

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénierie

Département de génie mécanique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master

Spécialité : Construction mécanique

THÈME

**Etude du comportement mécanique du
matériau composite des prothèses
orthopédiques**

Réalisé par:

HADBI ZINEB

Encadré par:

Dr BENAMIRA MOHAMED

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Pr K. BEY

EXAMINATEUR : Dr A. CHEMAMI

EXAMINATEUR : Mr S. GOUASMI

Promotion juin

2018

Remerciements

Ce mémoire est le résultat d'un travail de longue haleine qui a duré près de quatre mois. Au cours de sa préparation, beaucoup d'obstacles ont été surmontés, de problèmes rencontrés et résolus et de difficultés surpassées. Mais d'un autre côté, beaucoup de nouvelles connaissances scientifiques ont été acquises et de rencontres extrêmement intéressantes qui ont contribué à m'initier à la recherche scientifique.

En premier lieu, je tiens à remercier vivement mon encadreur le Dr. M. BENAMIRA, pour la qualité d'encadrement, son soutien et les conseils qu'il a bien voulu me prodiguer. En suite, mes remerciements s'adressent à Mr F. ALLALI directeur de l'ONAAPH, Mr. S. BOUDIEF Chef de département production, Mr KHEMISSI Chef de centre, Mr. K. GINADIR Chef de service à l'unité d'ANNABA. Aussi, Mr. B. BENAÏSSA, Mr. H. NEBILI ainsi que tout le personnel de l'administration et de l'atelier de fabrication de l'ONAAPH.

Je tiens également à remercier le Pr K. BEY, Dr. A. CHEMEMI et Mr. S.GOUASMI pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes enseignants, le personnel du département de génie mécanique ainsi que tous les étudiants et amis qui m'ont aidés à réaliser ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à ma mère et mon père qui ont beaucoup sacrifié pour que je puisse atteindre mon but, celui de réaliser ce travail. Aussi, à mes frères, à toute ma famille et aussi à SIF EDDINE qui m'a tant soutenu.

Hadbi Zineb

Résumé

Notre travail présente une étude sur le comportement mécanique du matériau composite utilisé dans la fabrication des prothèses orthopédiques, au niveau de l'ONAAPH (Office Nationale d'Accessoire et d'Appareillages pour Personnes Handicapées). Etant un composite hybride, nous nous sommes intéressés au comportement de plis à base de fibre de verre et de perlon ainsi que le composite en entier.

L'objectif est d'étudier le comportement mécanique en mettant en relief la contribution de chaque type de renfort, et de déterminer analytiquement les propriétés de rigidité à la base de la loi de mélange et la celle d'Halpin-Tsai.

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Généralités sur les matériaux plastiques et composites

I.1.Introduction.....	2
I.2 Définition.....	2
I.3 Constituants des matériaux composites.....	2
I.3.1. la matrice.....	3
a) Les résines thermodurcissables.....	3
b) Les résines thermoplastiques.....	3
c) Les résines thermostables.....	4
I.3.2. Le renfort	4
a) Fibres de verre	5
b) Fibres de carbone	6
c) Fibres d'aramide.....	6
d) Fibres de bore	7
e) Fibres de silicium.....	7
I.3.3. Les charges et les additifs	7
I.4. Les procédés de fabrication de matériaux composites	7
1.4.1. Moulage au contact	8
1.4.2. Moulage par projection simultané.....	8
1.4.3. Moulage par projection de résine	9
1.4.4. Moulage par centrifugation	9
1.4.5. Moulage par infusion (sous vide)	10
I.5. Structure des matériaux composites.....	10
I.5. 1. Les monocouches.....	11

I.5. 2 Les Stratifiés.....	11
I.5. 3. Les Sandwichs.....	12
I.6. Les domaines d'utilisation	12

Chapitre II

L'industrie des prothèses orthopédiques

II .1. Introduction.....	13
II.2. Historique.....	13
II.3. Présentation de l'entreprise	14
II.4. Structure de l'ONAAPH.....	16
II.5. Domaines d'activités.....	16
II.6. Les produits de l'ONAAPH.....	17
a) Les prothèses	18
b) Les orthèses.....	19
c) Les corsets.....	19
d) Les attelles.....	20
e) Autres produits.....	20
II.7. Constituants de base du composite de la prothèse orthopédique	21
a) Le renfort.....	21
b) Les additifs.....	22
c) La matrice	22
d) Le perlon.....	22
II.8. Fabrication de la prothèse orthopédique.....	23
➤ Les matériaux utilisés.....	23
➤ Procède de fabrication.....	23

Chapitre III

Comportement mécanique des matériaux composite

III.1. Introduction.....	32
III.2. Description du matériau.....	32
III.3. Comportement en traction.....	34
III. 3. 1. Cas du pli de verre.....	34
III. 3. 2. Cas du composite.....	36
III. 4. Analyse morphologie de rupture.....	37
III. 5. Influence des paramètres de fabrication.....	39

Chapitre IV

Etude expérimental

IV. 1. Introduction	42
IV. 2. Élaboration du matériau.....	42
IV. 2. 1. Les constituants.....	42
Le verre E	42
La résine acrylique.....	43
Le polyamide	43
IV.2. 2. Description du procédé de fabrication.....	45
IV. 3. Les éprouvettes	45
IV.3. 1. La géométrie.....	45
IV.3. 2. Le dispositif de découpe	45
IV. 3. 3. Le traçage des éprouvettes	45
IV. 3. 4. Paramètres géométriques des éprouvettes.....	46
IV. 4. L'essai de traction	47
IV. 5. La machine d'essai	48
IV. 6. Déroulement des essais	49
IV. 7. Résultats des essais.....	50

IV.7. 1. Comportement du composite.....	50
IV.7. 2. Comportement du verre	51
IV.7. 3. Comportement du perlon	52
IV. 8. L'endommagement de rupture.....	54

Chapitre V

Etude du comportement mécanique

V. 1. Introduction	55
V. 2. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice.....	55
V.3. Le pli unidirectionnel.....	57
a. Modules élastiques.....	57
V.4. Equation d'Halpin-Tsai	59
V. 5. Modèle analogue du composite.....	60
Conclusion générale.....	62

Liste des figures

figure	Titre	Page
Figure 1	Matériau composite	2
Figure 2	Différentes familles de matrice	3
Figure 3	Types de renfort	5
Figure 4	Procède d'ėtiage des fibres de verre	6
Figure 5	principe de moulage au contact	9
Figure 6	principe de moulage par projection simultanée	9
Figure 7	principe de moulage par injection de résine	9
Figure 8	principe de moulage par centrifugation	10
Figure 9	principe de moulage par infusion	10
Figure 10	composite monocouche	11
Figure 11	composite stratifié	11
Figure 12	Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels.	12
Figure 13	Composite sandwichs	12
Figure 14	Les différents sièges, centres et antennes	15
Figure 15	Organigramme de l'entreprise	16
Figure 16	Organigramme régionale	16
Figure 17	organigramme produit d'ONAAPH	17
Figure 18	Exemples de prothèses du membre inférieur et supérieur	18
Figure 19	Orthèses cruro-pédieuse	19

Figure 20	corsets.	20
Figure 21	les attelles	20
Figure 22	fibres de verre.	21
Figure 23	Résine acrylique (à laminier 80:20).	22
Figure 24	Perlon	23
Figure 25	Un négatif du moignon d'un patient	24
Figure 26	La forme du moignon en plâtre	24
Figure 27	Préparation du film isolant en (PVA)	24
Figure 28	Préparation et enfilement du film (PVA).	25
Figure 29	Etanchéité du film PVA sur le moule	25
Figure 30	Mettre l'appareil électrique à dépression en marche	26
Figure 31	Enfilement du perlon	26
Figure 32	Enfilement du tricot de verre	27
Figure 33	Enfilement des deux autres couches de perlon	27
Figure 34	Enfilement du deuxième film de (PVA)	28
Figure 35	Aspirateur d'air (deuxième aspiration)	28
Figure 36	Préparation du mélange résine, durcisseur	29
Figure 37	Imprégnation du mélange à l'intérieur du moule	29
Figure 38	Répartition de la résine.	30
Figure 39	rectifier de la prothèse.	30
Figure 40	Prothèse modulaire fémorale	31
Figure 41	Structure des renforts utilisés	32
Figure 42	Structure et élaboration du matériau	33
Figure 43	Schématisation du moulage des éprouvettes	34

Figure 44	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes vierges (effort-déplacement).	35
Figure 45	Courbes de traction selon les orientations 0°, 45° et 90°	37
Figure 46	Fissuration transverse	38
Figure 47	La localisation de la rupture finale	38
Figure 48	porosité du composite	40
Figure 49	différence des épaisseurs	40
Figure 50	différence des épaisseurs	41
Figure 51	Tensions dans les tricots de verre	41
Figure 52	Schématisation du procédé de moulage des plaques	44
Figure 53	Dimension de l'éprouvette	44
Figure 54	L'opération des découpes d'éprouvettes	45
Figure 55	Traçage des éprouvettes	45
Figure 56	Essai de traction sur une éprouvette	47
Figure 57	Machine de traction	48
Figure 58	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes des composites	49
Figure 59	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes des verres	49
Figure 60	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes des perlons	50
Figure 61	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes composites (effort-déplacement)	51
Figure 62	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes verres (effort-déplacement)	51
Figure 63	Courbes de traction des essais sur les éprouvettes perlons (effort-déplacement)	52
Figure 64	La moyenne des éprouvettes composites et verres et perlons	53
Figure 65	L'écart-type des éprouvettes composites et verres et perlons	53

Figure 66	L'endommagement de rupture	54
Figure 67	pesage des échantillons	56
Figure 68	module d'élasticité et module glissement en fonction du taux fibre	58
Figure 69	Coefficient de poisson en fonction du taux fibre	58
Figure 70	module d'élasticité et module glissement en fonction du taux fibre	59
Figure 71	coefficient de poisson en fonction du taux fibre	60
Figure 72	schématisation du modèle analogue	60
Figure 73	Courbes de la loi du mélange	61
Figure 74	Courbes de la loi du d'Halpin-Tsai	61

Liste des Tableaux

N° de tableau	Titre	Page
Tableau 1	Les principales propriétés des thermodurcissables et thermoplastique	3
Tableau 2	Caractéristiques mécaniques des fibres de verre	5
Tableau 3	Quelque propriété mécanique des fibres	6
Tableau 4	Propriétés mécaniques des fibres de verre	20
Tableau 5	La moyenne et l'écart type des efforts et déplacements	36
Tableau 6	Caractéristiques mécaniques du matériau	36
Tableau 7	Les propriétés du verre E	42
Tableau 8	Les propriétés de résine acrylique	43
Tableau 9	Les propriétés des fibres polyamides	43
Tableau 10	Dimensions des éprouvettes transverse et longitudinal de composite	46
Tableau 11	Dimensions des éprouvettes transverse et longitudinal de verre	46
Tableau 12	Dimensions des éprouvettes transverse et longitudinal de perlon	46
Tableau 13	La moyenne et l'écart type des efforts et déplacements (longitudinal)	52
Tableau 14	La moyenne et l'écart type des efforts et déplacements (transverse)	53
Tableau 15	mesures des masses	56
Tableau 16	calcul de la fraction volumique	56

Introduction générale

Le développement et l'utilisation des matériaux composites sont toujours tributaires aux besoins des constructeurs. Il est constamment à la recherche de matériaux plus performants, plus économiques et durables dans le temps. Ceux sont des exigences aux quelles doit répondre les matériaux composites.

L'industrie des prothèses orthopédiques fait appel à divers matériaux, soit pour le processus de fabrication en tant que consommables, soit dans la construction des appareillages. Les composites à base de résine acrylique renforcée avec des fibres de verre ont une grande part de la structure de la prothèse.

Le comportement élastique-endommageable des matériaux composites à base de tricot de verre obtenus par moulage sous vide a été mis en évidence dans divers travaux. Etant donnée leur structure complexe, ils ont fait l'objet de nombreuses recherches.

Dans notre travail, nous allons présenter l'étude de comportement mécanique sur le matériau composite utilisé dans les prothèses orthopédiques fabriquées au niveau de l'ONAAPH (Office National des Accessoires et Appareillages pour Personnes Handicapées). Pour ce faire, le mémoire est articulé en cinq chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les matériaux composites; Des définitions, les constituants des matériaux composites, les procédés d'élaboration sont présentés. Le second chapitre présente l'industrie des prothèses orthopédiques ; L'ONAAPH et ses divers produits, le procédé de fabrication des prothèses de membres inférieurs sont présentés. Le troisième chapitre présent le comportement mécanique en traction d'un composite utilisé dans la fabrication des prothèses orthopédiques avec des interprétations et une analyse microscopique et l'influence de paramètre de fabrication. Le quatrième chapitre présent l'étude expérimentale sur le perlon le verre et composite. Le dernier chapitre présente les résultats de l'étude de comportement mécanique sur le matériau composite. En fin, une conclusion dans laquelle sont présentés les résultats cette étude.

I.1. Introduction :

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les plastiques, les composites... Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont été utilisés par l'homme depuis très longtemps, citons par exemple le bois, le béton. La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différents constituants des matériaux composites. Dans la deuxième partie, on va présenter le procédé de fabrication de ce type de matériau et la structure de matériau composite.

I. 2. Définition:

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels [1] :

- légèreté
- résistance mécanique et chimique
- maintenance réduite
- liberté de forme et une bonne isolation électrique

I. 3. Constituants des matériaux composites :

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice.
- D'un renfort.
- Les charge et additif.

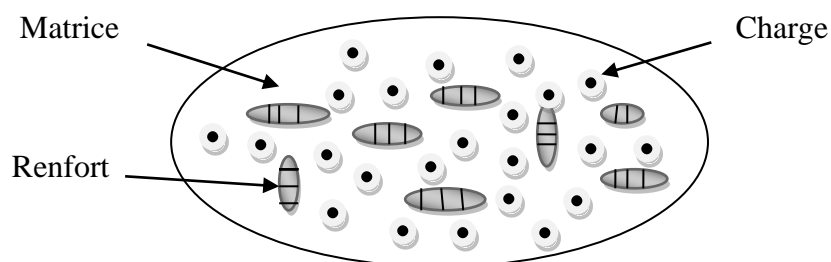


Figure 01 : Matériau composite [1].

I. 3. 1. La matrice :

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. On plusieurs familles de matrice [1].

