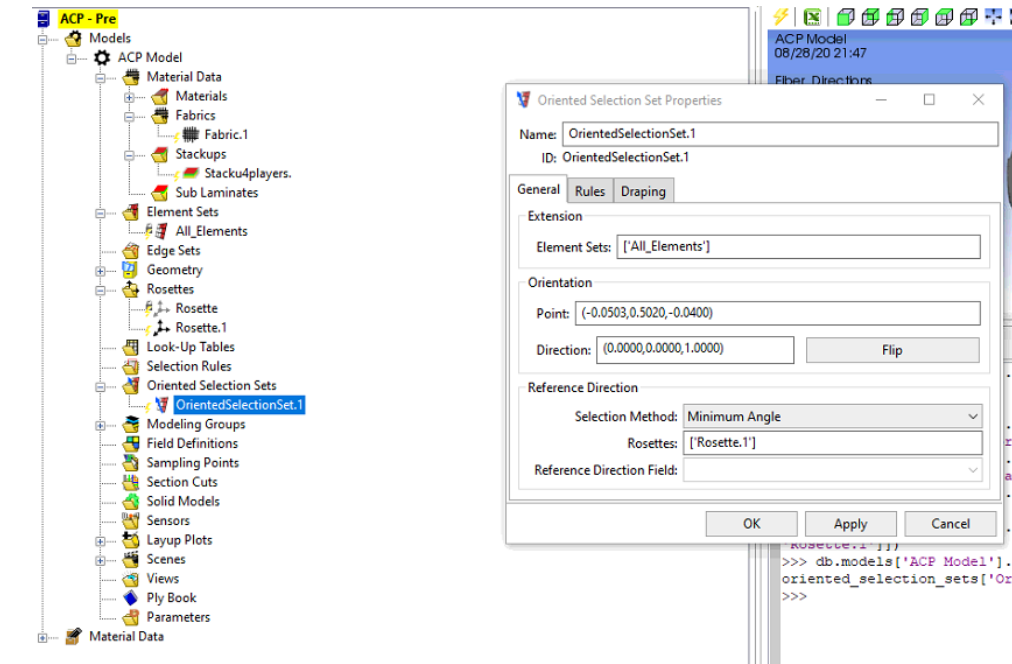


Figure 3- 15: Création de rosettes.

Comme dernière étape on crée des Modeling Plies qui représentent le matériau final de différents plis (fabric et Stackup prédéfinie), leur nombre et orientations (oriented selection).

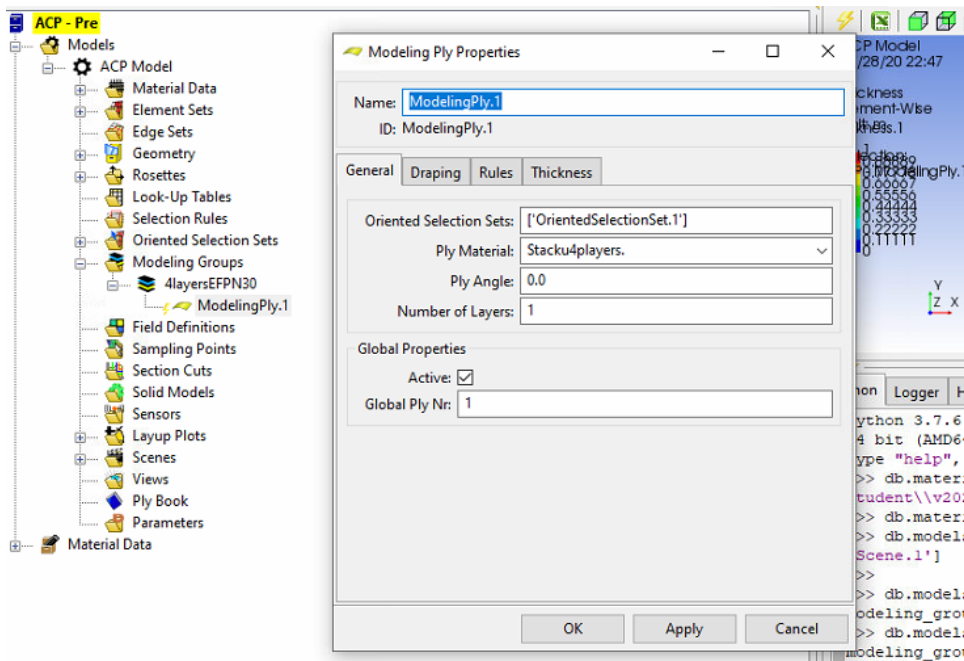


Figure 3- 16: Création du matériau final.

Ce dernier, peut être transféré en tant que données coque (shell model) pour faire objet de tout type de simulation (statique, explicite, vibratoire...).

3.4.3 Structure Statique

Dans le système d'analyse de WorkBench, le module Structure Statique est valable, nous permettant de simuler des essais de traction simple, sur le composite en transférant les données ACP déjà défini. Ensuite, on donne des conditions aux limites, sur la longueur L (figure 3-8), sous forme d'un support fixe d'un côté et d'une force de traction de l'autre, on sélectionne les solutions dont on a besoin, pour résoudre finalement le problème.

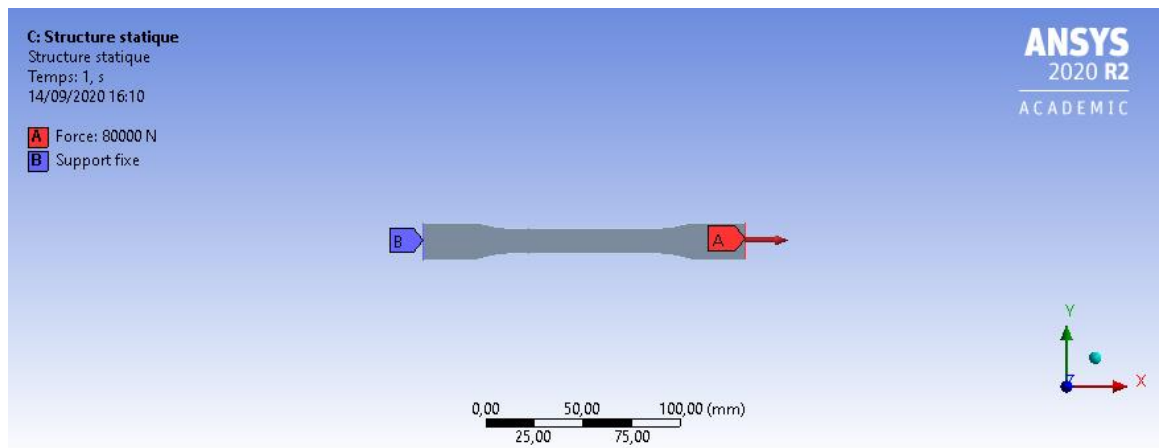


Figure 3- 17: Conditions aux limites sur Ansys WB.

3.5 Conclusion :

L'objectif principal de cette étude analytique a été de déterminer le comportement mécanique d'un matériau composite renforcé par des fibres longues. Un code de calcul sous Excel a été développé, et qui utilise la caractéristique mécanique de la matrice et de fibre pour déterminer les caractéristiques mécaniques du composite par le modèle de Voigt (loi des mélanges).

Les résultats de cette technique nous donnent des paramètres pour différentes fraction volumiques de fibres dans le composite, seront définie comme données de matériaux dans le logiciel de simulation mécanique, afin de simuler leurs comportements sous diverses conditions.

Chapitre 4

Analyse par éléments finis du biocomposite.

4 Analyse par éléments finis du biocomposite.

4.1 Introduction

Une croissance sans pareil dans le domaine des techniques de simulation a ouvert les portes de l'analyse des matériaux composites dans divers environnements. La modélisation et la simulation à l'aide de divers logiciels disponibles permettent d'économiser beaucoup de temps et de matériel ceci en prévoyant leurs comportements sous diverses conditions.

Dans le présent travail, une tentative a été faite pour analyser le comportement à la traction des matériaux composites polymères, dont les caractéristiques en été calculés précédemment, en utilisant la version étudiante du code éléments finis "ANSYS WORKBENCH 2020R2", qui apporte des solutions aux problèmes du monde réel.

4.2 Évaluation de la rigidité du matériau Epoxy / Fibres de Palmier Dattier :

Dans la plupart des applications structurelles, les matériaux doivent avoir une rigidité suffisante pour résister à la déformation dans des conditions de charge normales. C'est pourquoi l'accent est mis sur le comportement charge-déplacement des composites développés. L'effet de l'angle du pli, du pourcentage de fibres, du type de fibres et du nombre de couches sur la rigidité du stratifié ont été étudié.

4.2.1 Effet de la fraction volumique des fibres

La fraction volumique du renforcement (dans ce cas, le palmier dattier) affecte le comportement global des composites. Dans la présente simulation, la loi du mélange a été suivie pour évaluer les propriétés équivalentes du stratifié en supposant une liaison parfaite entre l'interphase des fibres et de la matrice. Il a également été supposé qu'il n'y avait pas de vides dans le composite, négligeant ainsi l'effet de la méthode de traitement.

Ces hypothèses sont réalisables si l'on prend beaucoup de précautions lors du traitement des composites, en ne laissant aucune place aux vides et en fixant des paramètres pour un durcissement correct de la résine conduisant à une bonne liaison interfaciale.

L'objectif de cette simulation était de comparer les déplacements des éprouvettes sous l'effet de traction à force constante 80 kN. Pour cela le matériau conçu est un stratifié à deux couches [0/0], à différentes fractions volumiques de fibres de palmier.

Les résultats ont été rassemblés sous forme d'un histogramme représentant les déplacements totaux maximaux, comme montré dans la figure 4.1 :

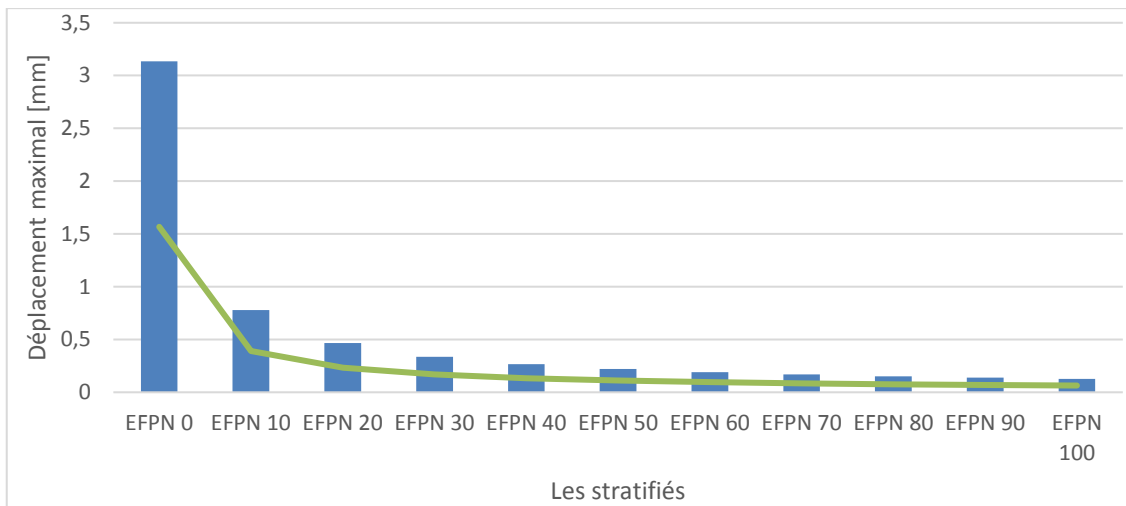


Figure 4- 1: Graphe Force déplacement des EFPN de 0% jusqu'à 100% de Vf.