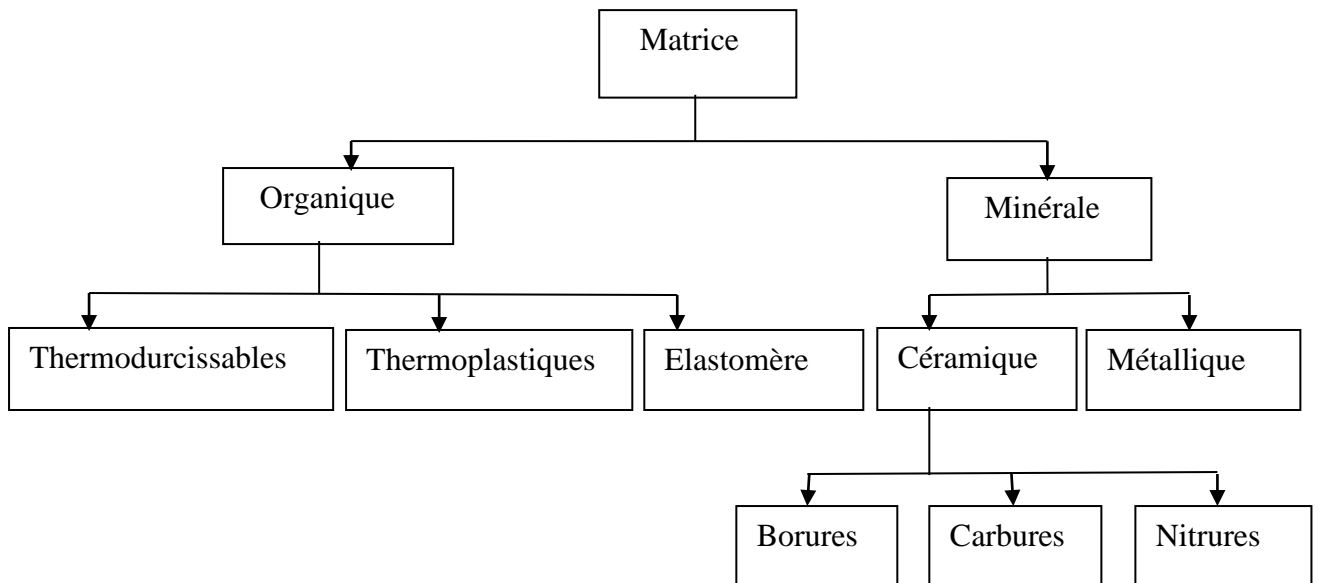


Figure 02 : Différentes familles de matrice.

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

a) Les résines thermodurcissables:

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique), transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes [2].

b) Les résines thermoplastiques:

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. On distingue :

Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polystyrène, polycarbonate et le polyamide [3].

Matrices	Thermodurcissables	Thermoplastique
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage matière de base	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage+refroidissement
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleur	Réduite
Chute et déchets	Perdus	Recyclables

Tableau 1 : les principales propriétés des thermodurcissables et thermoplastiques [1].

c) Les résines thermostables :

Les résines thermostables se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace [1].

I. 3. 2. Le renfort :

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique (carbone ou aramide). Les plus employées sont les fibres de verre, les fibres de carbone sont privilégiées [3].

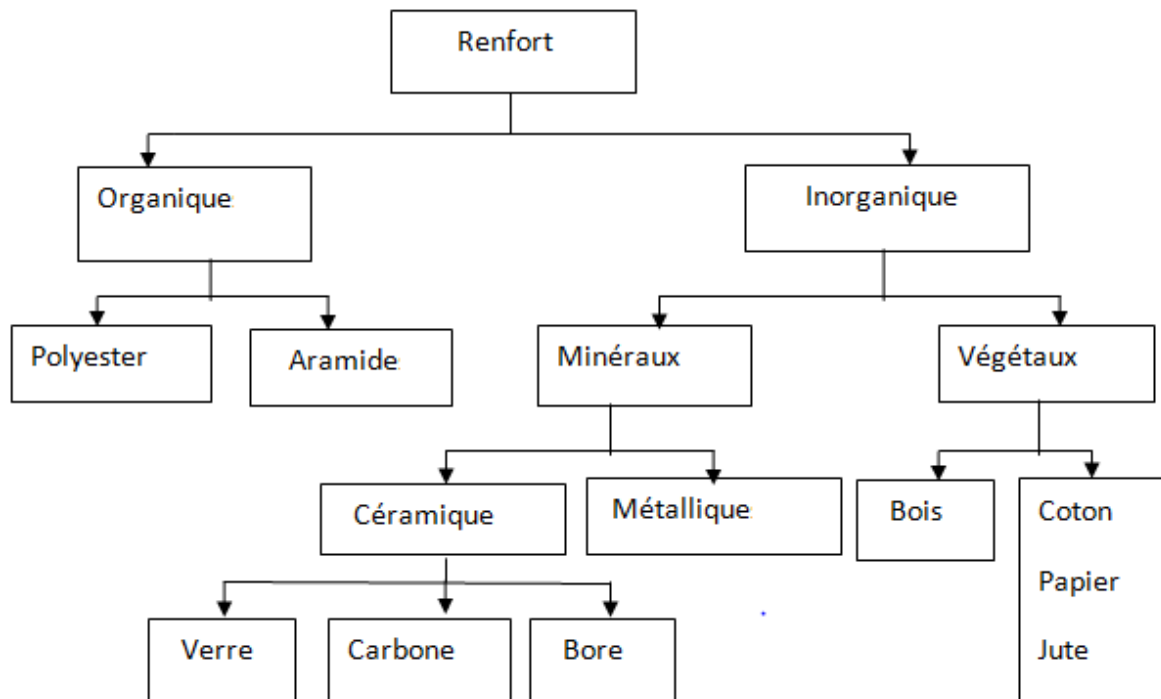


Figure 03 : Types de renfort.

a) Fibres de verre :

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue différents types de fibre [1]:

- verre E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes (bonne propriétés électriques).
- Verre D : pour les composites hautes performances (hautes propriétés diélectrique).
- Verre C : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).
- Verre R ou D : haute résistance mécanique.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau 2.

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Contrainte à la rupture (Mpa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module d'Young (Gpa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4	5,3	5,3

Tableau .2: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [1].

➤ Fabrication des fibres de verre :

Les fibres de verre sont fabriquées par étirage à grande vitesse 60 m/s [1].

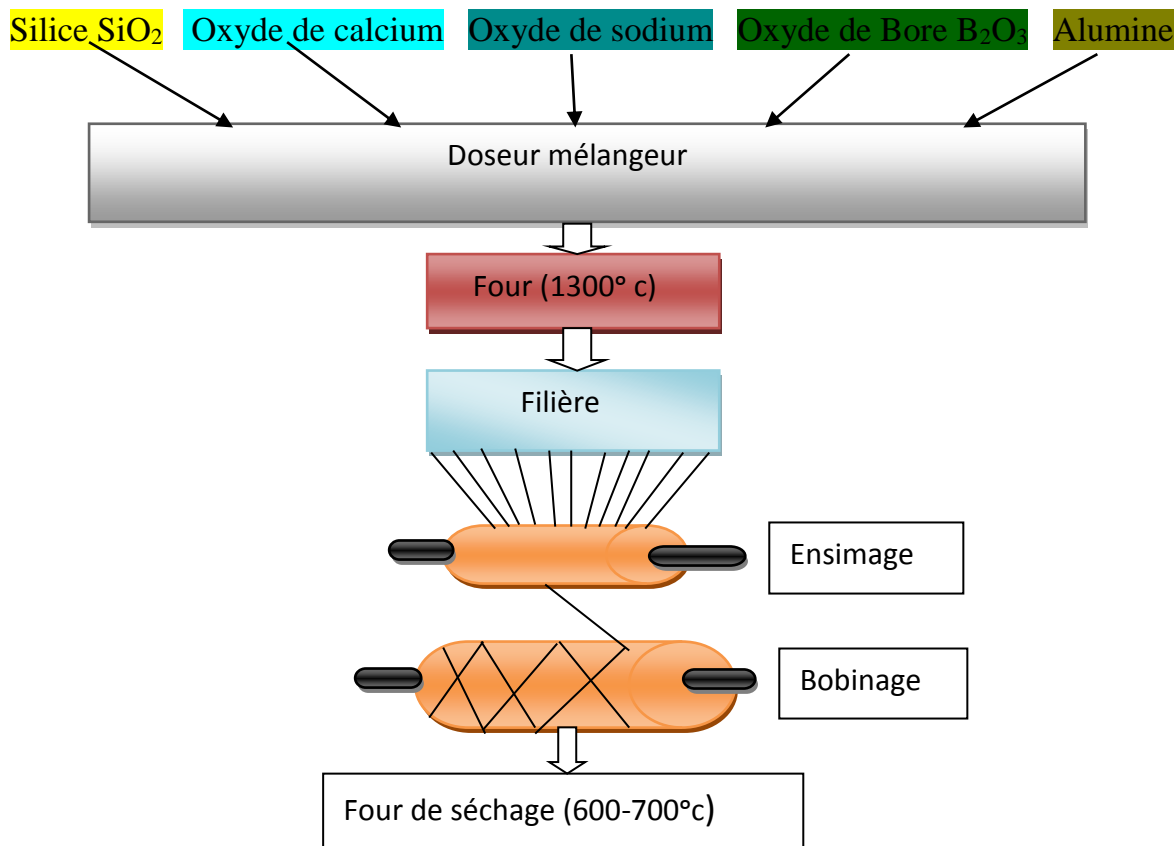


Figure 04: Procède d'étiage des fibres de verre.

b) Fibres de carbone :

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). On distingue deux types de fibres [3] :

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

c) Fibres d'aramide :

Souvent appelée KEVLAR®, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes [3] :

- Les fibres de bas module: utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- Les fibres de haut module: employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

d) Fibres de bore :

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène [2].

e) Fibres de silicium:

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [2].

Fibre	Densité	Diamètre du filament (mm)	Charge de rupture en traction (Mpa)	Charge de rupture en compression (Mpa)	Allongement à la rupture (en %)	Module d'élasticité
Verre E	2.25	3-30	3400	1200	4.8	73000
Verre R	2.48	3-30	4400	1300	5.4	86000
Aramide bas module	1.45	12	3100	500	2	70000
Aramide haut module	1.45	12	3100	500	1	130000
Carbone haute module	1.8	8	2800	1800	0.5	200000
Bore	2.63	100-200	3500	3500	0.8	400000

Tableau 3 : Propriétés mécaniques des fibres [1].

I. 3. 3 : Les charges et les additifs :**➤ Charges renforçantes :**

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en [1]:

- charges sphériques.
- Charges non sphériques.

➤ Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible coût.
- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques.

➤ **Additifs :**

Les additifs se trouvent en faibles quantités (quelques % et moins) et interviennent comme [1]:

- Lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retrait.
- Agents anti-ultraviolets.

I. 4. Les procédés de fabrication de matériaux composites :

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit final [2]. Il y a différents types de fabrication dans les différents domaines technologiques :

I. 4. 1. Moulage au contact :

Le principe est de procéder manuellement à la réalisation des pièces à partir des résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée [4].

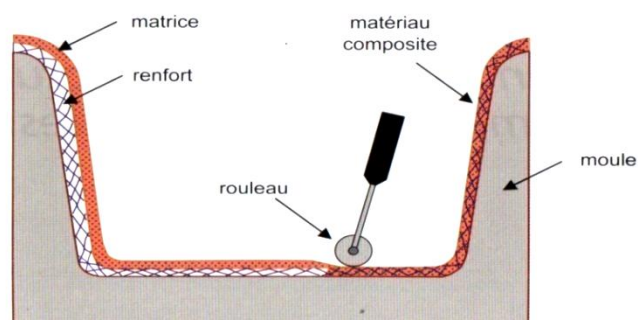


Figure 05 : principe de moulage au contact [1].

I. 4. 2. Moulage par projection simultanée :

Projection simultanée sur un moule de fibres coupées et de résine catalysée à l'aide d'un pistolet [4].

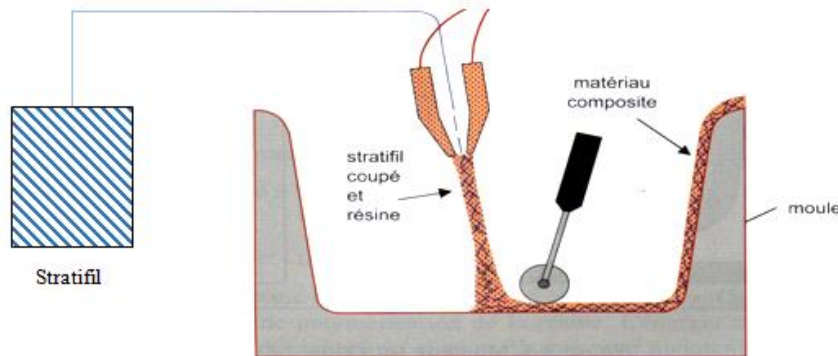


Figure 06: principe de moulage par projection simultanée [1].

I. 4. 3. Moulage par projection de résine :

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression [3].

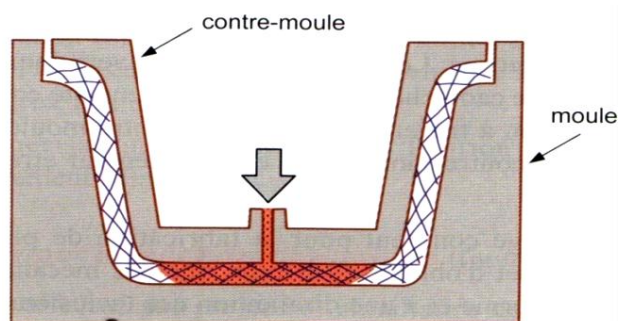


Figure 07: principe de moulage par injection de résine [1].

I. 4. 4. Moulage par centrifugation :

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse [3].

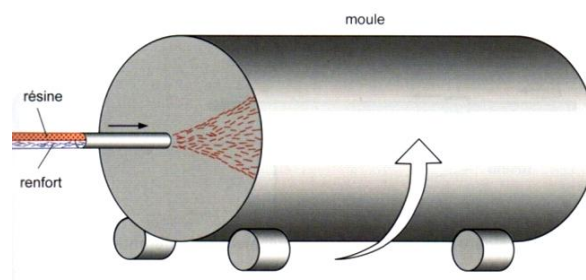


Figure 08: principe de moulage par centrifugation [1].