Le module d'élasticité de l'époxy a augmenté à mesure que la fraction volumique de la fibre de palmier passait de 0 à 100%. Dans la présente simulation, le déplacement total d'une éprouvette d'époxy pure s'est avéré être de 3.14 mm, qui a été réduit à 0.78mm, 0.22mm et 0.13mm pour les matériaux EFPN10, EFPN50 et EFPN100 respectivement. Ce qui montre que le volume des fibres dans le composite influe positivement sur sa rigidité.

On sait que dans la pratique, le taux des fibres testés arrive jusqu'à 60%, cette simulation nous permet juste de voir que la rigidité des matériaux composites renforcés de fibres naturelles accroît avec l'augmentation du taux des fibres, de façon significative jusqu'à 50%, et changent légèrement au-delà. Des résultats similaires ont été rapportés par divers autres auteurs travaillant dans le domaine des composites polymères renforcés de fibres naturelles.

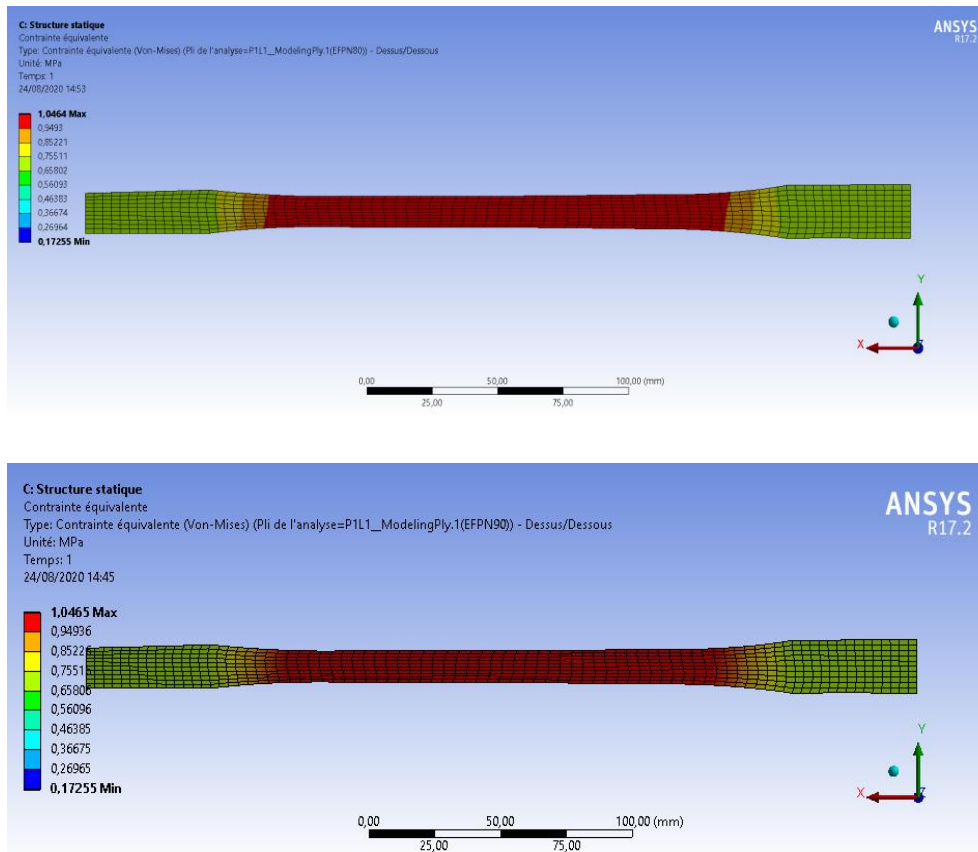


Figure 4- 2: Distribution de la contrainte sous l’effet d’une traction simple (EFPN 80-90).

On voit que la distribution des contraintes sur la figure 4.2, se cumule dans la longueur utile de l’éprouvette haltère, ce qui conduira à une rupture dans cette zone, et c’est là où réside l’avantage des éprouvette haltères.

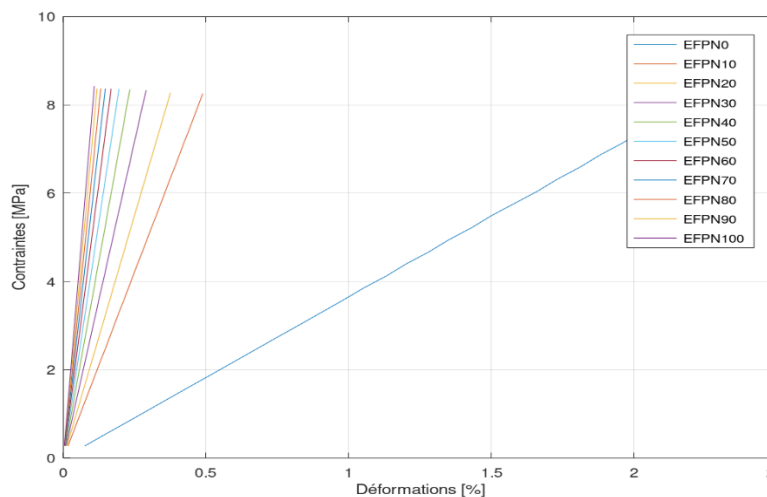


Figure 4- 3: Graphe contraintes-déformation des matériaux EFPN.

Dans la figure 4-3 sous forme d’une illustration qualitative, on peut voir que le rapport contraintes déformation diminue avec l’augmentation de la fraction volumique des

fibres, ceci est dû à l'augmentation de la résistance à la traction et la diminution de l'allongement face à la charge appliquée.

A. Kalam [49] a réalisé des essais de traction unidirectionnelle sur des composites à base de fibres de grappes de fruits de palmier et résine époxy, à deux valeurs différentes des pourcentages volumiques des fibres, à savoir 35% et 55%. Les résultats ont indiqué également une augmentation de 41% à 46% dans la résistance à la traction, avec l'augmentation du rapport de volume des fibres de l'OPEFB, par conséquent une diminution du déplacement.

Cependant, Ngo W.L. et. al [50] ont utilisé la fibre OPEFB (Oil Palm Empty Fruit Bunch) comme renfort pour l'acide poly lactique (PLA) et le polystyrène (PS). Les composites ont été fabriqués à une charge de fibres de 20 %, 40 % et 60 %, et soumis à des essais de traction. Il est rapporté que la résistance à la traction du composite PLA renforcé de fibres OPEFB augmente avec l'augmentation de la charge de fibres jusqu'à 40%, puis diminue avec la poursuite de l'augmentation de la charge de fibres. La forte teneur en fibres aurait tendance à se cumuler dans le composite, ce qui affaibli la liaison entre la fibre et la matrice.

F. Ahmad [51], a développé un modèle tridimensionnel de l'échantillon d'essai de traction en utilisant la version étudiante du code éléments finis Siemens PLM NX 10.0, a vérifié l'effet de la fraction volumique qui variait de 0% à 100%, sur les caractéristiques en traction du composite Epoxy/fibres de Jute, et a conclu que l'augmentation du volume des fibres de jute dans le composite entraîne une augmentation du module d'élasticité et de la résistance à la traction des composites.

4.2.2 Effet de l'orientation des fibres

Cinq stratifiés L1, L2, L3, L4 et L5 ont été développés en utilisant la méthode d'empilement des couches avec différents angles d'orientations des fibres comme le montre la figure 4.4.

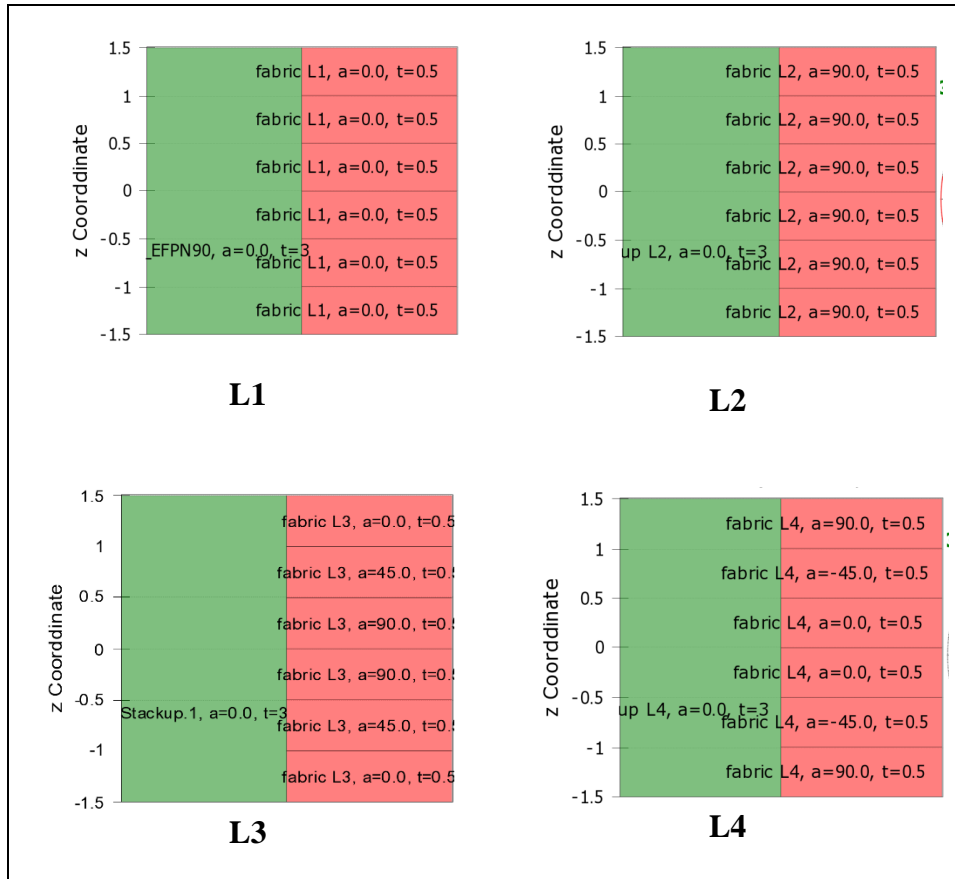


Figure 4- 4: Orientations des plis des stratifiés développer.

La fraction volumique des fibres et la force de traction ont été maintenues constantes (40% et 80kN respectivement) pour tous les stratifiés et les essais de simulation. La figure 4-5 montre les résultats de la simulation, l'extension maximale en traction des cinq laminés.

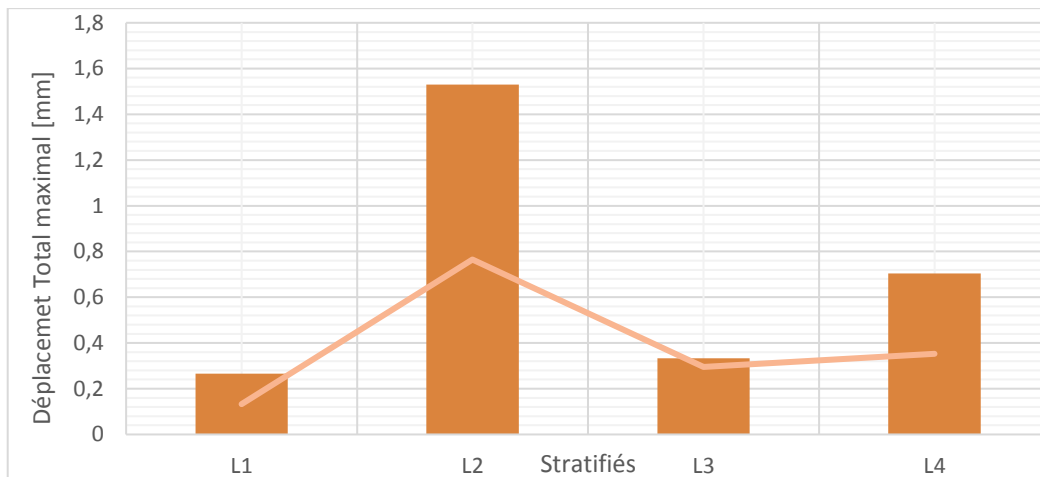


Figure 4- 5-a: Diagramme des déplacements maximaux des stratifiés.

Les résultats de la simulation ont montré que le laminé L1 présentait une meilleure résistance à la traction par rapport aux autres composites ayant des orientations différentes. La rigidité la plus faible correspond au stratifié L2, avec la plus grande valeur d'extension,

ce qui prouve qu'une bonne résistance à la traction nécessite une orientation de fibres dans la même direction que la force appliquée.

Entre les stratifiés L3 et L4, on remarque que l'insertion des couche à 0° à la surface augmente considérablement la rigidité du matériau. Car si on remarque dans la Figure 4-5-b, la déformation de la première couche influe sur la déformation des couches suivantes, à force que la résistance de la couche surfacique augmente la résistance du matériau augmente.

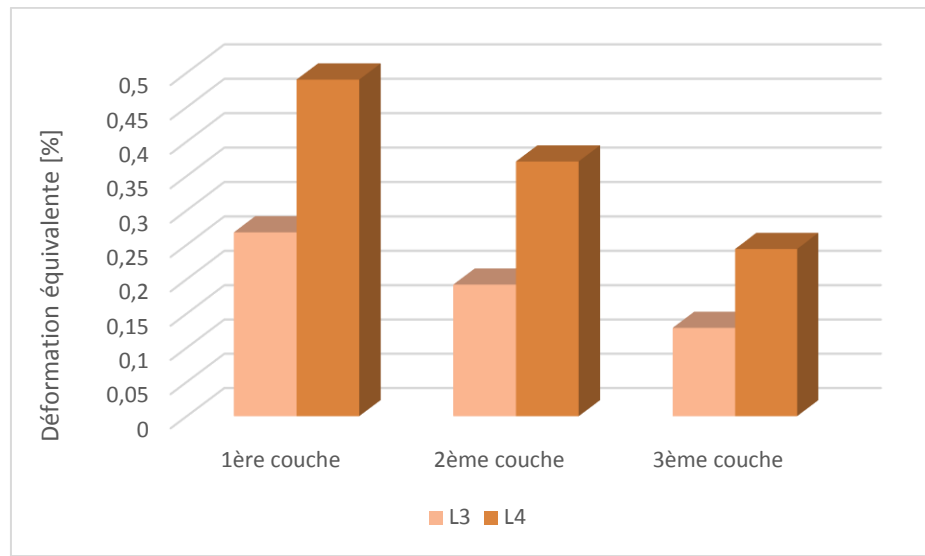


Figure 4- 5-b : Comparaison des déformations au niveau des couches.

C.S. Hassan [52] a réalisé une étude sur les caractéristiques à la traction d'un composite, où les fibres OPEFB à alignement unidirectionnel ont été incorporées dans l'époxy. L'enquête a été menée pour une orientation des fibres de 0° , 45° et 90° . Les résultats ont montré que plus l'angle d'orientation des fibres est faible, plus la résistance à la traction du composite est élevée. Cela montre que les composites dont les fibres sont orientées à 90° sont les plus faibles car lorsque la tension de la force est perpendiculaire à la direction des fibres il faut moins de temps pour les déformer et éventuellement les casser.

Hossain et al [53] ont étudié l'effet de l'orientation des fibres sur les propriétés de traction des composites époxy/jute. Les auteurs ont fabriqué trois stratifiés différents avec des orientations de plis ($0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$), ($0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/0^\circ$) et ($0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$) avec une fraction de volume de fibre constante. Ils ont observé que l'orientation de la couche affecte les propriétés mécaniques des composites. Le module de Young du premier stratifié s'est avéré environ 25 % plus élevé que celui des deux autres stratifiés. F. Ahmad [51], a validé ces

résultats avec le même type de fibres par une simulation avec un code Siemens, les laminés conçus ont montré un comportement similaire, à celui remarqué en expérimental.

4.2.3 Effet du type de renforcement

Des fibres de palmier sous différentes formes (bidirectionnel, unidirectionnel, fibres courtes aléatoires) ont été utilisées comme renfort et étudié par simulation d'un essai de traction, en maintenant la fraction volumique de la fibre à 15%.

Pour le composite à fibre unidirectionnel (UD) les propriétés sont calculées par la loi des mélanges, ceux à fibre courtes aléatoires sont pris des résultats expérimentaux présent dans la littérature [6], et finalement, pour ceux des fibres bidirectionnelles sont calculés à l'aide du module d'Ansys WB, **Material Designer**.

Sur Material designer on peut définir le type du composite, et spécifier la matière dont il est composé (les fibres et la matrice).



Figure 4- 6: Types du volume représentatif sur Material designer.

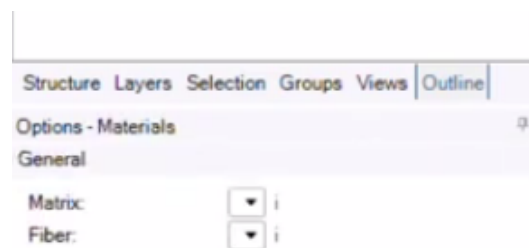


Figure 4- 7: Définition de la matière

Après le maillage, on procède sur la géométrie, où on précise la fraction volumique des fibres à 15%, des mèches de fils à 65%, espacement du fil à 1mm et épaisseur du tissu à 0.2mm.

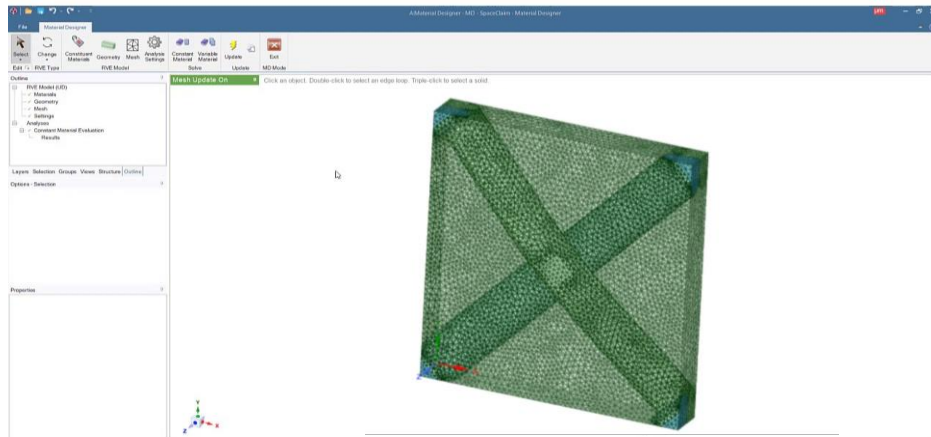


Figure 4- 8: Maillage du corps.

Comme étape finale, on donne un nom au matériau et choisi les résultats qu'on cherche (constantes du matériau) et on met à jour le projet. Material designer donne alors les résultats comme suit, représentant les caractéristiques du matériau EFPN15 tissé.

Nom	Valeur	Unité	P
Constantes d'ingénierie			
E1	7,1757E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
E2	7,1757E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
E3	1,0024E+09	Pa	<input type="checkbox"/>
G12	6,1535E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
G23	2,134E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
G31	2,134E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
nu12	0,61927		<input type="checkbox"/>
nu13	0,17907		<input type="checkbox"/>
nu23	0,17907		<input type="checkbox"/>
Masse volumique			
rho	259,78	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>
Angle de fibre du tissu			
phi	45	degree	<input type="checkbox"/>

Figure 4- 9: Caractéristiques du matériau EFPN15 Tissé.

On transfère les résultats précédents sur Data Engineering, afin de pouvoir effectuer un test de traction sur une éprouvette en EFPN15 Tissé.

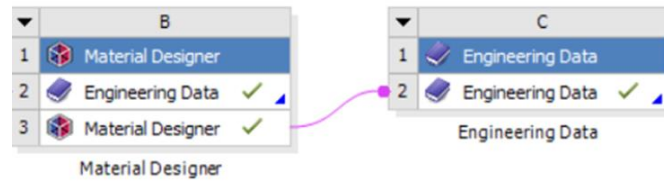


Figure 4- 10: Transfert des données de Material Designer à l'Engineering Data.

Des conditions similaires aux essais de traction précédents (Support fixe, et Force de traction 20kN), ont été menées sur les trois stratifiés à différents types de renforcement. Les résultats sont présentés dans la figure 4-11 sous forme d'une courbe Force-Déplacements.

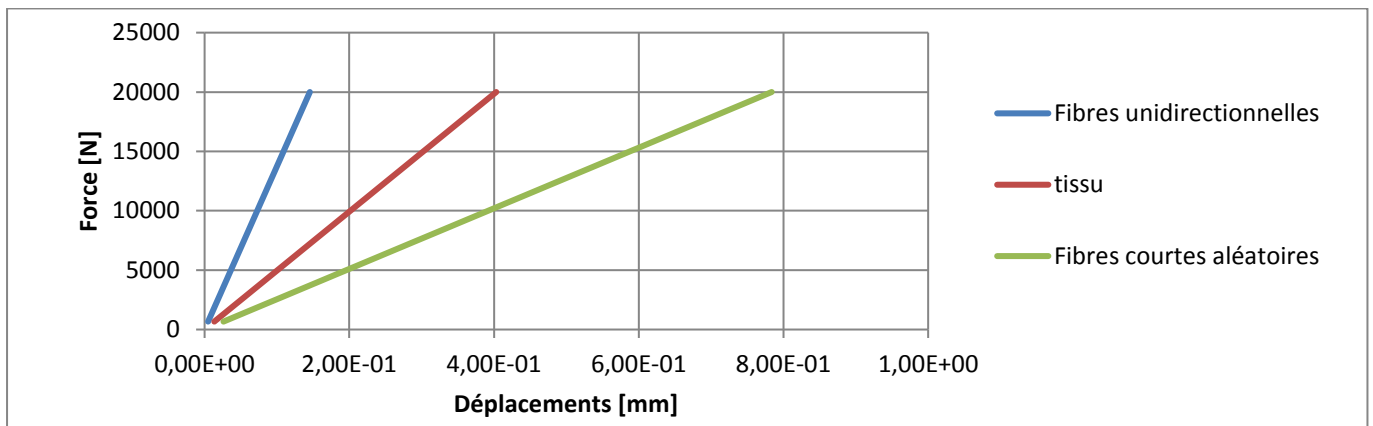


Figure 4- 11: Courbe Force-Déplacement des stratifiés à différents types de renforcement.

Les stratifiés de fibres unidirectionnelles ont offert une plus grande résistance à la charge de traction axiale dans la direction longitudinale que les autres composites pour la même fraction volumique de renfort. Un tissu de la même fraction volumique offrait une résistance inférieure à celle d'un stratifié époxy renforcé unidirectionnel. Le stratifié renforcé par des fibres aléatoires courtes a montré le déplacement le plus élevé.

Divers autres auteurs ont également étudié l'effet de la géométrie et du type de fibres sur les propriétés mécaniques des composites polymères renforcés de fibres naturelles.