I. 4. 5. Moulage par infusion (sous vide) :

Le moulage sous vide utilise simultanément le vide et la pression atmosphérique. On dépose le renfort sur un moule puis on verse une résine adaptée à ce type de moulage. On recouvre par la suite le contre moule d'une feuille de caoutchouc ou de nylon pour assurer l'étanchéité (figure 9). Ainsi, on crée une dépression entre le moule et le contre moule grâce à une pompe sous vide. Cette dépression permet de bien étaler et d'ébuller la résine ce qui nous permet d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques [1].

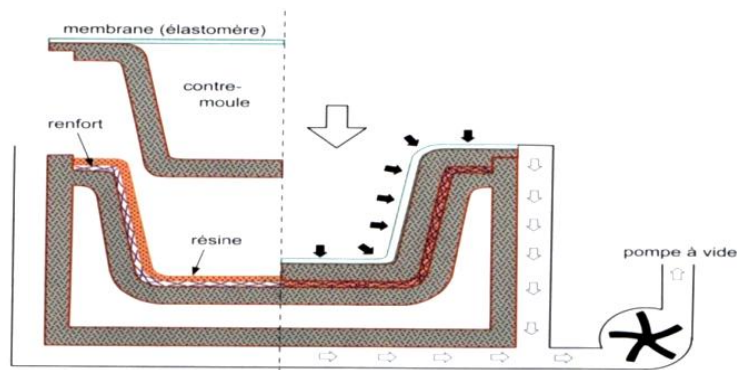


Figure 09: principe de moulage par infusion [1].

Avantages et inconvénients :

- **Avantage :**
 - Taux de renfort pouvant atteindre 65 %.
 - Bon compactage des tissus
 - Bonne imprégnation
- **Inconvénients :**
 - Difficulté de mise en œuvre et de la gestion des paramètres
 - Matériel non réutilisable

I. 5. Structure des matériaux composites :

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

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

I. 5. 1. Les monocouches :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibre courtes [1].

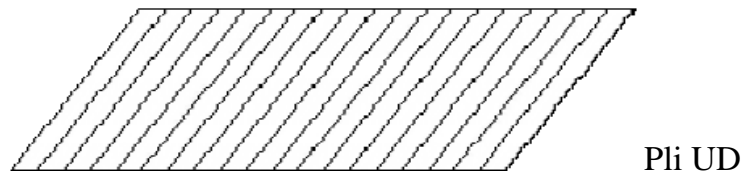


Figure 10 : composite monocouche [1].

I. 5. 2. Les Stratifiés :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié [2].

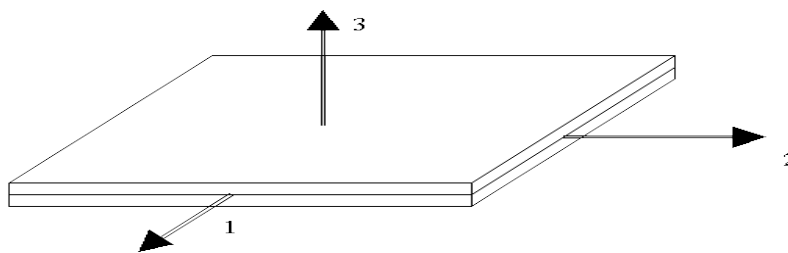


Figure11.composite stratifié [1].

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec 4 couches dans les directions $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié [1].

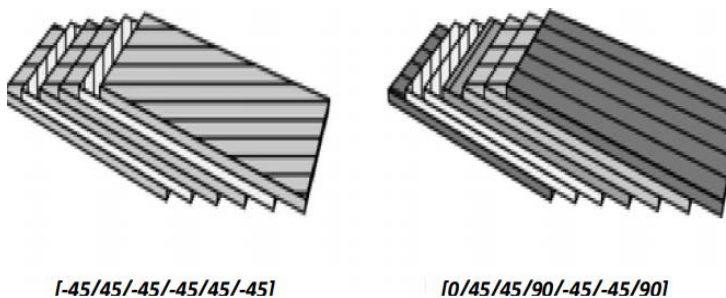


Figure 12: Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels. Les nombres entre crochets désignent l'angle de chaque pli (en degrés) par rapport à une direction de référence [1].

I. 5.3. Sandwichs :

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique [2].

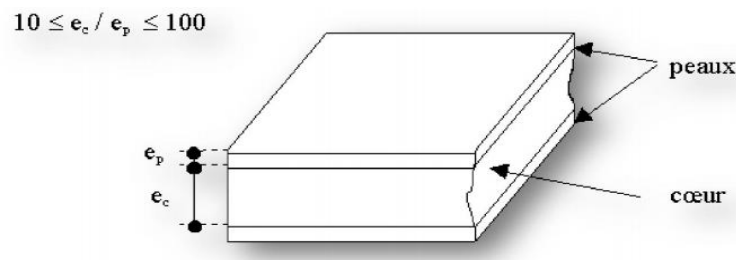


Figure 13 : Composite sandwichs [2].

I. 6. Les domaines d'utilisation :

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines [2] :

- Mécanique générale et divers (engrenages, corps de vérins, pneumatiques à carcasses radiales, carters, éléments de tables traçantes, tuyauterie...).
- Sport et loisirs (raquettes de tennis et squash, clubs de golf.....).
- Les transports (routier, ferroviaire, maritime, filaire, aérien, spatial).
- Bâtiment et travaux publics (coffrages moules à béton, cloisons, portes mobilier...)

II.1. Introduction :

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'entreprise ONAAPH (L'Office National d'Appareillages et d'Accessoires pour Personnes Handicapées). Cette dernière conçoit fabrique et adapte des équipements (appareillage) d'orthopédie et prothèses sur mesure, destinés aux personnes handicapées à fin de corriger une déformation ou pallier un déficit fonctionnel. Dans un premier lieu un historique et une présentation de l'entreprise sont présentés. Ces derniers sont suivies par la présentation de la gamme des produits conçus et fabriqués par l'entreprise. La dernière partie est réservée au procédé de fabrication des prothèses orthopédiques.

II.2. Historique :

Les appareillages orthopédiques, étaient destinés au début de l'indépendance de l'Algérie, à la prise en charge des victimes de la guerre de libération nationale au moyen d'ateliers mobiles (camions aménagés). A cette époque, la fabrication des différents appareillages était assurée par des entreprises étrangères [5].

La principale préoccupation consistait à assurer la disponibilité des produits essentiels, notamment les prothèses et les orthèses aux patients présentant des. Les prothèses étaient fabriqués en bois et présentait une faible souplesse. De plus, le poids pouvait atteindre environ 15 kg, alors que le corset qui est un organe de correction des déformations de la colonne vertébrale, était à cette époque fabriqué en plâtre.

Après 50 ans d'indépendance, la prise en charge en appareillages profite actuellement à 250.000 patients, dont les bénéficiaires des appareillages orthopédiques et des aides techniques à la marche. Il s'agit notamment des personnes handicapées de naissance, les personnes atteints de la scoliose, les diabétiques, les victimes d'accidents de la circulation et de travail [5].

Des efforts ont été développés par la suite en vue d'améliorations progressives du produit. Ce qui va assurer la promotion et le développement de ce secteur. En effet, en 1972, la Caisse nationale de la sécurité sociale avait repris les établissements étrangers et créé par la suite le Centre national d'appareillages orthopédiques (CNAO) [5].

Durant les années 1980, le même produit (prothèses) qui était fabriqué en acier et cuir et pesait environ 8 kg, a été développé durant la période 1990-2010 en utilisant le plastique et la prothèse a été allégée pour atteindre 6 à 4 kg [5].

L'évolution de la fabrication des prothèses est donc passée de l'utilisation du bois, de l'acier, du cuir puis du plastique, à l'emboîture sous forme de quillon à un pied dynamique.

II. 3. Présentation de l'entreprise :

L'entreprise ONAAPH (L'Office National d'Appareillages et d'Accessoires pour Personnes Handicapées) est un établissement public à caractère industriel et commercial disposant de plusieurs unités de fabrication et antennes polyvalentes implantées à travers le territoire national. C'est une entreprise spécialisée dans la fabrication, le développement, la promotion et la distribution des produits et moyens techniques et aides sanitaires sur mesure et de série. [5].

L'ONAAPH possède un réseau important de fabrication, d'accueil, de prestation et de distribution des moyens techniques et sanitaires implanté à travers le territoire national [5]:

- 04 agences
- 32 antennes.
- 11 centres de fabrication.
- 07 centres de lunetterie.
- 14 unités de production.
- 05 centres d'audioprothèse.

L'industrie orthopédique aujourd'hui nous offre une gamme très large de composants mécaniques, organes ainsi que des matières premières plastiques de haute technologie en différents matériaux, titane, carbone, alliage léger, silicone, kevlar, etc.

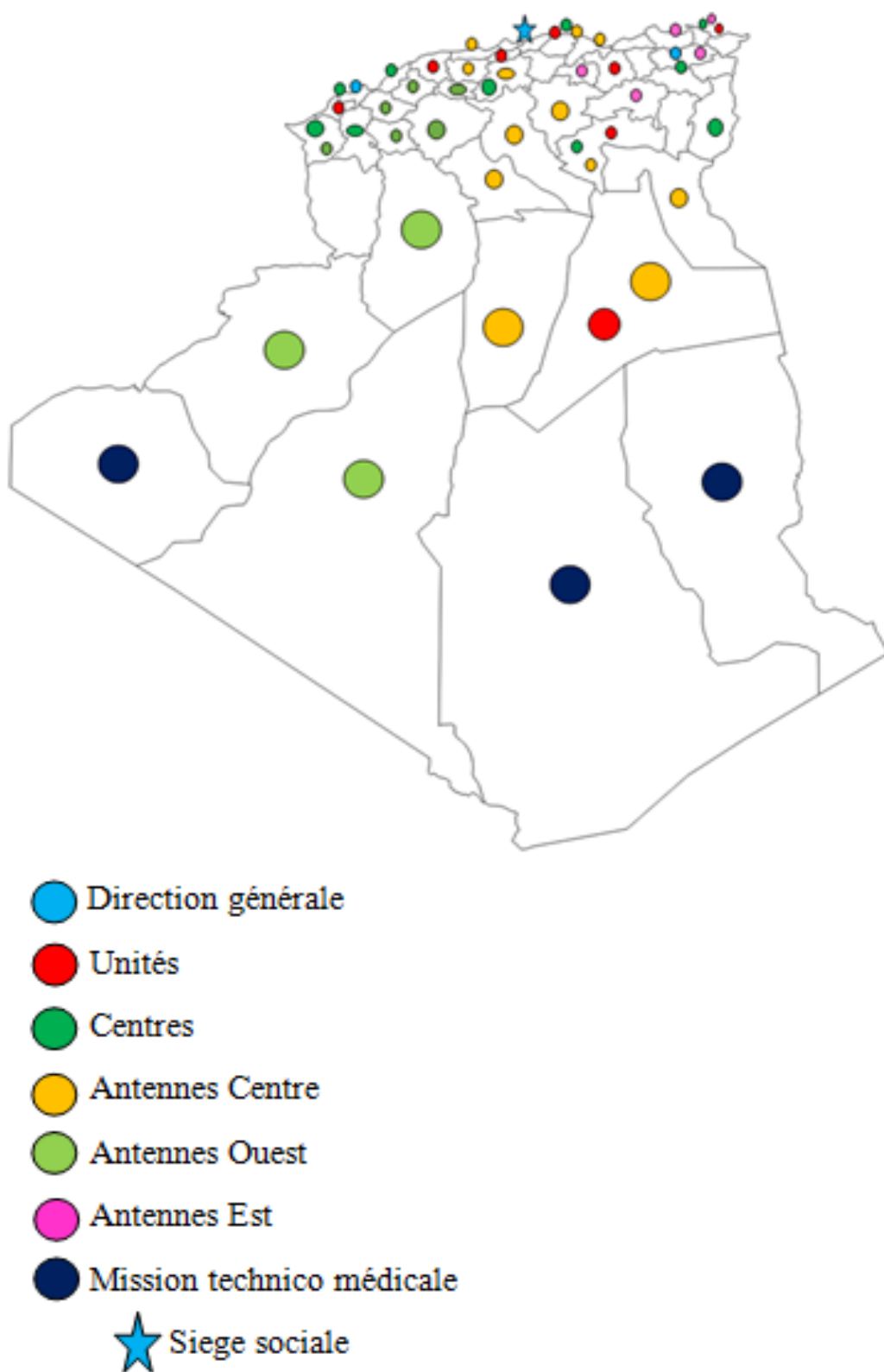


Figure 14: Les différents sièges, centres et antennes

II. 4. Structure de l'ONAAPH :

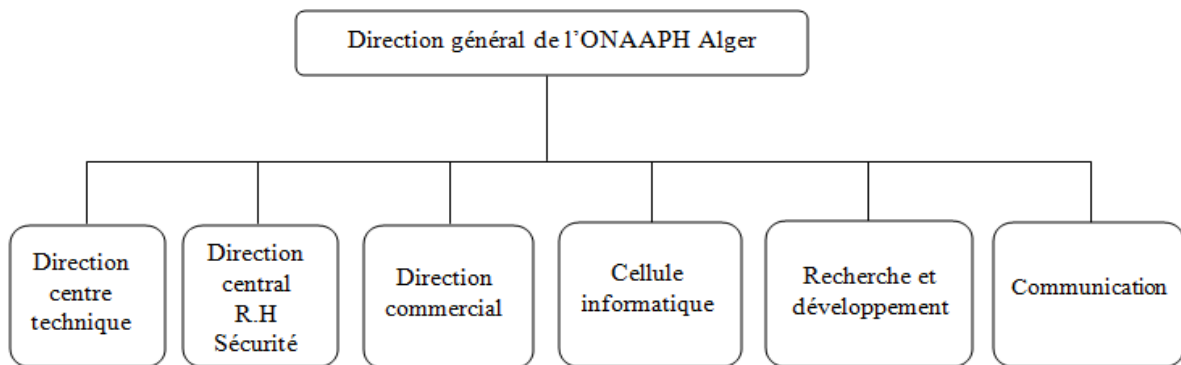


Figure 15 : Organigramme de l'entreprise [5]

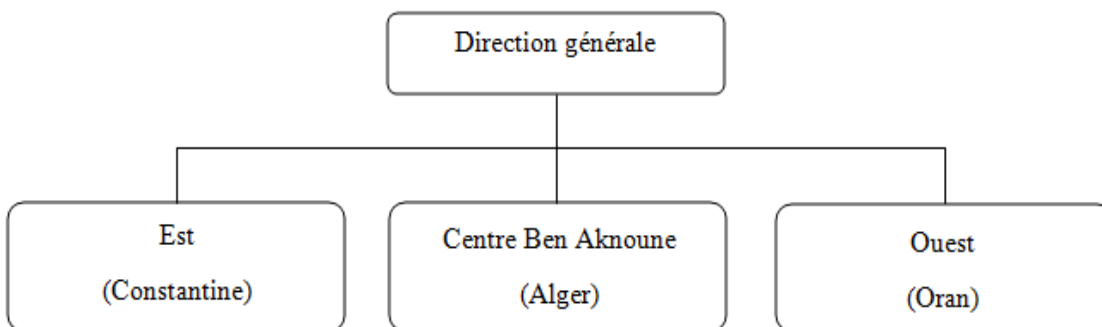


Figure 16 : Organigramme régional [5]

Chaque unité possède des centres des productions et antienne de distribution :

- Centre de production (Annaba, Guelma, Souk-Ahras, Tébessa)
- Antienne (unités) de distribution (Khanshla, ELKala, Sedrata)

II. 5. Domaines d'activités :

La mission de L'ONAAPH, est la réalisation des objectifs ayant pour sujet, la rééducation, la réadaptation et la réinsertion des personnes handicapées."Assurer la réalisation des appareillages et aides techniques à la marche pour personnes handicapées, organiser et assurer la maintenance des produits d'appareillage. De plus, les aides techniques à la marches et accessoires et de participer à l'élaboration des normes en matière d'appareillages, figurent également parmi les missions de l'Office [5].

Trois domaines d'activités stratégiques sont inscrits dans le cadre de la prise en charge gérée par l'ONAAPH, dont les appareillages orthopédiques qui sont fabriqués localement dans les

unités de production de l'office (prothèses, orthèses, attelles), alors que la matière première est importée de l'Europe.

La deuxième activité stratégique de l'office porte sur la prise en charge en matière d'aides techniques à la marche, notamment les fauteuils roulants dont la production est 100% locale, en plus des voiturettes et des poussettes pour les enfants ayant une insuffisance motrice cérébrale (IMC).

II. 6. Les produits de l'ONAAPH :

On distingue plusieurs produits fabriqués sur mesure ou en série (Figure 17) [5].

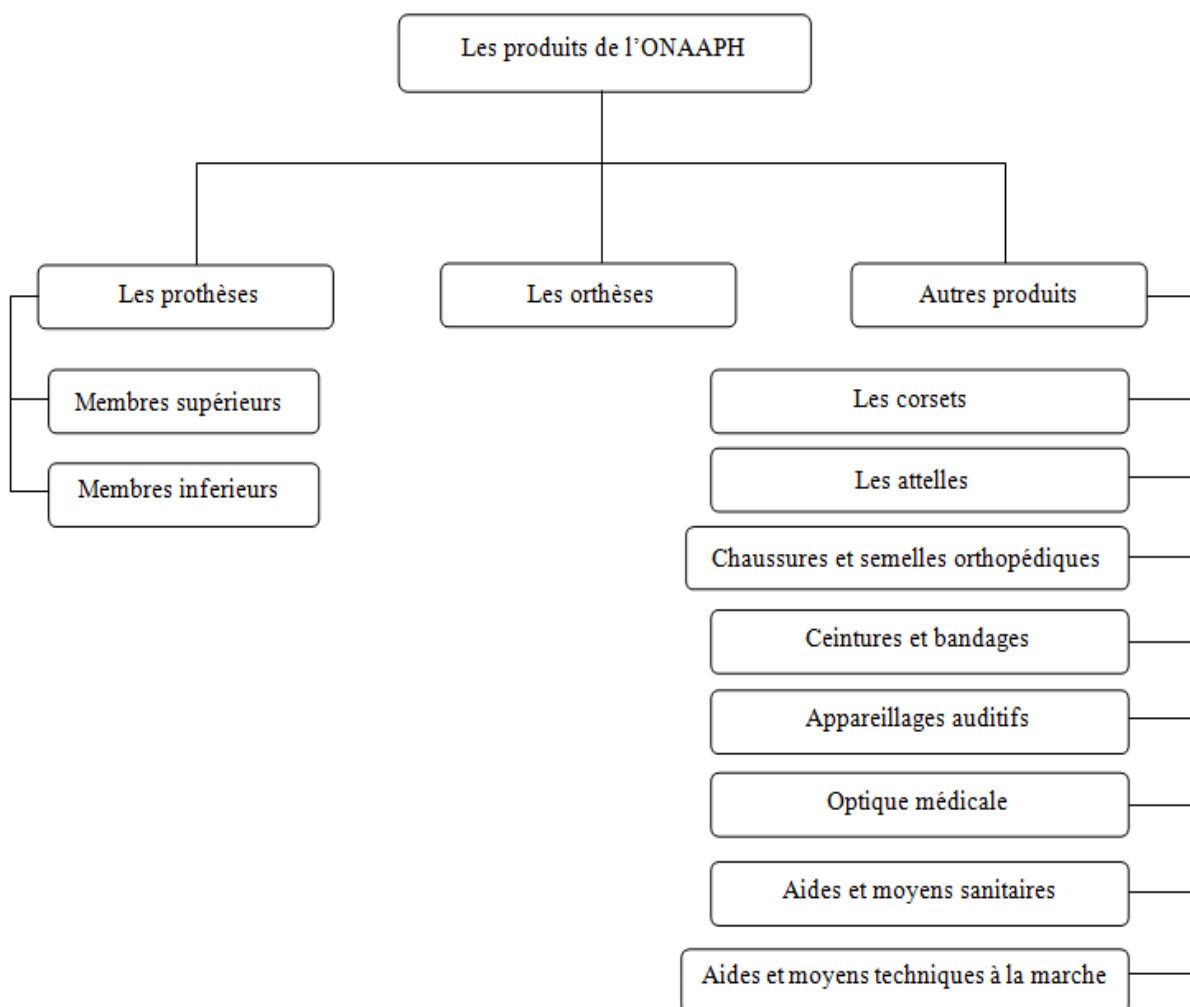


Figure 17 : organigramme produits d'ONAAPH

a) Les prothèses :

Permettent la reprise de la marche et la station debout des personnes amputées d'un membre inférieur et prothèses pour les membres supérieurs [5]:

➤ Prothèses du membre inférieur :

Il existe plusieurs prothèses pour membres inférieur :

- Prothèses de hanche.
- Prothèses fémorale.
- Prothèses griffi.
- Prothèses tibiale.
- Prothèses de pied.

➤ Prothèses du membre supérieur :

Il existe plusieurs prothèses pour membres supérieurs :

- Prothèses de l'épaule.
- Prothèses de bras
- Prothèses d'avant-bras
- Prothèses de main
- Prothèses myoélectrique
- électrique



(a)



(b)

Figure 18: Exemples de prothèses, (a) prothèses du membre inférieur, (b) prothèses membre supérieur.

b) Les orthèses :

Les orthèses sont des appareils visant à corriger une fonction déficiente, à compenser une incapacité ou à accroître le rendement physiologique d'un membre.

Il existe les orthèses pour membres inférieur et supérieur [5]:

- Orthèses du membre inférieur :

Orthèses cruro-pédieuse, Orthèses cruro-jambière, Orthèses jambo-pédieuse

- Orthèses du membre supérieur :

Orthèses bras ; avant-bras et main, Orthèses bras et avant-bras, Orthèses avant-bras et main



Figure 19 : Orthèses cruro-pédieuse.

c) Les corsets :

Appareillage intervenant en postopératoire, traitement ou prévention du rachis, réalisé à la morphologie du patient, et pour une durée provisoire ou définitive.

On distingue différents corsets :

Corset de maintien mono valve, Corset bivalve, Corset lyonnais, Corset milwaukee, Corset de boston, Corset de chéneau, Corset siège



Figure 20: corsets.

d) Les attelles :

L'attelle est presque semblable à l'orthèse. Ces attelles sont préconisées dans le cas de pathologies principalement d'origine neurologique entraînant des troubles orthopédiques et statiques du pied [5].

Il en existe plusieurs types :

Attelle cruro-pédieuse, Attelle cruro-jambière, Attelle jambo-pédieuse, Attelle pédieuse, Attelle palmaire

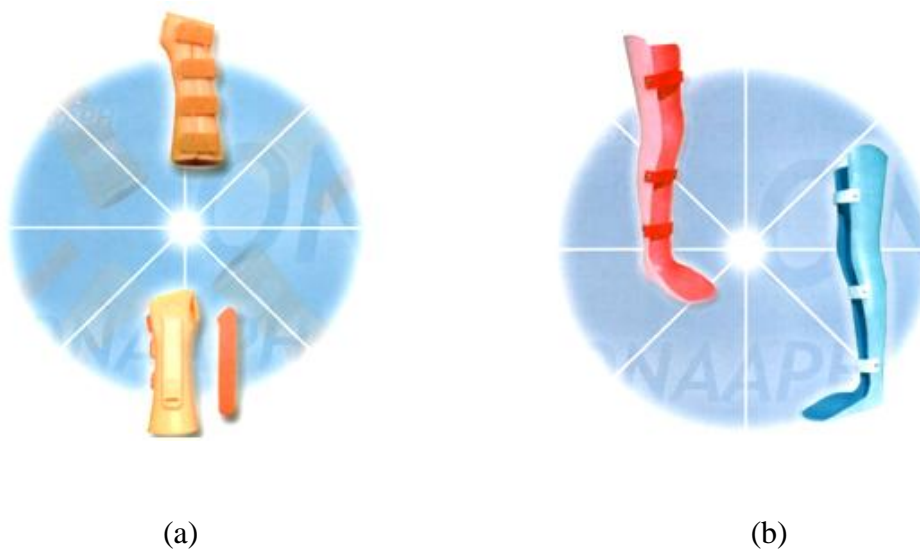


Figure 21 : les attelles, (a) Attelle Palmaire, (b) Attelle Cruro – Pédieuse

Il existe d'autres appareillages orthopédiques, à savoir : Ceinture et bandage (Ceinture dorsale, Bandage pour hernie inguinale), Appareillages auditifs (Prothèse auditive numérique), Optique médicale (Verres correcteurs), Chaussures et semelles orthopédiques, Aides et moyens techniques à la marche et Aides et moyens sanitaires.

II. 7. Constituants de base du composite de la prothèse orthopédique :

Le composite utilisé dans la fabrication des prothèses orthopédique de L'ONNAPH résulte de l'association de résine et de renforts verre textile et perlon.

➤ Le renfort :

En variant la composition du mélange de base (SiO_2), on peut obtenir différents types de verre. Celui utilisé dans ce procédé est le verre E. Les fibres de verre textiles sont peu coûteuses en raison de la nature des produits entrant dans leur composition (silice, kaolin, chaux,..) et de la simplicité des procédés de la fabrication [2].



Figure 22 : fibres de verre.

Propriétés mécaniques des fibres de verre :

Fibre de verre	Densité	Module d'élasticité (Mpa)	Allongement à la rupture (%)	Diamètre du filament élémentaire (μ)	Charge de rupture en traction (Mpa)	Charge de rupture en compression (Mpa)
E	2,45	7300	4,8	3à 30	3400	1200

Tableau 4 : Propriétés mécaniques des fibres de verre [2]

- **La fibre de carbone :**

Elles sont obtenues à partir de la distillation des huiles de pétrole, ces dernières sont oxydées à chaud (300°C) puis chauffées à 1500°C dans une atmosphère d'azote [2].

➤ Les additifs :

Accélérateur, durcisseur, pâte colorante.

➤ **La matrice :**

Pour la matrice on utilise une résine acrylique



Figure 23: Résine acrylique (à laminer 80:20).

La polymérisation est d'une grande importance dans la phase de fabrication du composite elle dépend directement des proportions et comporte plusieurs phases [6].

1. Phase pendant laquelle le mélange reste visqueux et peut se travailler facilement.
2. Phase de gélification qui apparaît plus au mois rapidement selon le dosage de l'accélérateur et du catalyseur.
3. Phase de durcissement, soit à température ambiante, soit sous l'action de la chaleur, qui à pour effet de diminuer la durée de cette phase.

➤ **Le perlon :**

Il existe plusieurs variétés de fibre polyamide utilisée essentiellement dans l'industrie textile, sous les noms commerciale de Nylon ou de Rilsan. Il existe également des variétés de haute ténacité de fibres polyamides, leurs propriétés mécaniques sont moyennes.

Leur utilisation dans les matériaux composites est très limitée à cause d'un inconvénient majeur : une grande sensibilité à l'humidité qui diminue d'environ 20 % sa résistance mécanique. L'absorption d'eau est de 4 à 5 % en masse aux conditions normales 20° C et 65 % d'humidité relative. En fin, l'élongation à la rupture est très importante de 15 à 30 %. Les propriétés chimiques sont bonnes avec en plus une sensibilité au rayon X [6].

L'association des fibres de perlon aux fibres de verre est due principalement à des raisons économiques, elle permet d'augmenter le taux de renfort avec un cout minimal. Leur utilisation avec des fibres de verre améliore la résistance du composite et leur aptitude à bien

adhérer aux résines organiques. Elle donne une meilleure résistance au délaminage, réduit le poids et protège le tissu de verre.

En traction, les fibres de perlon sont capables d'avoir un allongement important par rapport à leur longueur initiale.



Figure 24 : Perlon.