A. A. Wazzan [54] en étudiant les composite à base de polyester et de fibres de palmier dattier, a trouvé que la résistance à la traction du composite préparé avec une structure de renforcement tissée a une valeur inférieure par rapport aux composites de renforcement unidirectionnels, car dans la structure tissée, la moitié du pourcentage de la fraction volumique du renforcement est en position transversale et donc, elle ne transfère pas autant de charge que les échantillons composites unidirectionnels.

Eksi et al [55] ont comparé le module de traction et d'autres propriétés mécaniques des composites à base d'époxy renforcés de fibres unidirectionnelles et tissées. La résistance à la traction du composite avec des fibres de verre unidirectionnelles orientées dans le sens de la charge s'est avérée 8,3 fois plus élevée que celle des composites renforcés par des fibres de verre tissées. Les auteurs ont conclu que les propriétés mécaniques des composites avec des fibres unidirectionnelles dans la direction de chargement présentent un module plus élevé que les composites avec des fibres tissées.

4.2.4 Effet du nombre des plis

Le nombre de plis d'un stratifié influence directement la résistance mécanique du composite en raison de l'augmentation de l'épaisseur. Dans la première simulation, une seule couche de 0,5 mm d'épaisseur a été testée dans le sens longitudinal. De même, le nombre de plis a été porté à quinze. Une charge statique de 80 kN a été appliquée à une extrémité de l'éprouvette tout en maintenant l'autre extrémité fixe.

L'extension maximale de la traction des éprouvettes a été enregistrée à partir des résultats de la simulation comme référence de rigidité. La figure 4-12 montre l'extension en traction de quinze stratifiés ayant chacun un nombre de plis différent.

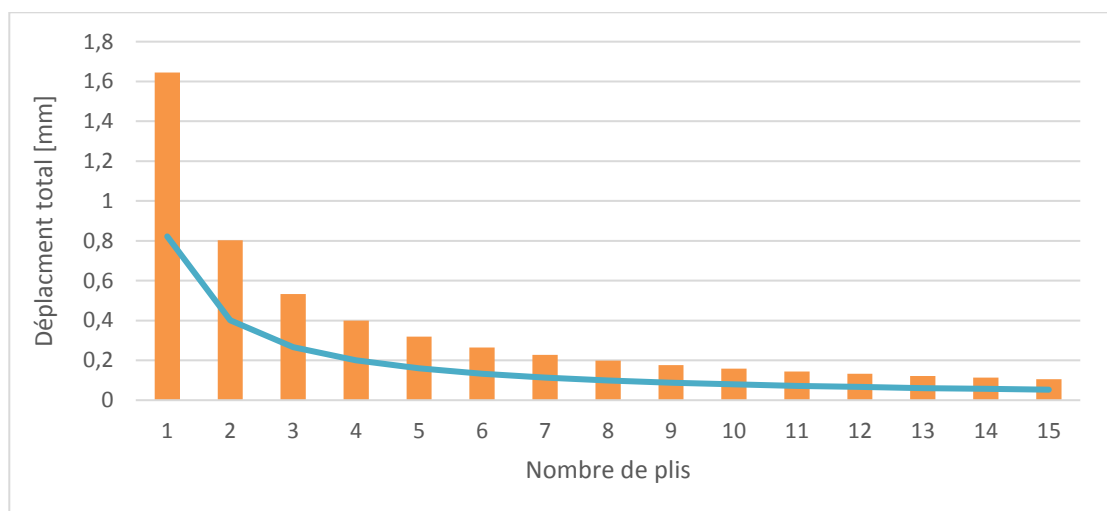


Figure 4- 12: Extension à la traction en fonction du nombre de plis de même épaisseur.

Il a été conclu à partir des résultats qu'à mesure que le nombre de plis passait de 1 à 8, la résistance des stratifiés augmentait rapidement. De la 8ème à la 15ème couche, la résistance des éprouvettes à la charge de traction augmente, mais pas de manière significative.

H. Rahmani et al [56] visaient à étudier les effets du nombre de plis sur les propriétés mécaniques des composites MMF (Multi-axial multi-ply fabric). Ils ont montré que le nombre de plis n'a pas eu une grande influence sur les propriétés mécaniques des composites MMF, seulement un changement modéré des valeurs d'allongement à la rupture.

M. A. Kounain [57] a étudié l'effet de la séquence et de l'épaisseur de l'empilement des plis dans des stratifiés composites renforcés de fibres de verre. Les laminés à 8 couches avec une orientation de 0° , ont présenté la plus faible résistance à la traction, la plus faible déformation à la rupture et le plus faible module de tous les laminés testés. Plus le nombre de couches augmente, plus l'épaisseur augmentait et avait un effet significatif sur l'amélioration de la résistance à la traction.

La principale étude d'Anik Das Anto et al [58], consistait à évaluer l'influence du nombre des plis sur les propriétés de traction des composites hybrides modélisés sur Abaqus. Il a été remarqué que lorsque le nombre de plis augmente, la valeur de la rigidité augmente, la résistance à la traction est également augmentée.

4.3 **Conclusion :**

D'après les simulations des essais de traction sur Ansys Workbench (ACP et Structure Statique), on peut conclure que :

- La rigidité des stratifiés augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres, conclue à partir de simulations basées sur des calculs par méthodes d'homogénéisation, qui assume une parfaite interaction Fibres-Matrices.
- Le test de traction simulé sur des composites à différentes orientations de fibres, a montré que les composites ayant plus de plis alignés en direction longitudinale ont les meilleures résistances à la traction. De même pour le matériau tissé à 45° , et encore moins celui en fibres courtes aléatoires, qui sont plus fragiles que le composite en fibres unidirectionnel dans la direction de la charge appliquée.
- Le dernier test montre l'effet de nombre de plis sur la résistance des composites, qui augmente de manière très significative jusqu'au composite à 8 plis, puis ne varie presque plus.

Chapitre 5

**Le potentiel des fibres de palmier
dattier dans l'industrie
automobile durable**

5 Le potentiel des fibres de palmier dattier dans l'industrie automobile durable

Dans cette partie, la possibilité de la mise en œuvre des fibres de palmier-dattier dans des composites polymères renforcés de fibres naturelles (CFN : composites à fibres naturelles) pour l'industrie automobile durable a été évoquée. Pour garantir le potentiel et la compétitivité de la fibre de palmier dattier (FPD) dans le développement de la durabilité de l'industrie automobile, plusieurs comparaisons entre la FPD et d'autres types de fibres couramment utilisées dans cette industrie ont été effectuées.

Tableau 5- 1: Les données recueillies sur les fibres naturelles utilisées dans cette étude. [3,51,59,60,61,62,63,64,65]

Types de fibres	Palmier Dattier	Jute	Coco	Chanvre	Sisal
Densité [g/cm ³]	0.43-0.79	1.46	1.15-1.46	1.4-1.5	1.33-1.5
Longueur [mm]	10-50	50-300	20-150	5-55	900
Diamètre [μ m]	330-810	35-140	10-460	25-500	8-200
Module spécifique (GPa/g.cm ⁻³)	15	10	4	40	17
Production mondiale annuelle (10 ³ ton)	4200	3392	100	214	378
Prix par masse (USD/kg)	0.02	2.20	0.30	1.20	1.00

5.1 Critères de comparaison

Les critères de comparaison pris en considération dans cette étude (densité, disponibilité, coût...) sont parmi les caractéristiques les plus demandés dans le domaine automobile.

5.1.1 Densité

Une des caractéristiques les plus recherchées dans les fibres naturelles, car elle permet non seulement de réduire le poids, mais aussi de rendre les fibres naturelles compétitives par rapport aux fibres synthétiques.

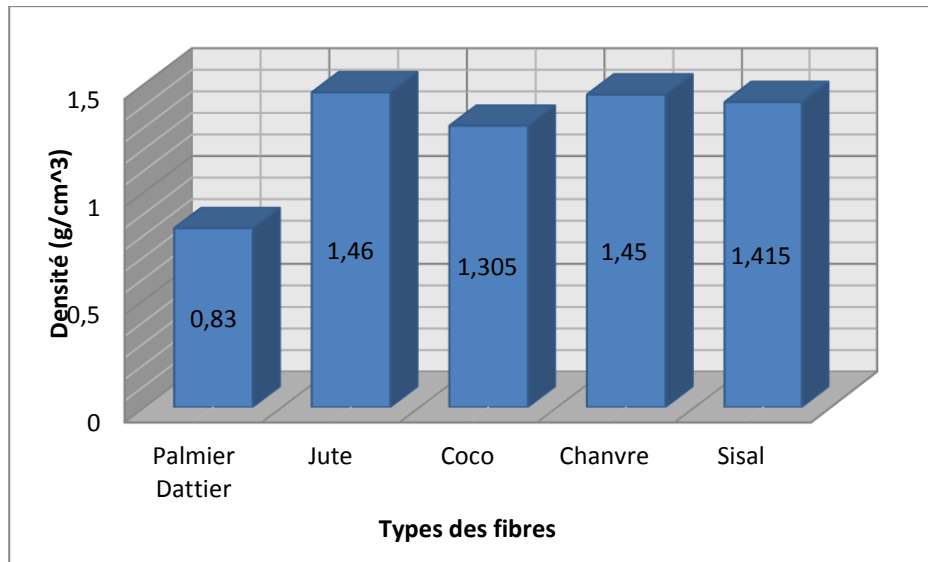


Figure 5- 1: Comparaison entre les densités des différentes fibres utilisées dans l'industrie automobile.

La comparaison est basée sur les valeurs moyennes rapportées dans la littérature et présentées dans le tableau 5-1. Il apparaît que la fibre de palmier dattier a bien la plus faible valeur de densité, ce qui conduit à un poids plus faible dans les composites et la rend très adaptée à l'industrie automobile. Ce résultat contribue à réduire la consommation d'énergie requise pour les véhicules produits à base de matériaux FPD-CFN, et augmente ainsi la durabilité de cette industrie.

5.1.2 Disponibilité des fibres naturelles.

La disponibilité est l'un des facteurs critiques qui affectent l'utilisation des fibres naturelles dans l'industrie. La production annuelle de fibres naturelles brutes varie d'un type à l'autre et d'une période à l'autre.

Une comparaison entre les productions annuelles de fibres naturelles est présentée à la figure 5-2.

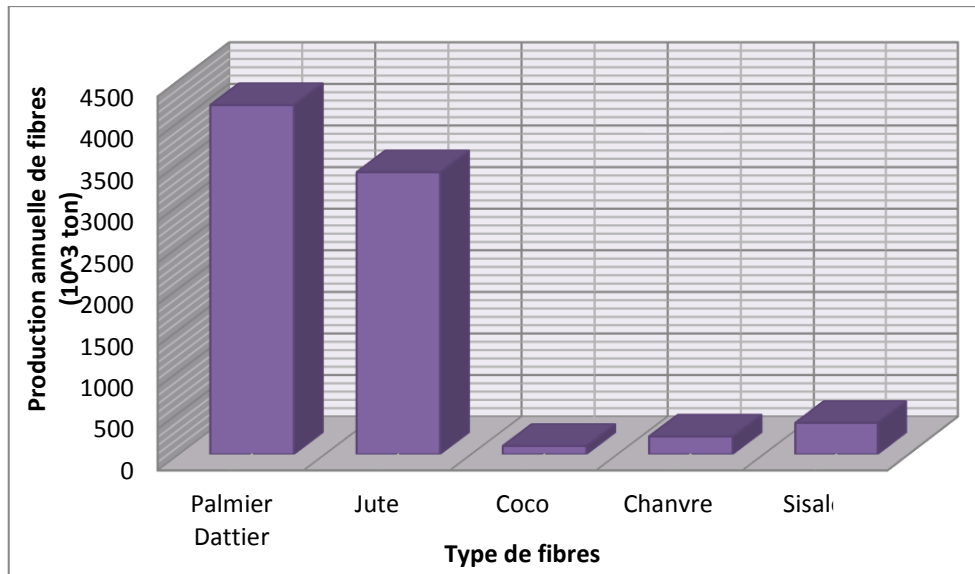


Figure 5- 2: La production mondiale annuelle de certains types de fibres naturelles.

On peut montrer que les fibres de palmier dattier avec celles du jute sont les plus disponibles parmi les autres types de fibres, avec plus de 10 fois la quantité de fibres de sisal. Cela améliorera sans aucun doute considérablement la faisabilité de l'utilisation du FPD dans l'industrie automobile et contribuera à sa durabilité et à sa productivité.

5.1.3 Coût de la fibre brute.

Ce critère est considéré comme l'un des principaux facteurs affectant les industries, surtout si des volumes importants de matières premières sont utilisés. L'une des propriétés à valeur ajoutée qui a conduit l'industrie automobile à adopter les fibres naturelles est leur faible coût par rapport aux autres matières synthétiques, mais qui varie pour chaque type de fibre.

En raison de l'abondance des fibres de palmier dattier, il est considéré comme le moins cher parmi plusieurs types de fibres naturelles, avec presque pas plus de 0,02\$/Kg [64]. Une comparaison entre les coûts des fibres montre que le coût de celle de palmier dattier est le plus bas. Par conséquent, la fibre de palmier dattier est la plus compétitive dans l'industrie automobile sachant que le régime de coût-bénéfice des industries est considérablement affecté par le coût initial des matières premières.

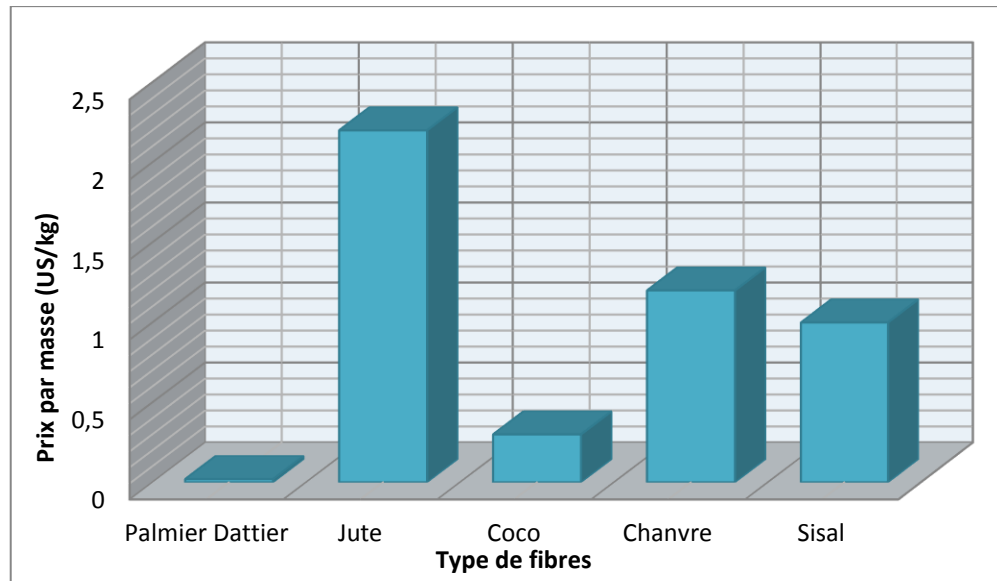


Figure 5- 3: Comparaison du coût des fibres de palmier par rapport à d'autres types de fibres.

5.1.4 Rapport spécifique entre le module d'élasticité et le coût.

Le module d'élasticité spécifique par rapport au coût, a une grande influence sur la sélection du type de fibres naturelles approprié. Plus cette valeur est élevée, plus le type de fibre est désiré dans la plupart des applications.

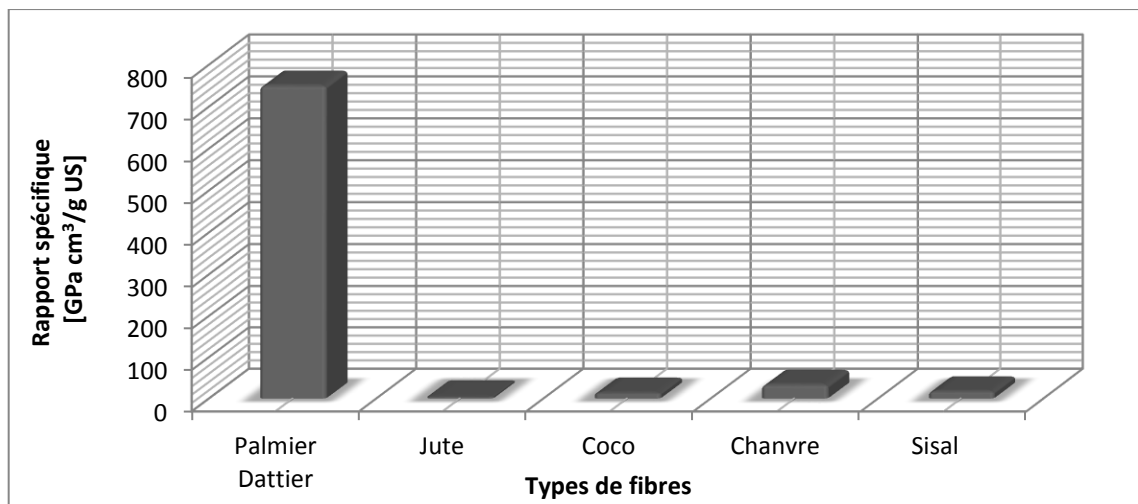


Figure 5- 4: Comparaison du rapport entre le module d'élasticité spécifique de la fibre de palmier-dattier et le coût d'autres types de fibres.

Le module spécifique a été approximé en utilisant les valeurs de rigidité, et la densité trouvées dans la littérature et indiquées dans le tableau 5-1, en [GPa/g.cm⁻³]. Ce module spécifique a été divisé par le coût de la fibre.

Il est très clair que la fibre de palmier dattier domine tous les autres types de fibres naturelles, car elle présente la meilleure rigidité par rapport à son coût. Cela garantit la possibilité de l'utilisation des FPD dans l'industrie automobile d'un point de vue technique et économique.

Par conséquent, envisager la mise en œuvre des FPD dans l'industrie automobile est une stratégie économique réalisable pour améliorer à la fois la durabilité et la productivité du secteur automobile.

5.2 **Test d'impact**

La légèreté et les niveaux de sécurité des automobiles sont deux facteurs importants pour leur conception. Dans cette partie, un essai sur la résistance à l'impact des pare-chocs automobiles a été mené. La face de pare-chocs en Epoxy renforcé de fibres de palmier est considérée comme remplacement de la traditionnelle en acier à haute résistance.

Lors d'un choc frontal, le pare-chocs avant, qui peut dans une certaine mesure protéger la carrosserie et les passagers, est la première partie à recevoir le choc de la collision. Mais il est généralement utilisé à des buts esthétiques et pour réduire la traînée aérodynamique, il ne peut pas supporter l'énergie de l'impact, il est donc considéré comme un élément non structurel. [52]

Nous espérons prouver que l'incorporation de FPD dans la face avant du pare-chocs augmentera sa capacité d'absorption d'énergie, lui permettant de jouer un rôle significatif en cas de collision, ce qui réduit par conséquent l'impact subi par les passagers et le risque de dommages mortels.

Pour étudier le potentiel d'application du matériau bio composite pour les pare-chocs de voitures, nous analysons ses performances lorsqu'il est soumis à un impact à faible vitesse.

Un modèle par éléments finis a été utilisé pour simuler l'essai d'impact sur la face avant du pare-chocs, en comparant entre une fabriquée en Epoxy pure et une autre en composite EFPN à 50% volumique de fibres. Les performances de collision ont été analysées sur la base de l'absorption d'énergie lors de l'impact à faible vitesse.

Les impacts à faible vitesse peuvent être définis comme des événements qui se produisent dans un intervalle de vitesse de 1 à 10 m/s selon la rigidité de la cible, les propriétés du matériau et la masse. Un impact à faible vitesse peut se produire en cours

d'utilisation ou pendant les activités de maintenance et peut être considéré comme l'une des charges les plus dangereuses sur les laminés composites, car ils laissent la structure avec des dommages d'impact à peine visibles à l'œil nu, alors que sa résistance peut être considérablement réduite. [66,67]

Le scénario choisi est la collision de la face avant d'un pare-chocs avec une paroi rigide. Il a servi de modèle simple et idéal pour révéler les caractéristiques générales du comportement à l'impact. Une simple structure de la face avant du pare-chocs d'épaisseur 8mm à 4 couches de composite, est présentée dans la figure 4-17.

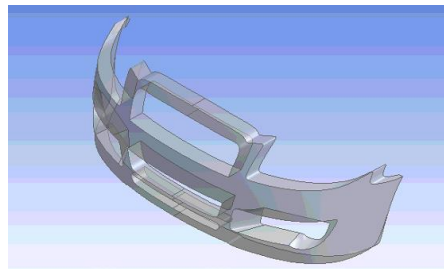


Figure 5- 5: Structure de la face du pare choc. [68]

L'impact frontal total contre une barrière rigide en acier à 10cm d'épaisseur, a été modélisé comme dans la figure 5-6 avec une vitesse d'impact de 7m/s, pendant une durée de 0.0175s.

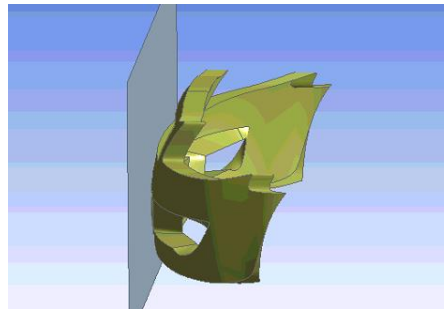


Figure 5- 6: Structure d'essai d'impact.

5.2.1 Simulation :

L'essai d'impact a été conduit sur le module d'Ansys WB : Dynamique Explicite, avec un matériau sous forme de section en couche, suivant un système de coordonnées différents du système global du corps, de telle façon à ce que les fibres soient alignées avec la direction de la force de l'impact.

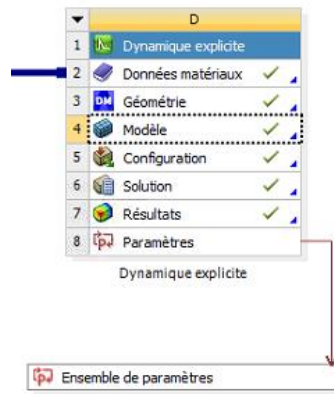


Figure 5- 7: Fenêtre de Dynamique Explicite.

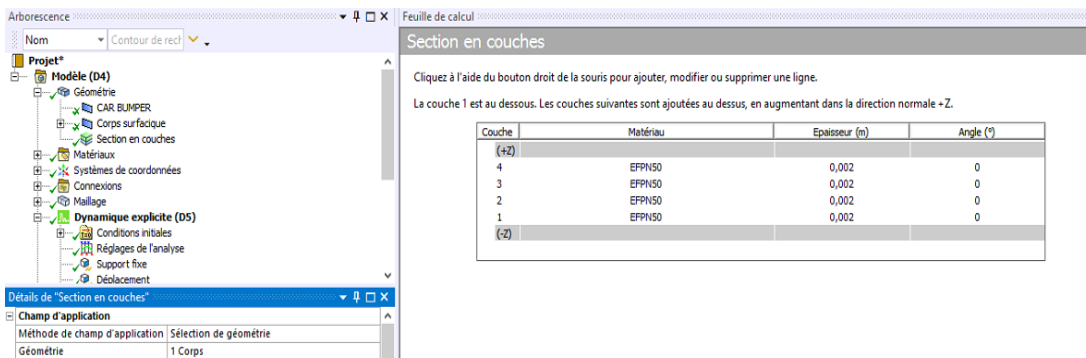


Figure 5- 8: Section en couches.