II. 8. Fabrication de la prothèse orthopédique :

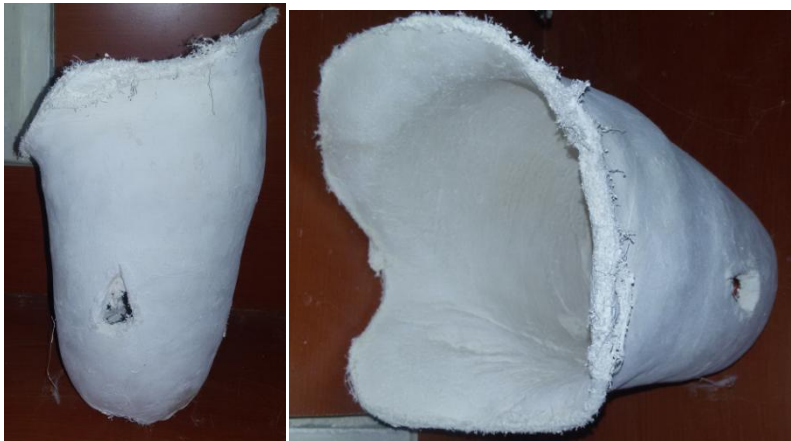
➤ Les matériaux utilisés :

- Résine acrylique : (Otto bock) résine à laminer 80 :20
- Tricot perlon polyamide
- Film (PVA)
- Fibre de verre
- Module en plâtre

➤ Procède de fabrication :

Le procédé de fabrication de la prothèse orthopédique on passe par plusieurs étapes :

- 1) Prendre une empreinte « un négatif » du moignon de notre patient.



Figures 25 : Un négatif du moignon d'un patient

- 2) reproduire la forme du moignon en plâtre, « un positif ».



Figure 26 : La forme du moignon en plâtre

- 3) préparation du film isolant en (PVA)



Figure 27 : Préparation du film isolant en (PVA)

- 4) Talquer l'intérieur du film pour réduire le frottement ensuite l'enfiler par dessus le manchon en faisant attention à ne pas abimer l'isolant.



Figure 28 : Préparation et enfilement du film (PVA).

- 5) Mettre le film sur le manchon et fermer le film en dessous



Figure 29 : Etanchéité du film PVA sur le moule

6) Aspiration de l'air entre le moule est le sac isolant (PVA)



Figure 30: Mettre l'appareil électrique à dépression en marche

7) Empilement de deux couches de perlon sur le manchon isolé



Figure 31: Enfilement du perlon

8) Répétition de la même opération avec le tricot de verre



Figure 32 : Enfilement du tricot de verre

9) Recouvrir le verre par deux autres couches de perlon.



Figure 33 : Enfilement des deux autres couches de perlon

10) Mettre un autre film (PVA), talquer à l'intérieur



Figure 34 : Enfilement du deuxième film de (PVA)

11) Aspiration en dessous du sac extérieur d'environ « 0,8 bar ».



Figure 35: Aspirateur d'air (deuxième aspiration)

12) Préparer le mélange de 350 gr de résine à laminer avec 7 gr de durcisseur.



Figure 36 : Préparation du mélange résine, durcisseur

13) Verser le mélange au niveau de l'ouverture du film.



Figure 37 : Imprégnation du mélange à l'intérieur du moule

14) La répartition de la résine dans la totalité du moule.



Figure 38 : Répartition de la résine.

15) Finition de la prothèse.



Figure 39 : rectifier de la prothèse.

16) La dernière étape est l'obtention d'une prothèse modulaire fémorale on ajoutant des accessoires adaptés à ce type de prothèse.

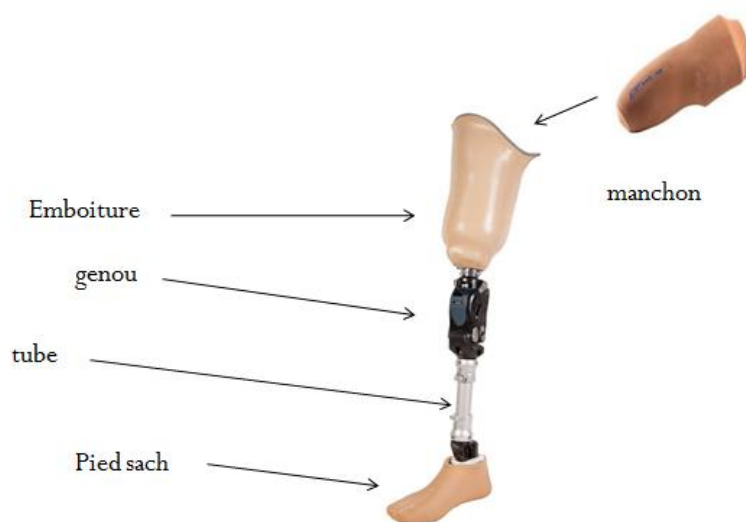


Figure 40 : Prothèse modulaire fémorale.

III. 1. Introduction :

Un des objectifs de ce chapitre est présente le comportement mécanique en traction d'un composite utilisé dans la fabrication des prothèses orthopédiques. Le comportement des matériaux composites dépend de la nature des constituants qui rentrent dans leur fabrication, notamment les renforts [7]. La première partie de ce chapitre est consacré à la présentation la description du matériau et le comportement en traction, la deuxième partie, on va présenter l'analyse morphologie de rupture et l'influence de paramètre de fabrication.

III. 2. Description du matériau :

Le matériau étudié est un composite constitué d'une résine acrylique initialement sous forme liquide. La polymérisation nécessite un durcisseur et un accélérateur de durcissement. Pour des raisons d'esthétique, il est nécessaire d'ajouter en plus un additif sous forme de pâte colorante mélangée à la résine [7].

A cette résine, on associe deux types de tricots sont utilisés, le verre et le perlon (Fig. 41). Le tricot de verre est du type (E). Sa structure en tricot lui confère une élasticité qui lui permet d'épouser les formes complexes des emboitures. Etant données ces faibles caractéristiques mécaniques, le perlon (polyamide), possède une fiable contribution dans le renforcement du composite. D'un autre côté, il permet d'améliorer l'aspect de surface à cause de sa structure fine par rapport au tricot de verre.

L'élaboration du composite commence par l'empilement des tricots selon l'ordre de stratification. Ainsi, ils sont tendus manuellement sur le moule mâle dans le sens du moulage (sens colonne). De plus, par rapport à la largeur du moule, ils sont tendus selon la circonférence (sens rangée). Ainsi, on en déduit aisément que la tension dans les deux sens risque d'être différente [7].

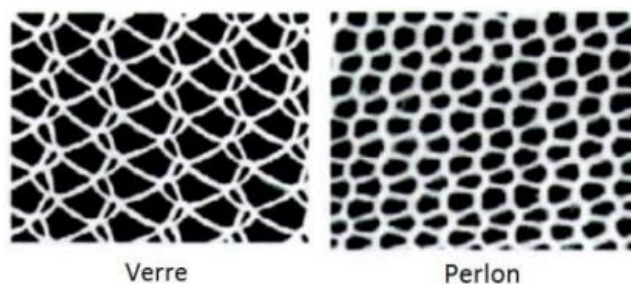


Figure 41 : Structure des renforts utilisés [7].

Le procédé de fabrication correspond plus au moulage par infusion. Il se présente comme une solution optimale pour la fabrication des prothèses orthopédiques. Dans notre cas, la fabrication des éprouvettes est effectuée en respectant la procédure d'élaboration propre aux prothèses. Seule la forme du moule est changée. Il s'agit d'empiler les tricot secs dans l'ordre de stratification sur le moule enveloppé par un film de démoulage. L'ensemble est ensuite couvert par un sac en plastique soudé et étanche. Ce dernier, comporte en haut du moule une ouverture pour pouvoir verser la résine liquide. Par contre, au niveau de la partie inférieure du moule, nous avons l'aspiration de l'air. Ainsi, La résine, préparée séparément dans un récipient, est versée dans le moule (Fig.42(a)). Cette dernière est répartie dans moule grâce à l'effet combiné de la gravité et de l'aspiration d'air par le bas. Généralement, on intervient manuellement pour racler la résine vers les endroits éloignés du moule. La polymérisation dure environ 20 minutes et s'accompagne par un dégagement de chaleur.

Afin de pouvoir mettre en évidence l'éventuel effet de la stratification, nous avons considéré deux séquences d'empilement [7]:

- Série 1 : P / VV / P Avec : P : tricot de perlon
- Série 2 : V / PP / V V : tricot de verre

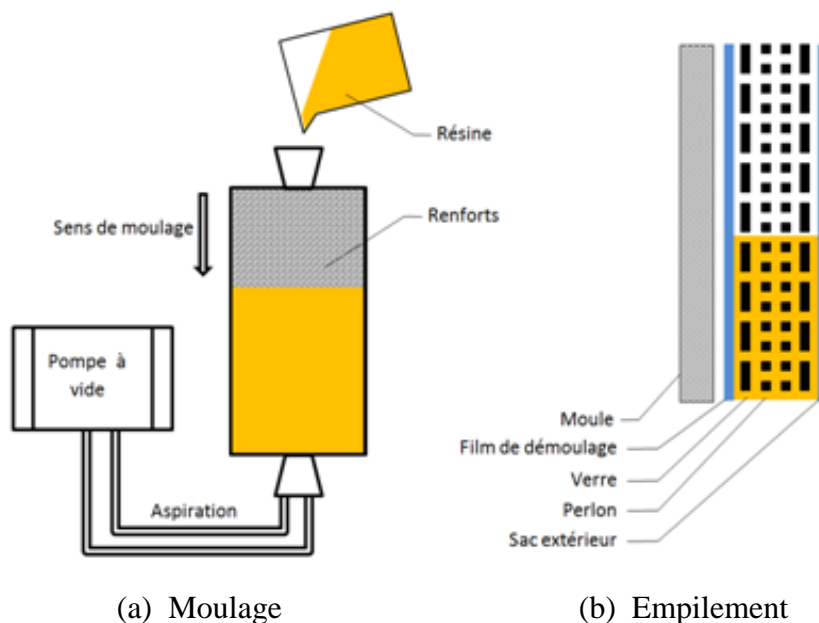


Figure 42 : Structure et élaboration du matériau [7].

Compte tenu, de la nature structurelle du renfort qui suppose un comportement anisotrope en traction, la découpe des éprouvettes s'est faite selon trois directions par rapport au sens principal de moulage, 0° , 45° et 90° (Figure).

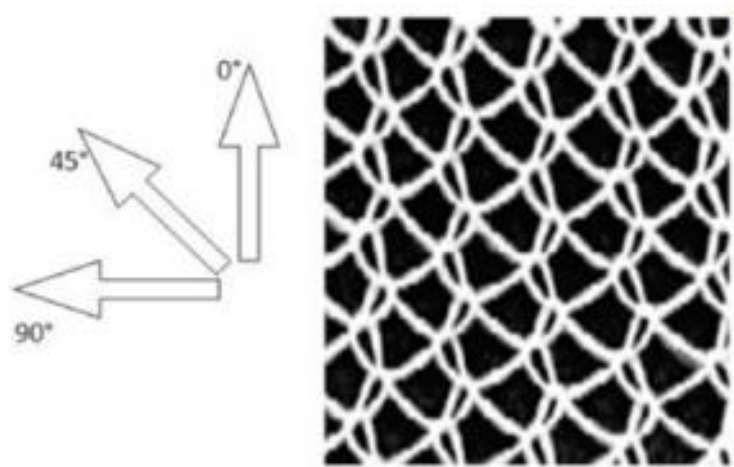


Figure 43 : Schématisation du moulage des éprouvettes [7].

Le choix de ces orientations dépend en premier lieu de la structure des mailles sur laquelle on observe des directions préférentielles des fibres. Ce qui permet d'émettre l'hypothèse que le plan du tricot est un plan d'orthotrope.

III. 3. Comportement en traction :

III. 3. 1. Cas du pli de verre :

La finalité de l'étude du comportement mécanique des matériaux est en générale la connaissance de leur réponse suite à une sollicitation donnée. Cela est possible grâce à deux variables (les contraintes et les déformations). Sous l'effet des contraintes, un matériau va se déformer pour en suite se rompre. L'intensité de la contrainte engendre des déformations de différente nature (élastiques et plastiques).

Les matériaux composites présentent différents types de comportement mécanique qui dépendent de la nature des constituants, du taux de fibre et de la structure du composite. D'un autre côté, la rupture finale fait intervenir différents types de mécanisme d'endommagement dont la combinaison produit différents scénarios de rupture conduisant fatalement à la ruine des structures en composite.

Les essais de tractions réalisés sur les éprouvettes vierges ont permis d'avoir divers résultats. Il est nécessaire d'effectuer des traitements pour pouvoir interpréter ces résultats.

Dans un premier lieu, on effectue des représentations graphiques sous forme de courbes. Principalement nous avons :

- Effort-temps
- Effort-déplacement
- Contrainte-déformation

L'évolution de l'effort en fonction des déplacements dans le cas des éprouvettes saines présente une tendance globale faiblement non linéaire. On observe une grande dispersion au niveau de l'effort de rupture, le déplacement jusqu'à la rupture et la rigidité. La rupture correspond à un niveau de chargement qui varie entre 600 et 1200 N. Vers la fin, les courbes présentent des pics qui correspondent probablement à propagation des fissures transverses de la matrice, ou de la rupture des interfaces fibres matrices.

Le comportement non linéaire est typique des matériaux composites. C'est en général, la conséquence de l'endommagement qui s'opère au sein du matériau, qui engendre des déformations non élastiques. Plusieurs mécanismes d'endommagement sont à considérer, principalement c'est la fissuration de la matrice et la rupture des interfaces fibres/matrice qui conduisent au déchaussement et à la rupture des fibres.

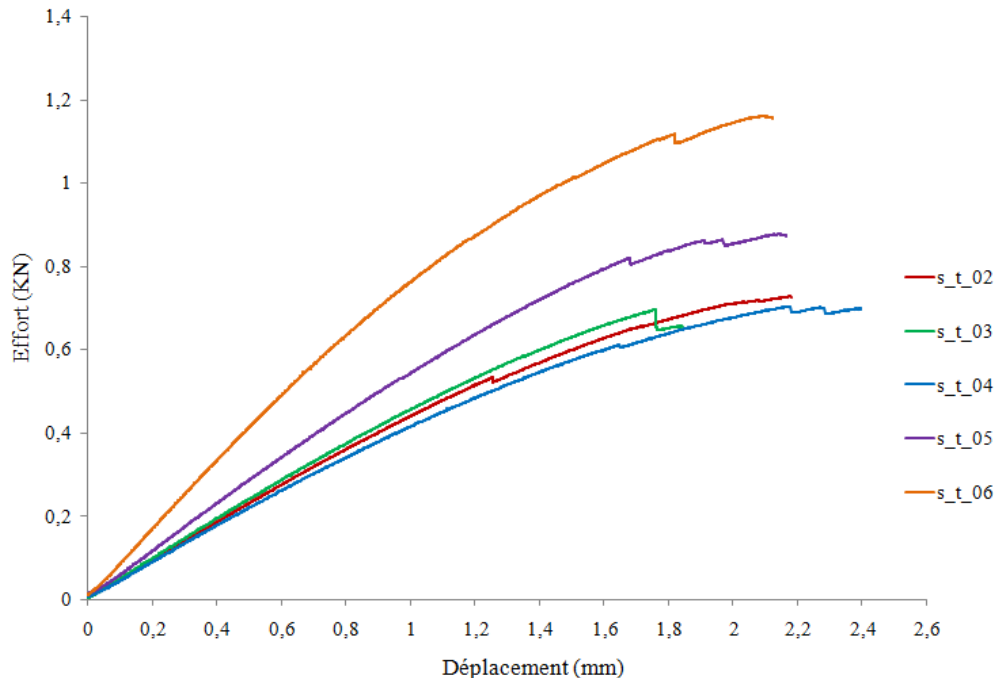


Figure 44 : Courbes de traction des essais sur les éprouvettes vierges (effort-déplacement).