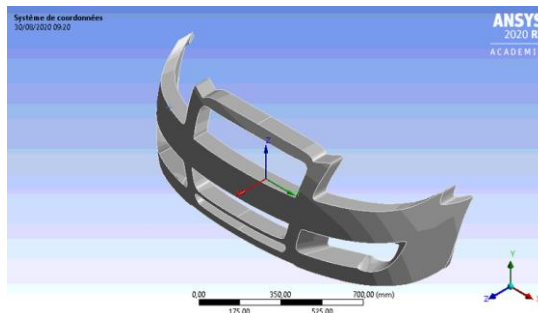


Figure 5- 9: Système des coordonnées des fibres par rapport au système de coordonnées global.

Après un maillage multizone, deux conditions limites sont déterminées :

- Support fixe : Pour le mur rigide, qui bloque le pare choc.
- Restriction du déplacement suivant la direction y : Appliquée sur les arêtes de la face du dessous du pare choc, afin de former un effet gravitationnel.

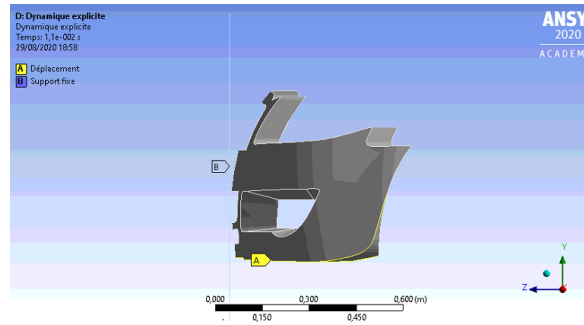


Figure 5- 10: Conditions limites des essais de l'impact.

Pour les conditions initiales, on a supposé une vitesse de 7m/s sur le corps de la face du pare choc, suivant la direction z.

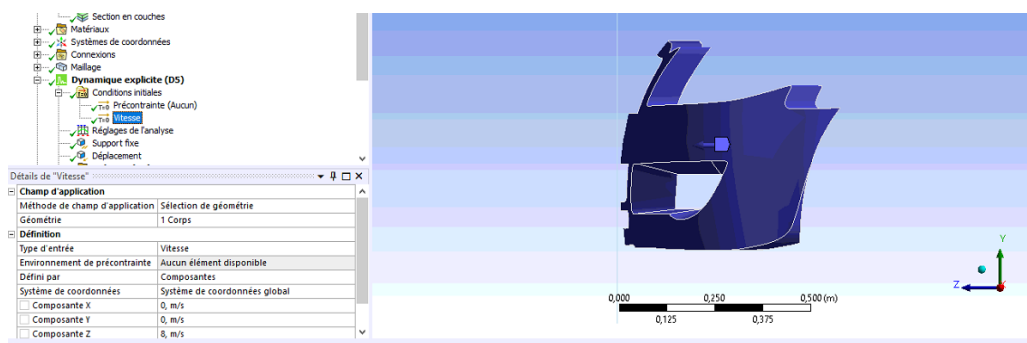


Figure 5- 11: Condition initiale des essais de l'impact.

5.2.2 Comparaison des performances au test d'impact des différents matériaux

Les performances de collision du composite à base de fibres de palmier dattier ont été comparées à celles de la résine époxy pure. Les figures suivantes montrent les courbes de l'historique des énergies du pare-chocs en résine époxy et EFPN50, respectivement, lors d'un impact à faible vitesse.

Comme indiqué, l'impact s'est prolongé sur une durée d'environ 0,0175s pour le pare-chocs de voiture en époxy et en EFPN50.

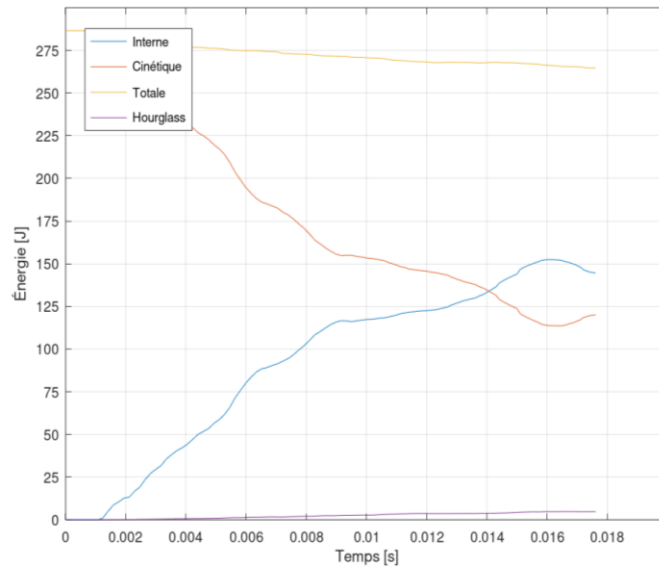


Figure 5- 12: Historiques des énergies de l'Epoxy.

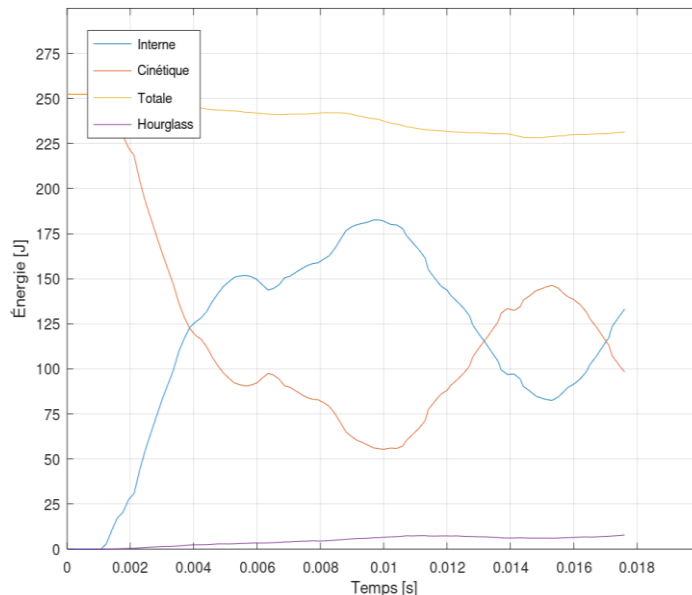


Figure 5- 13: Historiques des énergies de l'EFPN50.

On remarque que pour les deux graphes, l'énergie totale est assez stable, et l'énergie d'Hourglass ne dépasse pas 10% de l'énergie interne, ce qui prouve la fiabilité des résultats.

Les courbes d'énergie interne, d'énergie cinétique et d'énergie totale en fonction du temps sont des courbes caractéristiques d'impact importantes pour comprendre le mécanisme de défaillance de la structure concernée. La figure 5-13 de l'EFPN50 montre un cas de récupération complète dans lequel le double croisement des lignes signifie que le matériau est toujours dans sa zone d'élasticité ou qu'il n'y a pas de détérioration significative de la structure. La figure 5-12 de l'Epoxy pur, montre un cas de récupération partielle, où une

certaine fracture se produit. Ce type de courbe indique une fracture de la structure dans le cas d'un matériau composite. [69]

Les réglementations internationales en matière de sécurité exigent que tous les dispositifs de sécurité des véhicules fonctionnent correctement après une collision à faible vitesse. Par conséquent, si l'on considère les deux cas précédents, le cas du composite au EFPN50 est le cas le plus acceptable.

La figure suivante compare les courbes d'énergie interne des deux matériaux. La capacité d'absorption d'énergie est mesurable par la différence entre le maximum de l'énergie interne et l'énergie terminale (finale) [52]. L'énergie terminale, à 0.0175s, du pare choc en EFPN50 et Epoxy sont respectivement de 133.25J, et 144,55J. On remarque que l'énergie finale de l'EFPN50 est de plus faible entre les deux valeurs, ce qui montre que la capacité à absorber l'énergie est améliorée avec l'introduction des fibres de palmier dans le composite.

L'utilisation de l'EFPN50 dans le pare-chocs de la voiture ne sert donc pas seulement à des fins esthétiques, mais aussi comme un des composants structurels. L'absorption d'énergie spécifique pour les deux matériaux est indiquée dans le tableau 5-2.

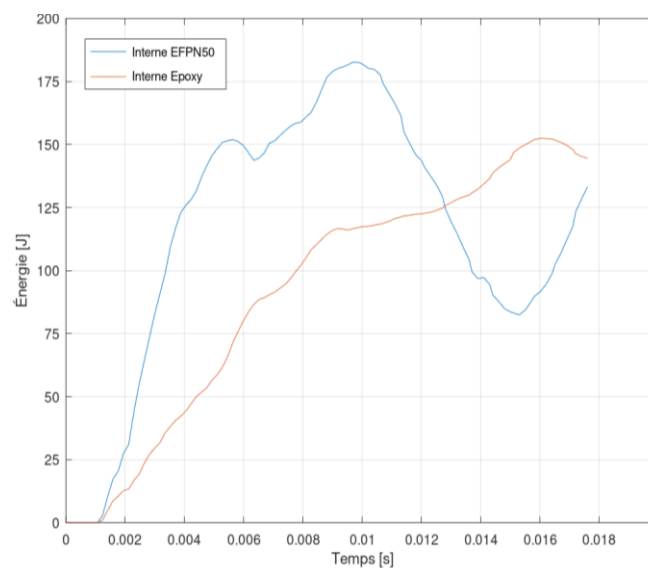


Figure 5- 14: Comparaison des historiques des énergies internes (Epoxy-EFPN50).

L'énergie spécifique absorbée (ESA) est une mesure de l'efficacité de l'absorption d'énergie. Des valeurs élevées de celle-ci indiquent une plus grande efficacité. Sa relation mathématique est exprimée par le rapport entre l'énergie interne maximale et la masse du pare-chocs. Et d'après les valeurs indiquées, on peut voir que le renforcement en fibres naturelle de palmier dattier améliore l'énergie absorbée spécifique de la face du pare choc.

Tableau 5- 2: Capacité en énergie absorbée des pare choc en Epoxy et EFPN50.

Matériau	Énergie interne maximale [J]	Énergie interne finale [J]	Énergie absorbée [J]	Masse du composant [kg]	Énergie absorbée spécifique [J/kg]
Epoxy	152,47	144,55	7,92	6,18*	24,67
EFPN50	182,67	133,25	49,42	4,86*	37,59

(*) : Volume du pare choc : 6000cm³.

Sur la figure 5-15 on peut voir que le déplacement directionnel suivant z du pare choc en Epoxy est presque 4 fois plus important que celui du pare choc en EFPN50, ceci prouve que à la même vitesse le pare choc en composite EFPN est beaucoup plus résistant au choc que celui en Epoxy pure, et que les déformations qu'il subit, se concentre dans les bouts extrêmes du pare choc, montrant que la surface du contact avec le bloc rigide à bien résister aux forces appliquées par l'impact.