On calcule la moyenne et l'écart types pour les éprouvettes saines.

Pour la moyenne, le calcul se fait en fonction des données recueillies, l'équation (1)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots \dots \dots (1)$$

L'écart type se calcul en fonction de la variance empirique (S^2). La racine carrée de la variance est appelée écart type :

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \dots \dots \dots (2)$$

Eprouvettes saines		
	F_{Rup} (KN)	D_{Rup} (mm)
Moyenne	0,81	2,15
Ecart-type	0,2	0,19

Tableau 05 : La moyenne et l'écart type des efforts et déplacements.

III. 3. 2. Cas du composite :

Le matériau se caractérise par de faibles valeurs de rigidité et de contraintes de rupture. Ce qui est dû probablement au taux de fibre relativement faible. De plus, les valeurs présentent une grande dispersion notamment celles du module de Young (Tab. 06). Cette dernière peut être attribuée aux facteurs suivants [7] :

- Présence de porosités
- Epaisseur irrégulière
- Plissement des tricots au niveau des extrémités du moule
- Tensions variables du renfort

Série 1				Série 2			
Orientation	E (ET) (MPa)	σ_{Rup} (ET) (MPa)	ϵ_{Rup}(ET) (%)	Orientation	E (ET) (MPa)	σ_{Rup} (ET) (MPa)	ϵ_{Rup}(ET) (%)
0°	4239 (764)	25.18 (1.57)	0.99 (0.07)	0°	3376 (182)	25.61 (1.71)	1.10 (0.07)
45°	3588 (608)	29.38 (1.57)	0.98 (0.06)	45°	3964 (275)	29.81 (1.49)	1.19 (0.15)
90°	4234 (732)	48.97 (5.67)	1.81 (0.24)	90°	3780 (849)	39.26 (1.71)	1.56 (0.08)

Tableau 06 : Caractéristiques mécaniques du matériau.

Durant l'essai de traction, les déformations, après chaque décharge, ne reviennent pas à la valeur initiale, c.-à-d., la valeur nulle de la déformation. Ces valeurs résiduelles (ϵ^*) qui

augmentent à chaque cycle, peuvent correspondre à des déformations non-élastiques du matériau [7].

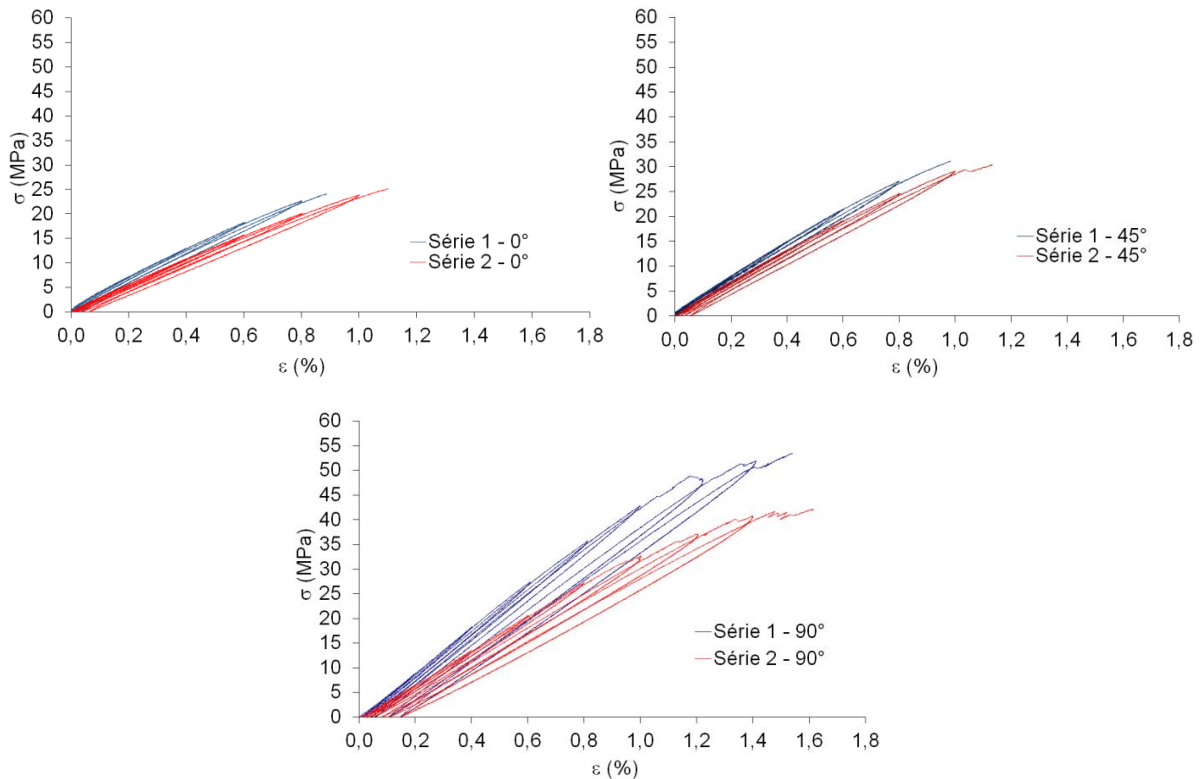


Figure 45 : Courbes de traction selon les orientations 0°, 45° et 90°.

Les différentes orientations présentent des valeurs du module de Young très rapprochées. Par contre pour la contrainte et la déformation à la rupture, les valeurs des orientations 0° et 45° sont différentes de celles de l'orientation 90°. Les orientations 0° et 45° présentent un comportement similaire avec une faible non linéarité et une déformation résiduelle inférieure à 10 % de la déformation totale. Cependant, l'orientation à 90°, présente des hystérésis plus larges, avec une déformation résiduelle relativement plus importante.

III. 4. Analyse morphologie de rupture :

Les composites présentent souvent un scénario de rupture similaire. Dans notre cas, la transparence de résine fait apparaître l'endommagement des éprouvettes. L'analyse de la morphologie de rupture se présente sous deux aspects : l'aspect macroscopique et l'aspect microscopique. Dans le premier cas, c.-à-d., à l'échelle macroscopique, on distingue clairement des fissures qui traversent la largeur et sont réparties tout le long des éprouvettes (figure 46). Ces derniers sont appelées fissures transverses.

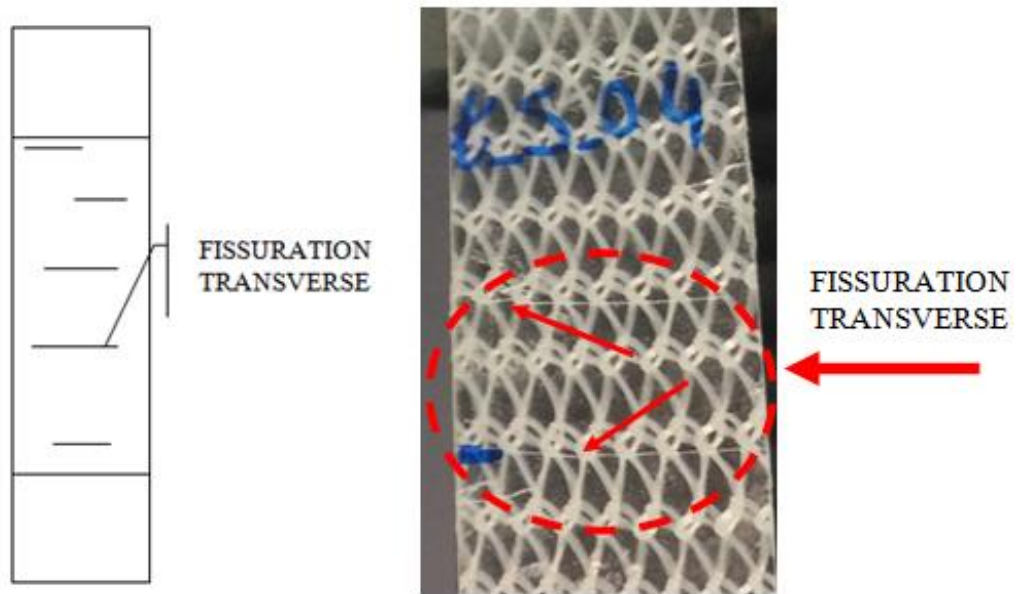


Figure 46: Fissuration transverse.

La rupture finale des éprouvettes est généralement la séparation en deux selon un plan qui suit la structure du tricot de verre (figure 47). La localisation de la rupture finale est aléatoire entre les mors de la machine.

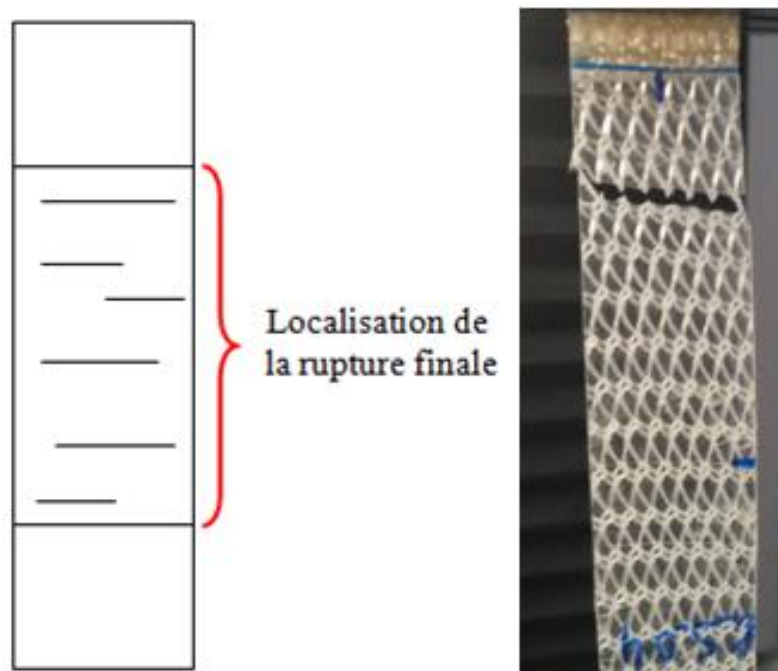


Figure 47: La localisation de la rupture finale

Les points dégagés de la morphologie et l'analyse de la rupture nous ont permis de remonter le scénario de la rupture [8]:

1. Formation de fissures transverses.

2. Multiplication des fissures transverses sur les surfaces pour occupes dans la majorité des cas toute la surface.
3. Une des fissures transverses généralement localisée dans la zone centrale cède la place à une rupture catastrophique qui démarre des bords séparant ainsi la matrice et laissant parait les fibres des tissus.
4. Apparition des renforts par déchaussement.
5. Finalement, rupture des fibres qui se cassent sous l'effet des contraintes de traction.

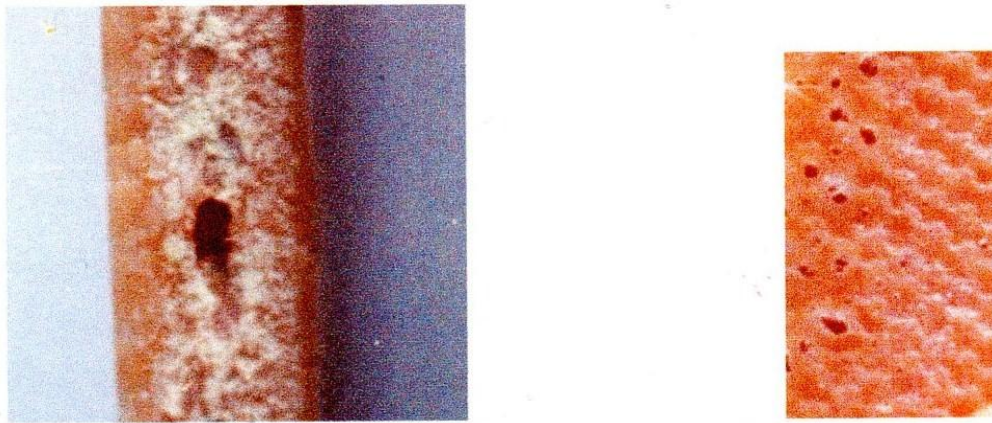
III. 5. Influence des paramètres de fabrication :

Les défauts observés après transformation par injection peuvent avoir plusieurs origines. Connaitre les types de défauts et leurs origines s'avère très important dans la mesure, ou des interventions à faible coût peuvent s'opérer avec succès pour réduire ces défauts en nombre, voir même les éliminer dans certains cas. Les défauts d'injection peuvent avoir plusieurs origines possibles liées [6] :

- A une erreur de conception du produit
- Au moule
- A la matière
- A un mauvais paramétrage du processus.

La détermination des paramètres d'injection qui minimise la présence de vides dans pièces injection, reposent Sur un modèle de prévision du taux de défauts établis à partir d'une analyse empirique de la formation du vide et du comportement de l'écoulement, ceci à permis de démontrer l'existence d'un domaine de paramètres pour lequel le risque de création de vide est minimal. En toute évidence un procédé artisanal, rend impossible l'obtention de pièces à caractéristiques identique, à cause des défauts qui en résultent [6] [8] :

1. **La porosité** : la présence de vide dans les prothèses est due essentiellement à l'étanchéité du moule et l'aspiration de l'air. On distingue les porosités d'épaisseur (figure 48.a), et les porosités de surface (figure 48.b).



(a) Porosité au sein des éprouvettes

(b) porosité de surface

Figure 48 : porosité du composite.

2. **Formation de pli dans les tricots :** Pendant la fabrication des prothèses les tricots de verre et de perlon sont empilés sur le moule. Pour les maintenir tendus les tricots sont noués et attachés aux deux extrémités du moule. Ceci engendre des plis des tricots aux niveaux des deux extrémités.
3. **Surplus de résine :** L'écoulement de la résine dans le moule s'effectue sous l'effet de la gravité. Avant polymérisation, il est possible que la résine s'accumule dans la partie inférieure du moule, créant ainsi une zone de surépaisseur.

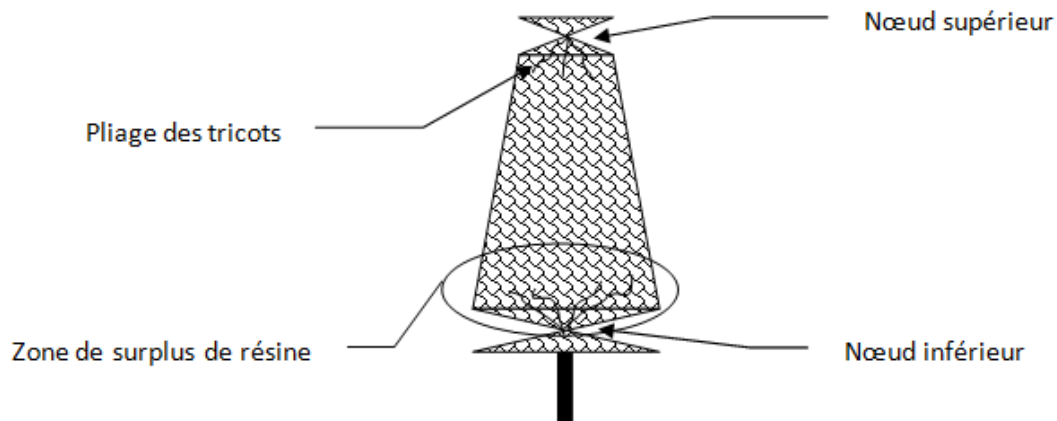


Figure 49 : différence des épaisseurs.

4. **Épaisseur variable :** l'écoulement de la résine dans le moule pendant l'imprégnation des tricots se fait par gravité. Cependant, le dispatching est effectué par l'opérateur pour s'assurer que toutes les parties du moule sont imprégnées. En conséquence, le composite obtenu présente une irrégularité d'épaisseur, (Figure 50).



Figure 50 : Irrégularité de l'épaisseur du composite

5. Tension des fibres de verre :

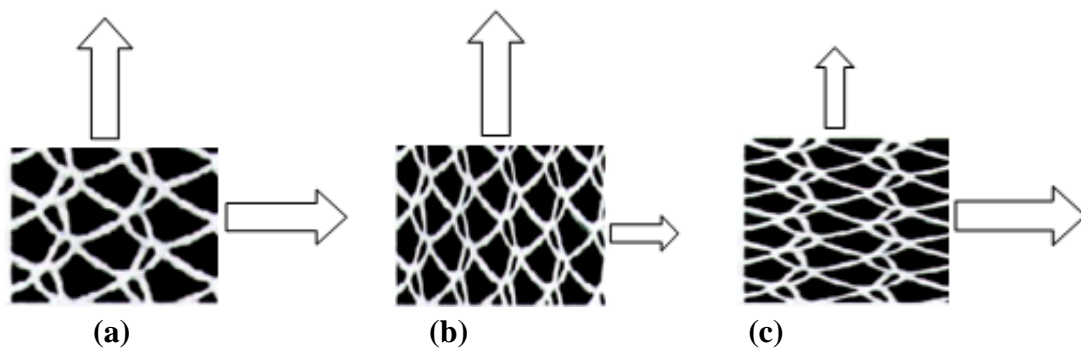


Figure 51 : Tensions dans les tricots de verre.

Les tricots doivent être empilés avec tension. Cependant, la tension exercée sur ces derniers peut ne pas être la même dans les directions principales des tricots. Ceci peut engendrer une anisotropie de propriétés. Sur la (figure 51-a), le tricot de verre a subi des tensions égales dans les directions colonnes et rangés. Par contre, la (figure 51-b), montre le cas où la tension sens colonnes est supérieure à celle sens rangés. La (figure 51-c) montre le cas inverse où la tension sens rangés est supérieure à celle du sens colonnes.

IV. 1. Introduction :

Le principe des méthodes expérimentales en mécanique consiste à tester un matériau par des essais répétés. L'objectif principal est souvent l'obtention des caractéristiques, qualitatives ou quantitatives qui serviront à la compréhension et la modélisation du comportement mécanique. En général, il s'agit de varier un ou plusieurs paramètres à l'aide d'un dispositif expérimental conçu pour permettre le contrôle de ces derniers. Ainsi, dans le but de mesurer la réponse du matériau à travers les effets obtenus ce qui va permettre de les modéliser. Dans cet esprit, notre travail consiste à caractériser en traction monotone, un composite hybride constitué d'un tricot de fibre de verre, d'un tricot de perlon et de résine acrylique.

IV. 2. Élaboration du matériau:

IV. 2. 1. Les constituants :

Les constituants utilisés dans la fabrication des éprouvettes sont identiques à ceux du composite des prothèses.

➤ Le verre E :

Le verre de type E, présent le meilleur compromis entre le coût et les caractéristiques mécaniques, le tableau suivant indiquent ses principales propriétés [1] [2]:

caractéristiques	Masse volumique ρ_f (kg/m ³)	Module d'Yong E_f (MPa)	Coefficient de poisson ν_f	Contrainte à la rupture σ_{fu} (MPa)	Allongement à la rupture ξ_{fu} (%)	Module de cisaillement G_f (MPa)
Verre E	2600	74000	0,25	2500	3,5	30000

Tableau 7 : Les propriétés du verre E.

➤ **La résine acrylique :**

caractéristiques	Masse volumique ρ_m (kg/m ³)	Module d'Yong E_m (MPa)	Coefficient de poisson ν_m	Contrainte à la rupture σ_{mu} (MPa)	Allongement à la rupture ξ_{mu} (%)	Module de cisaillement G_m (MPa)
Résine acrylique	1190	3300	0,39	74	5	1700

Tableau 8: Les propriétés de résine acrylique.

➤ **Le polyamide :**

caractéristiques	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Module d'Yong E (MPa)	Coefficient de poisson ν	Contrainte à la rupture σ (MPa)	Allongement à la rupture ξ (%)
Résine acrylique	1100	2000	0,35	70	15

Tableau 9: Les propriétés des fibres polyamides.

IV. 2. 2. Description du procédé de fabrication :

Le procédé de fabrication des plaques destinées aux essais de traction est le même que celui utilisé dans la fabrication des prothèses, le seul changement réside dans la forme du moule qui est dans notre cas de géométrie plane ce qui permet d'obtenir deux plaques par moule.

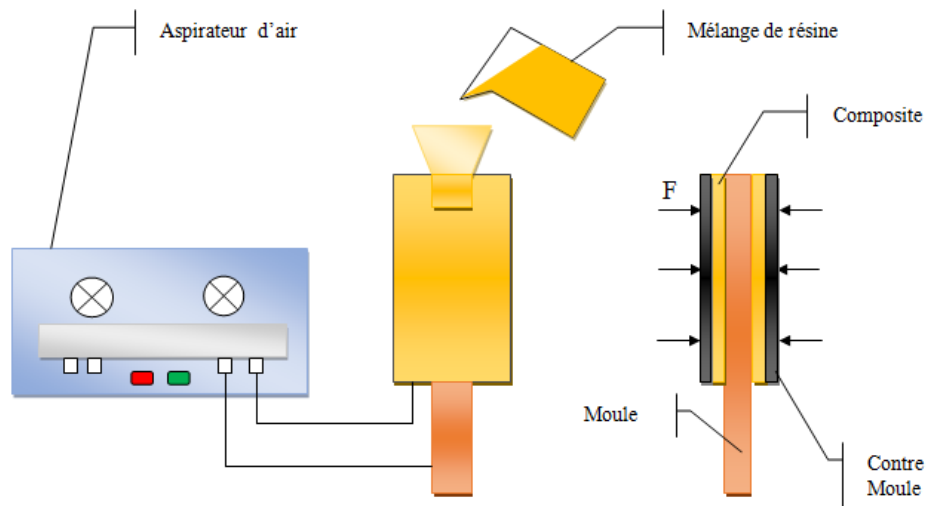


Figure 52 : Schématisation du procédé de moulage des plaques

IV. 3. Les éprouvettes :

Les dimensions des éprouvettes dépendent principalement de la taille du moule, lui-même dépendant en grande partie du diamètre du tricot de verre. Ce qui limite considérablement les dimensions des éprouvettes vis-à-vis certaines normes.

IV. 3. 1. La géométrie :

Les dimensions des éprouvettes ont été définies suivant les spécifications de la norme NFT51-034 (figure 53). La largeur b de l'éprouvette afin de répondre aux exigences de la norme et l'épaisseur e . La longueur L totale de l'éprouvette.

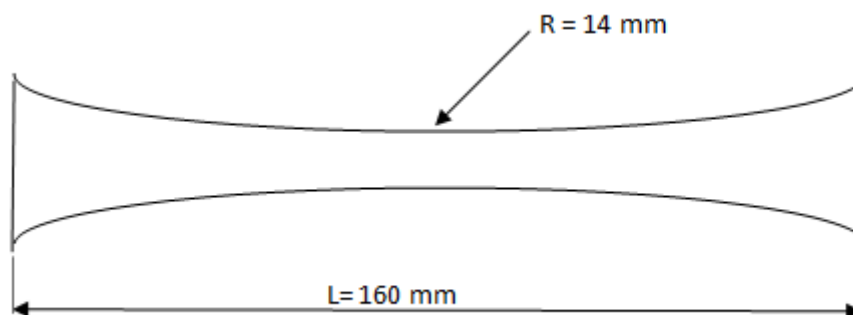


Figure 53 : Dimension de l'éprouvette.

IV. 3. 2. Le dispositif de découpe :

La finition des éprouvettes est effectuée sur une micro-tronçonneuse en utilisant une vitesse de rotation 300 RPM, la avance 0.100 mm/s et longueur de coupe 20 mm.



Figure 54 : L'opération des découpes d'éprouvettes.

IV. 3. 3. Le traçage des éprouvettes :

Avant l'exécution des essais de traction, il est nécessaire d'effectuer un traçage des éprouvettes. Ce dernier permet d'un côté, d'assurer la perpendicularité des éprouvettes par rapport à l'axe d'application de la charge et d'un autre côté, faciliter la mise en place par rapport à la distance entre les mors de la machine.

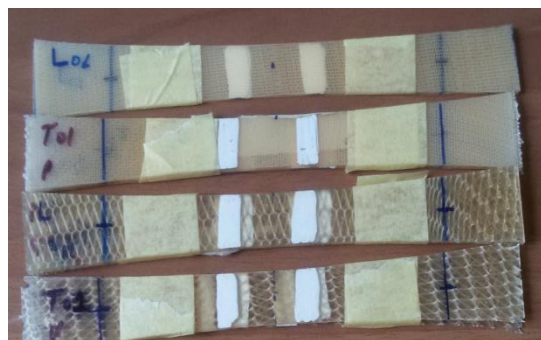


Figure 55: Traçage des éprouvettes

IV. 3. 4. Paramètres géométriques des éprouvettes :

Dans notre étude, nous avons considéré d'éprouvettes. Des éprouvettes transverses et longitudinales ne présentant aucune modification de la géométrie.

	Epaisseur (e) mm	Largueur (b) mm	Longueur (L) mm	Distance entre more mm
1L-01	2,40	14	160	110
1L-02	2,30	14	160	110
1L-03	2,25	14	160	110
1T-01	2,43	14	160	110
1T-02	2,45	14	160	110

Tableau 10 : Dimensions des éprouvettes transverse et longitudinal de composite.

	Epaisseur (e) mm	Largueur (b) mm	Longueur (L) mm	Distance entre more mm
2L-01	1,28	14	160	110
2L-02	1,16	14	160	110
2L-03	1,97	14	160	110
2L-04	1,90	14	160	110
2T-01	1,61	14	160	110
2T-02	1,55	14	160	110
2T-03	1,09	14	160	110

Tableau 11 : Dimensions des éprouvettes transverse et longitudinal de verre.

	Epaisseur (e)	Largueur (b)	Longueur (L)	Distance entre more
3L-01	1,00	14	160	110
3L-02	1,02	14	160	110
3T-01	1,06	14	160	110
3T-02	1,09	14	160	110
3T-03	1,13	14	160	110

Tableau 12 : Dimensions des éprouvettes transverse et longitudinal de perlon.

IV. 5. L'essai de traction :

Les éprouvettes décrites ci-dessus sont destinées à des essais de traction monotones. Le principe de base de cet essai repose sur l'action de deux forces égales et directement opposées agissant sur une barre rectiligne qui tendent à l'allonger :

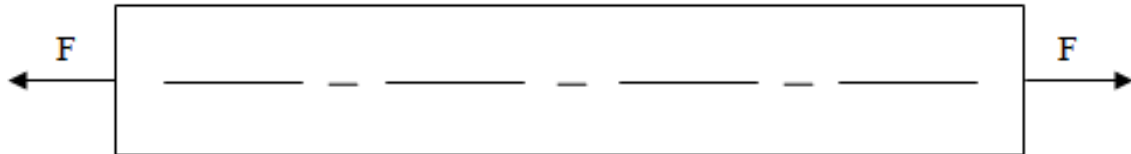


Figure 56: Essai de traction sur une éprouvette.

L'essai de traction est destiné surtout à l'examen de la tenue des matériaux soumis à l'action de contrainte de tractions axiales réparties uniformément sur toute la section de l'éprouvette. Les éprouvettes sont solidement maintenues entre les mors (dispositif de fixation) de la machine en suite elles sont soumises à l'action d'une charge (éloignement des mors l'un de l'autre) jusqu'à un allongement provoquant la rupture [9].

Les caractéristiques mécaniques qu'on peut déterminer lors de cet essai sont :

- Contrainte de limite élastique σ_e
- Contraint de résistance à la rupture σ_R
- Allongement A%
- Module d'élasticité E.