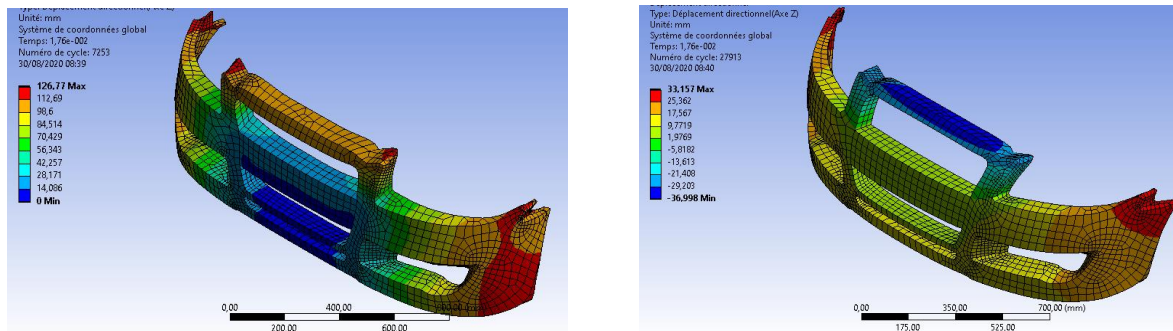


Figure 5- 15: Structure déformée de la face du pare choc en :

Epoxy

EFPN 50

S. Jeyanthi et al [70] ont mené une recherche axée sur des thermoplastiques partiellement écologiques renforcés de fibres longues de kénaf. Ils ont conclu que les KLFRT peuvent remplacer les plastiques techniques dans les applications où les propriétés de traction et de flexion sont plus importantes que la résistance aux chocs, car ils ont amélioré la capacité d'absorption de choc, mais pas de façon significative pour concurrencer les plastiques classiques. Mais les propriétés de résistance aux chocs pourraient être améliorées en optimisant les paramètres structurels tels que l'épaisseur et la courbure des poutres.

Hassan et al [52] à l'aide du logiciel LS DYNA, ont analysé deux faces de pare choc en composite fibres de palmier à huile OPEFB/PP unidirectionnel et en PP conventionnel pour comparer les performances en cas de choc. Afin de comparer leurs résultats avec ceux trouvés dans le présent travail, ils sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 5- 3: Comparaison des résultats du test d'impact.

	Présent travail		C.S. Hassan et al [52]	
	Epoxy	EFPN	PP	OPFEN/PP
Vitesse [m/s]	7		1.11	
Durée de choc [s]	0.0175		0.335	
Énergie interne max [J]	152.47	182.67	275	292
Masse [kg]	6.18	4.86	3.01	2.95
ESA [J/kg]	24.67	37.59	91.36	96.98

On remarque que les valeurs des énergies absorbées acquises lors des simulations des deux travaux, sont en concordance logique. Et on peut donc conclure que l'introduction des fibres naturelles en tant que renfort dans les matrices polymères améliore les propriétés des matériaux composites en termes de rigidité et sécurité.

5.3 Conclusions

Plusieurs facteurs affectent les produits finals formés à partir de Composites à Fibres Naturelles. Ce chapitre a permis de classer les fibres de palmier dattier comme un type de fibre très compétitives, entre un nombre de fibres naturelles qui conviennent à l'industrie automobile. Ils sont les meilleurs en ce qui concerne le critère de densité et du rapport entre le module de Young et le coût. Et son incorporation dans la fabrication de parties essentielles des véhicules, comme la face avant des pare choc, aide à améliorer leurs caractéristiques mécaniques et de sécurité.

L'adoption des FPD dans l'industrie automobile constituera une valeur ajoutée pour améliorer la durabilité et la productivité de cette industrie, ainsi que pour résoudre et gérer le problème de déchets environnementaux.

Conclusion générale

Conclusion générale

La micromécanique des milieux composites a comme intérêt principal, prédire les propriétés mécaniques et prévoir les caractéristiques élastiques à base de celles des éléments constitutifs du matériau composite. De plus, les paramètres de géométrie des composites influent beaucoup sur leurs comportements mécaniques.

La recherche bibliographique effectuée au début de ce mémoire a été menée sur la structure des matériaux biocomposites, leurs avantages et leurs divers domaines d'application tels que les matériaux de construction, le papier et l'automobile, ainsi que quelques points de définitions sur les fibres de palmier dattier en particulier, sont évoqués, comme ils font l'objet de ce travail.

La loi des mélanges est une méthode d'homogénéisation, qui nous a servi dans le calcul des caractéristiques mécaniques des matériaux composites à base de fibres longues et unidirectionnelles, de palmier dattier. La rigidité de ces matériaux est influée par la fraction volumique des fibres et le nombre de plis, tel que, l'augmentation de ces deux derniers augmente la résistance à la traction du matériau EFPN. L'orientation des fibres est avérée être un paramètre influenceur sur la réaction des matériaux composites sous effet de traction, à qui il résiste le plus quand les fibres sont alignées avec la direction de la charge appliquée.

Le secteur automobile a sans cesse besoin de développer de nouveaux matériaux plus légers, moins chers et plus écologiques. Dans cette optique, de nombreux critères sont appliqués, auxquels la fibre de palme semble la plus avantageuse, et elle permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des pièces de véhicules ayant des fins esthétiques, et de les transformer en pièces structurelles qui contribuent à la protection des passagers.

Globalement, la fibre de palmier dattier présente des propriétés très compétitives par rapport aux fibres synthétiques et même par rapport à certaines fibres naturelles. Cela incite fortement à considérer la fibre de palmier comme un type de fibre très approprié pour servir de charge dans les composites à base de polymères dans de multiples secteurs industriels.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Saeed Mahdavi, Hossein Kermanian et Ali Varshoei. Comparison of mechanical properties of date palm fiber-polythylene composite. bioresources.com [en ligne]. Consulté le : 10/05/2020. Disponible sur : https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/download/BioRes_05_4_Mahdavi_KV_Compar_Prop_Date_Palm_PE_Composites/752
- [2] : RECHAK Said. Cours Science des Matériaux Composites, chap.1 : Introduction, Généralité sur les matériaux composites. Alger Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2018
- [3] : T. Djoudi, M. Hecini, D. Scida, Y. Djebbloun & H. Djemai. Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers. Journal of Natural Fibers.2018, vol 106, pp 403.
- [4] : Z. Belouadah. Contribution à l'étude d'endommagement et du comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des fibres végétales existantes dans la région du Hodna [en ligne]. Thèse de doctorat : Génie mécanique. université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2017. Consulté le 01/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://dl.ummt0.dz/handle/ummt0/1085>
- [5] : Composite free. Définition d'un matériau composite [en ligne]. Consulté le 04/05/2020. Disponible à l'adresse : www.composite.free.fr/materiaucomposite.html
- [6] : T. DJOUDI. Elaboration et caractérisation de composites biosourcés à base de fibres de palmier dattier [en ligne]. Thèse de Doctora : Génie Mécanique. Université Mohamed Khider – Biskra, 2019. Consulté le 02/05/2020. Disponible à l'adresse : <http://thesis.univ-biskra.dz/4689/>
- [7] : Jean-Marie Berthelot. Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures [en ligne], Edition 5 : Lavoisier. 2012. Consulté le : 02/05/2020. Disponible à l'adresse : https://complements.lavoisier.net/9782743014506_materiaux-composites-comportement-mecanique-et-analyse-des-structures-5-ed_Sommaire.pdf
- [8] DJEBLOUN Youcef, ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES. Mémoire de Magister : Construction Mécanique. Biskra : UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA. 2004. 69 p.
- [9] : Y. HACHICHI et Z. CHERIF. Elaboration, caractérisation et analyse d'un nouveau matériau composite à fibres végétales (Fibres de palmier dattier) en structure sandwich. Mémoire de projet de fin d'études : génie mécanique. École Nationale Polytechnique d'Alger, 2017
- [10] : Daniel GAY. Matériaux composite, 1987 .6ème édition.

- [11] Wikipédia. Fibre Végétale [en ligne]. Consulté le 10/05/2020. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_v%C3%A9g%C3%A9tale
- [12] : Actu environnement. Fibres végétales : de nouvelle application prometteuse émergent [en ligne]. Consulté le 10/05/2020. Disponible à l'adresse : https://www.actu-environnement.com/ae/news/journee-technique-ademe_fibres_vegetales_8729.php4
- [13] : L. Gendre, "Les grandes familles de matériaux composites", ENS CACHAN, Université de PARIS SACLAY, France, 2011.
- [14] : S. Amirou. Etude et mise au point de composite à base de la matière fibreuse du palmier dattier Phoenix dactylifera L. Thèse de doctorat : Génie des matériaux. Université de Boumerdes, Algérie, 2015
- [15] : C. Baley, Y. Grohens, and I. Pillin. State-of-the-art of biodegradable composite materials. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 2004, vol. 14, pp. 135-166.
- [16] : R. Ntenga. Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites. Thèse de doctorat : Génie mécanique. Université de Yaoundé I (UYI) et UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL (UBP) - CLERMONTII, Cameroun. 2007. Consulté le 03/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://docplayer.fr/38548446-Modelisation-multi-echelle-et-caracterisation-de-l-anisotropie-elastique-de-fibres-vegetales-pour-le-renforcement-de-materiaux-composites.html>
- [17] : A. Negoudi et S. Khinech. Etude de comportement mécanique des composites biosourcés. Master Académique : Mécanique. Université KASDI MERBAH Ouargla, 2015.
- [18] : A. Błędzki, A. Jaszkiwicz, M. Urbaniak, and D. Stankowska-Walczak. Biocomposites in the past and in the Future. *Fibres & Textiles in Eastern Europe [en ligne]*, 2012, vol. 68, pp. 15-22. Consulté le : 03/05/2020. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/279892272_Biocomposites_in_the_Past_and_in_the_Future
- [19] : MOHAMADI Saddika. CHAPITRE 3 : MATERIAUX COMPOSITES. Université Akli Mohand Oualhadje de Bouira, 2014.
- [20] Belkacemi Chérifa. Étude expérimentale du comportement des stratifiés à renfort en matière végétale [en ligne]. Mémoire de Magister : Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2006. Consulté le 09/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.univ-boumerdes.dz/recherche/annuaire%202017-2018.pdf>
- [21] : A. Kriker. Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec. Thèse de doctorat : Génie civil. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. 2005
- [22] : K. Almi. Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie [en ligne]. Thèse de doctorat en Sciences : Génie mécanique. Université de Biskra,

- Algérie, 2018. Consulté le 03/05/2020. Disponible à l'adresse : <http://thesis.univ-biskra.dz/3943/>
- [23] T. Djoudi, M. Hecini, D. Scida, Y. Djebbloun & H. Djemai. Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers. *Journal of Natural Fibers*.2018, vol 106, pp 403.
- [24] : Olgun Guven, Sergio N. Monteiro, Esperidiana A. B. Moura, and Jaroslaw W. Drelich. Re-Emerging Field of Lignocellulosic Fiber – Polymer Composites and Ionizing Radiation Technology in their Formulation. *Article in Polymer Reviews*. 2016.
- [25] : C. BALOUT et F. COUTERET. *Le progrès technologique dans les Textiles*. Maitrise de science de Gestion.1999.
- [26] : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiauxth11/materiaux-composites-presentation-et-renforts42142210/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-am5130/>
- [27] : Y. DJEBLOUN . Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales [en ligne]. Thèse de doctorat : Génie Mécanique. Université Mohamed Khider – Biskra, 2018. Consulté 02/05/2020. Disponible à l'adresse : <http://thesis.univ-biskra.dz/3951/>.
- [28] : G. Tourer. LE PALMIER DATTIER CULTURE ET PRODUCTION. *Al Awamia* [en ligne]. 1967. Consulté le 12/05/2020. Disponible à l'adresse : <http://webagris.inra.org.ma/doc/awamia/02507.pdf>
- [29] : Wikipédia. Datte [en ligne]. Consulté le 12/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Datte>
- [30] : Palmae free. Le palmier est-il un arbre ? [en ligne]. Consulté le 13/05/2020. Disponible à l'adresse : <http://palmae.free.fr/pourlesnuls.htm>
- [31] : S. Rechak. *Cours Science des Matériaux Composites, chap.2 Analyse microscopique des matériaux composites*, Alger. Ecole National Polytechnique d'Alger, 2018.
- [32] : Saber BENFERDI. CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MICROMECHANIQUE D'UN MATERIAU COMPOSITE PAR DIFFERENTES APPROCHES MATHEMATIQUES [en ligne]. Mémoire de Magister. Génie Mécanique : Université MENTOURI Constantine, Faculté Des Sciences De L'ingénieur, Algérie. 2010. Consulté le 24/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://bu.umc.edu.dz/theses/gmecanique/BEN5863%20.pdf>
- [33] : J. D. Eshelby. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. In *Proc. R. Soc. Lond. A* [en ligne], 1957, pp. 376-396. Consulté le 14/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.1957.0133>.
- [34] : A. Benhizia, OPTIMISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE EN DOMAINE NON LINEAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES PAR TECHNIQUE D'HOMOGENEISATION [en ligne]. Thèse de doctorat : Université de Batna 2, 2015. Consulté le 14/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://docplayer.fr/64104782-These-doctorat-en-sciences.html>

- [35] : Wikipédia. John D. Eshelby [en ligne]. Consulté le 25/07/2020. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/John_D._Eshelby
- [36] : Eduscol. Sciences et Techniques Industrielles [en ligne]. Consulté le : 27/07/2020. Disponible à l'adresse : https://eduscol.education.fr/sti/ressources_pedagogiques/animation-sur-le-comportement-des-materiaux-les-composites
- [37] : Taibi, El H. Caractérisation, modélisation et simulation du comportement d'un tissu textile. Thèse de doctorat. Université Mohamed 5 et Université Bordeaux. 2001.
- [38] : Matthieu GAUTHIER. CONCEPTION ET OPTIMISATION D'UNE PROTHÈSE ARTÉRIELLE MULTICOUCHE COMPOSÉE DE TISSU ÉLECTROFILÉ [en ligne]. Maîtrise : génie concentration technologies de la santé. ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC. Consulté le 19/05/2020. Disponible à l'adresse : https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1640/2/GAUTHIER_Matthieu-web.pdf
- [39] : Roy, D., C. Kauffmann, S. Delorme, S. Lerouge, G. Cloutier, et G. Soulez. A literature review of the numerical analysis of abdominal aortic aneurysms treated with endovascular stent grafts. Hindawi Publishing Corporation Computational and Mathematical Methods in Medicine [en ligne]. Volume 2012, Article ID 820389, 16 pages. Consulté le 19/05/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.hindawi.com/journals/cmmm/2012/820389/>
- [40] : Cook, R. D., D. S. Malkus, M. E. Plesha, et R. J. Witt. Concepts and applications of finite element analysis, 2001, Éd. 4. 719 p
- [41] : Kollar, L.P. et G.S. Springer. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press, 2003.
- [42] : Sciences du sport. Soulevé de terre : Une variante plus sûre pour tous les athlètes [en ligne]. Consulté le : 29/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.sci-sport.com/articles/souleve-de-terre-une-variante-plus-sure-pour-tous-les-athletes-055.php>
- [43] : A. S. Hammood. Effect of Erosion on Water Absorption and Morphology for Treated Date Palm Fiber-Reinforced Polyester Composites. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS vol. Vol:15, December 2015.
- [44] : D. Shanmugam, M. Thiruchitrambalam.. Static and dynamic mechanical properties of alkali treated unidirectional continuous Palmyra Palm Leaf Stalk Fiber/jute fiber reinforced hybrid polyester composites. Materials and Design. 2013. Vol 50. 533-542.
- [45] : E. Mahdia, D. Ochoa, A. Vaziri, E. Eltai. Energy absorption capability of date palm leaf fiber reinforced epoxy composites rectangular tubes. Composite Structures. 2019. Vol 224.
- [46] : A. Kriker, A. Bali, G. Debicki, M. Bouziane, and M. Chabannet. Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. Cement and Concrete Composites, vol. 30, pp. 639-648, 2008.

- [47] : Osupdocs forestry. Transversely Isotropic Material [en ligne]. Consulté le 08/06/2020. Disponible à l'adresse : http://osupdocs.forestry.oregonstate.edu/index.php/Transversely_Isotropic_Materia/#Transverse_1.
- [48] : ANSYS Composite PrepPost User's Guide [en ligne], Edition 15.0, November 2013. Disponible à l'adresse : https://www.academia.edu/25099111/ANSYS_Composite_PrepPost_Users_Guide
- [49] : Anizah Kalam, B.B. Sahari,*, Y.A. Khalid, S.V. Wong . Fatigue behaviour of oil palm fruit bunch fibre/epoxy and carbon fibre/epoxy composites, Composite Structures 71 [en ligne]. 2005, pp. 34–44. Consulté le 01/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.academia.edu/9857132/Fatigue_behaviour_of_oil_palm_fruit_bunch_fibre_epoxy_and_carbon_fibre_epoxy_composites?auto=download
- [50] : WL. Ngo , M.M Pang, L. Yong AND K.Y. TSHAI. Mechanical Properties of Natural Fibre (Kenaf, Oil Palm Empty Fruit Bunch). Advances in Environmental Biology [en ligne]. 2014, vol. 8, pp. 2742-2747. Consulté le : 12/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/263699327_Mechanical_Properties_of_Natural_Fibre_Kenaf_Oil_Palm_Empty_Fruit_Bunch_Reinforced_Polymer_Composites
- [51] : Ahmad F, Bajpai PK. Evaluation of stiffness in a cellulose fiber reinforced epoxy laminates for structural applications: Experimental and finite element analysis. Defence Technology 14 (2018) 278-286 [en ligne], 2018. Consulté le 28/05/2020. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/325288801_Evaluation_of_stiffness_in_a_cellulose_fiber_reinforced_epoxy_laminates_for_structural_applications_Experimental_and_finite_element_analysis
- [52] : Cik Suhana Hassan, Veyvein Durai, Mohd Sapuan Salit, Nurainu Abdul Aziz, et Moh Zuhri Mohamed Yusoff. Mechanical and crush performance of unidirectional oil palm empty fruit bunch fiber-reinforced polypropylene composite. biosources.com [en ligne] . 2018, vol. 13, No4 . Consulté le 02/06/2020. Disponible sur : https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_4_8310_Hassan_Mechanical_Crash_Performance_Empty_Fruit_Bunch/6391
- [53] : MR Hossain, MA Islam, AV Vuurea, I Verpoest. Effect of Fiber Orientation on the Tensile Properties of Jute Epoxy Laminated Composite. JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH [en ligne]. 2012, vol. 5, pp. 43-54. Consulté le : 17/06/2020. Disponible sur l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/272867554_Effect_of_Fiber_Orientation_on_the_Tensile_Properties_of_Jute_Epoxy_Laminated_Composite
- [54] : A. A. Wazzan. EFFECT OF FIBER ORIENTATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE CHARACTERISTICS OF

- DATE PALM FIBER REINFORCED COMPOSITES. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 2005, vol. 54:3, pp.213-225
- [55] : S Eksi, K Genel. Comparison of Mechanical Properties of Unidirectional and Woven Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Acta physica polonica*. 2017, vol. 132, pp. 879-882.
- [56] : H. Rahmani, S. H. M. Najafi, S. S. Matin, A. Ashor. Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites: Effects of Number of Plies, Fiber Contents, and Angle-Ply Layers. *Polymer Engineering and Science*. November 2014, vol. 10.
- [57] : M. A. Kounain, F. Al-Sulaiman and Z.A. Khan. Low Velocity Impact and Post Impact Tensile Properties of Plain Weave Woven. GFRP Composite Laminates. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* [en ligne]. Décembre 2015, vol. 5. Consulté le 30/06/2020. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/292606138_Low_Velocity_Impact_and_Post_Impact_Tensile_Properties_of_Plain_Weave_Woven_GFRP_Composite_Laminates
- [58] : A.D. Anto, S. Mia and MD A. Hasib. The influence of number and orientation of ply on tensile properties of hybrid composites. *J. Phys. Mater* [en ligne]. 2019, vol. 10. Consulté le 30/06/2020. Disponible à l'adresse : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7639/aaff7a/pdf>
- [59] : Textile learner. Physical and Chemical Properties of Natural Fiber and Their Applications in Textile [en ligne]. Consulté le 01/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://textilelearner.blogspot.com/2019/02/properties-natural-fibre.html>
- [60] : Ripley believes. Pricipaux Pays Producteurs De Jute Dans le Monde [en ligne]. Consulté le 01/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://fr.ripleybelieves.com/top-jute-producing-countries-in-world-5341>.
- [61] : Alibaba. Jute fiber price [en ligne]. Consulté le 01/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.alibaba.com/showroom/jute-fiber-price.html>
- [62] : Dittenber, D.B., GangaRao, H.V.S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Compos. A Appl. Sci. Manuf*. 2012, vol. 43, pp. 1419-1429.
- [63] : O. Faruk, A.K Bledzki, H.P. Fink, M. Sain. Biocomposites reinforced with natural fibers. *Progress in Polymer Science* [en ligne]. 2012, vol. 37, pp. 1552-1596. Consulté le 11/07/2020. Disponible à l'adresse : https://www.academia.edu/30062207/Biocomposites_reinforced_with_natural_fibers_2000_2010
- [64] : F.M. AL-Oqla, S.M. Sapuan. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production* [en ligne]. 2014, vol. 66, pp. 347-354. Consulté le : 11/07/2020. Disponible à l'adresse : https://www.academia.edu/7238523/Natural_fiber_reinforced_polymer_composites_in_industrial_applications_feasibility_of_date_palm_fibers_for_sustainable_automotive_industry

- [65] : QBAT. Isolant souple fibre naturelle [en ligne]. Consulté le : 11/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.qbat.fr/fr/isolants-naturels/357-isolant-souple-fibre-naturelle-thermo-jute-100.html>
- [66] : S.N.A. Safri, M.T.H. Sultan, N. Yidris, and F. Mustapha. Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Material. The International Journal of Engineering and Science (IJES) [en ligne]. 2014, vol. 3, pp 50-60. Consulté le : 23/07/2020. Disponible à l'adresse : <http://theijes.com/papers/v3-i9/Version-1/H0391050060.pdf>
- [67] : Science Direct. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing [en ligne]. Consulté le : 25/07/2020. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X18301209>
- [68] : GRABCAB COMMUNITY. Audi fessica [en ligne]. Consulté le : 01/08/2020. Disponible à l'adresse : <https://grabcad.com/library/audi-fessica-1>
- [69] : V. Lopresto, A. Langella, S. Abrate. Dynamic Response and Failure of Composite Materials and Structures. 2017, pp. 417-427.
- [70] : S. Jeyanthi and J. Janci Rani. Improving Mechanical Properties by KENAF Natural Long Fiber Reinforced Composite for Automotive Structures. Journal of Applied Science and Engineering, 2012, vol. 15, No. 3, pp. 275-280. Consulté le : 16/08/2020. Disponible à l'adresse : <https://pdfs.semanticscholar.org/eb00/fce4952cab3eab52e9335380d088d4ca72b5.pdf>