En générale, la contrainte normale est déterminée par :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [\text{N/mm}^2] \dots\dots\dots(3)$$

F : charge instantanée

S_0 : section initiale de l'éprouvette l'allongement s'écrit :

- L'allongement s'écrit Alors :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l-l_0}{l_0} 100 \% [\%] \dots\dots\dots(4)$$

L_0 : longueur initiale

L : longueur après allongement

- module de Young E.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots\dots\dots(5)$$

IV. 5. La machine d'essai :

La machine peut-être munie d'un enregistreur pouvant donner instantanément les valeurs de l'effort de traction et l'allongement correspondant ou encore la dépendance entre la contrainte de traction et l'allongement sous forme de diagramme force-allongement (diagramme d'essai de traction).

Les essais ont été effectués au niveau de l'URMA (Unité de Recherche en Matériaux Avancés) sur une machine de traction « MTS 43 criterion » de capacité 50 KN assistée par ordinateur et pilotée par le logiciel MTS test suite. Les caractéristiques principales sont :

- Cadre de charge électromécanique
- Famille : MTS criterion™
- Model : C43.504
- Capacité de force : 50 KN



Figure 57: Machine de traction

IV. 6. Déroulement des essais :

On se basant sur le traçage des éprouvettes décrit ci-dessus, on place une éprouvette sur la machine. La fixation au niveau des mors est manuelle, la distance entre ces derniers est fixée à 110 mm. Les essais sont monotones avec une vitesse de déplacement de traverse de 1 mm/min. Ces conditions ont permis d'avoir une évolution en rompe du déplacement.

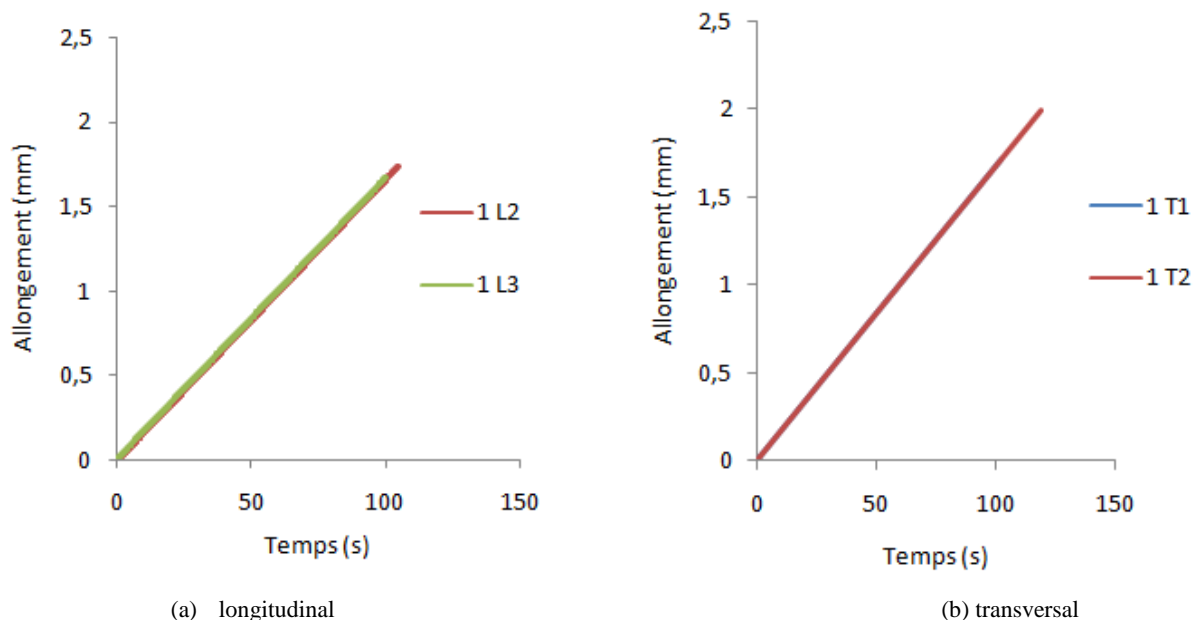


Figure 58: Courbes de traction des essais sur les éprouvettes des composites.

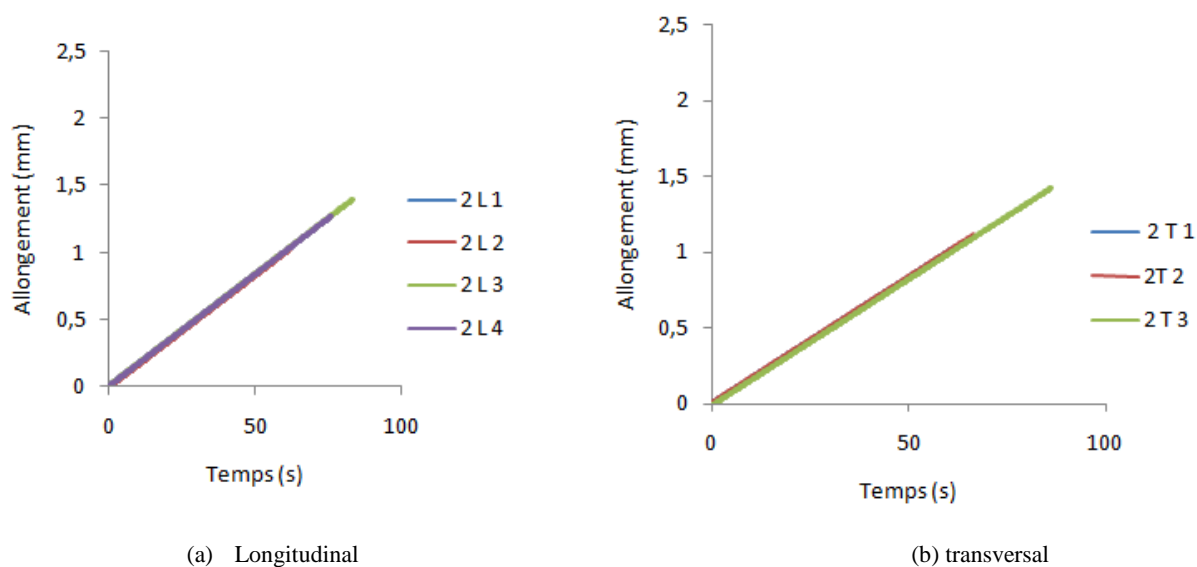


Figure 59: Courbes de traction des essais sur les éprouvettes des verres.

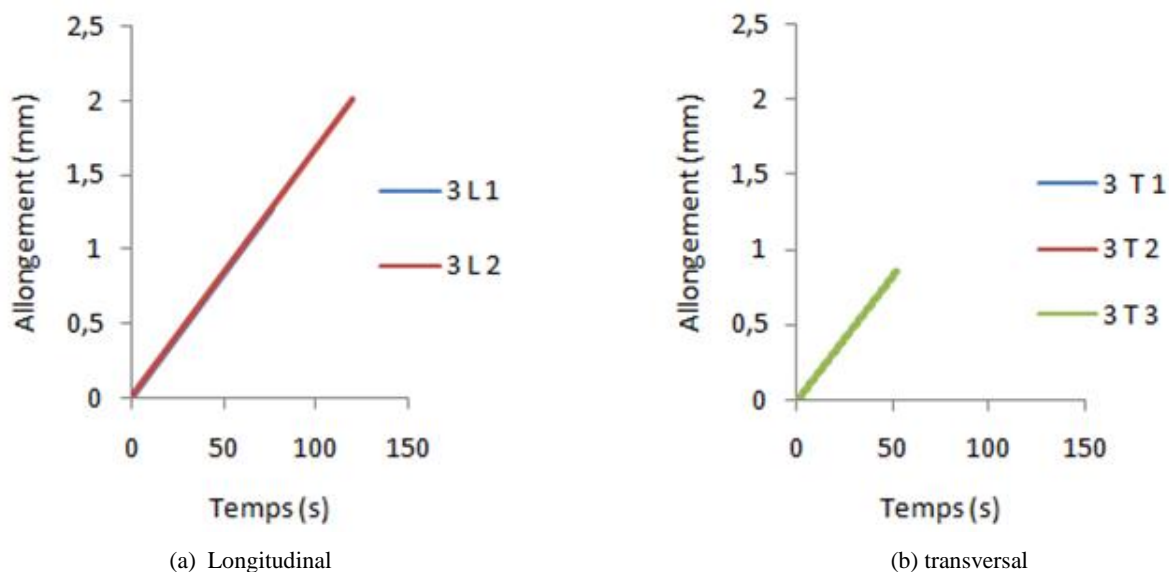


Figure 60: Courbes de traction des essais sur les éprouvettes des perlons.

IV. 7. Résultats des essais :

La finalité de l'étude du comportement mécanique des matériaux est en générale la connaissance de leur réponse suite à une sollicitation donnée. Cela est possible grâce à deux variables (les contraintes et les déformations). Sous l'effet des contraintes, un matériau va se déformer pour en suite se rompre. L'intensité de la contrainte engendre des déformations de différente nature (élastiques et plastiques). Les matériaux composites présentent différents types de comportement mécanique qui dépendent de la nature des constituants, du taux de fibre et de la structure du composite.

Les essais de tractions réalisés sur trois types d'éprouvettes (composites, verres et perlons) ont permis d'avoir divers résultats. Il est nécessaire d'effectuer des traitements pour pouvoir interpréter ces résultats. Dans un premier lieu, on effectue des représentations graphiques sous forme de courbes. Principalement nous avons :

- Effort-temps
- Effort-déplacement
- Contrainte-déformation

IV.7. 1. Comportement du composite :

L'évolution de l'effort en fonction des déplacements dans le cas des éprouvettes composites présente une tendance globale faiblement non linéaire. On observe une grande dispersion au niveau de l'effort de rupture, le déplacement jusqu'à la rupture et la rigidité. La rupture

correspond à un niveau de chargement qui vari entre 600 et 750 N (cas Longitudinal), 800 et 1500 N (cas transversal).

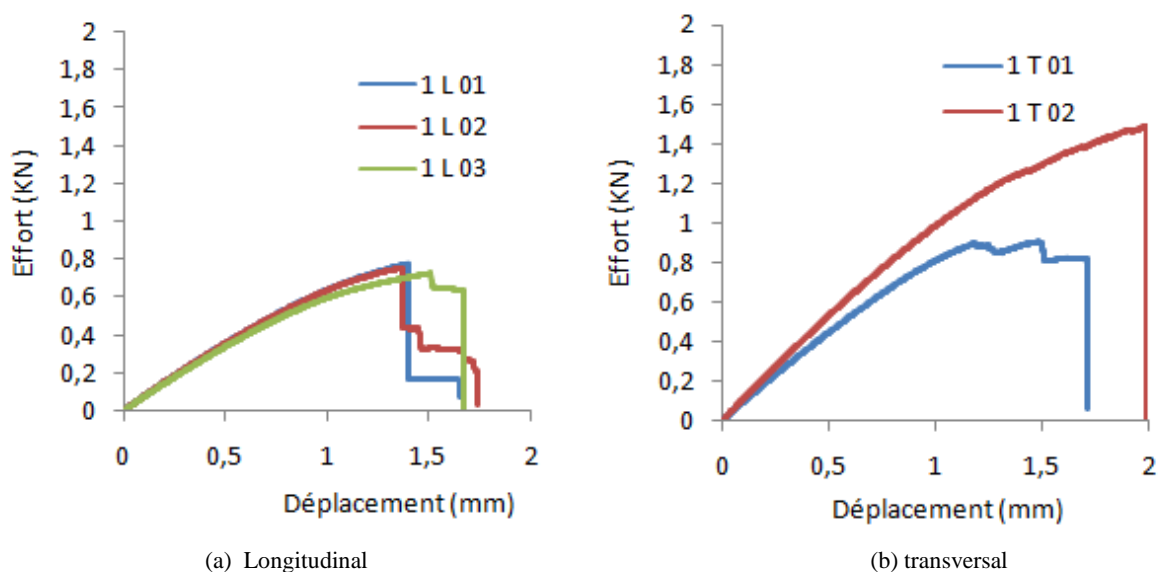


Figure 61: Courbes de traction des essais sur les éprouvettes composites (effort-déplacement)

IV.7. 2. Comportement du verre :

Dans le cas des éprouvettes en verre le comportement tend à être élastique fragile. On observe une très faible dispersion au niveau de la rigidité. La rupture correspond à un niveau de chargement qui vari entre 200 et 750 N (cas Longitudinal), 500 et 800 N (cas transversal).

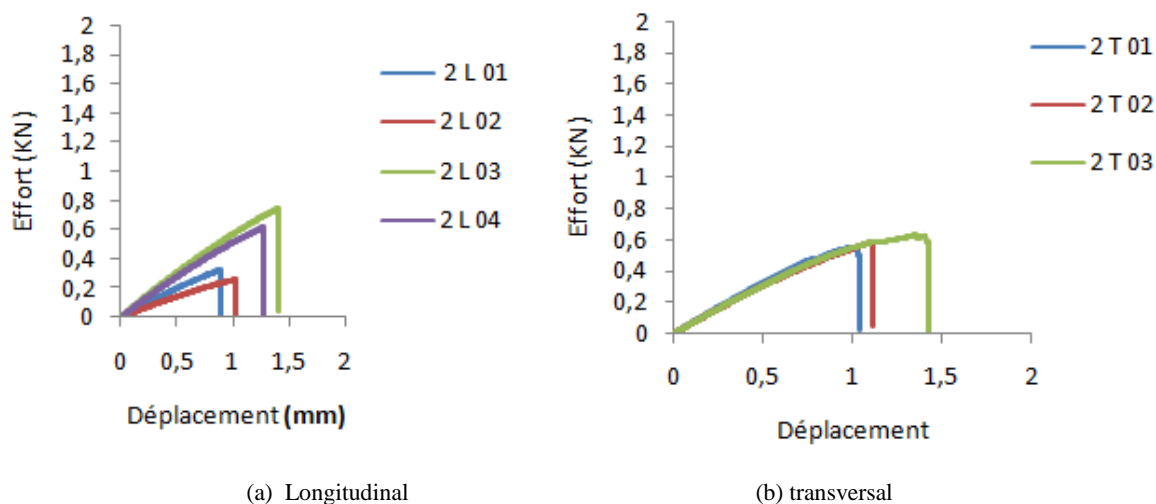


Figure 62: Courbes de traction des essais sur les éprouvettes verres (effort-déplacement)

IV.7. 3. Comportement du perlon :

Dans le cas des éprouvettes en perlon le comportement tend à être élastique fragile. On observe une très faible dispersion au niveau de la rigidité. La rupture correspond à un niveau de chargement qui vari entre 200 et 500 N (cas Longitudinal), 200 et 300 N (cas transversal).

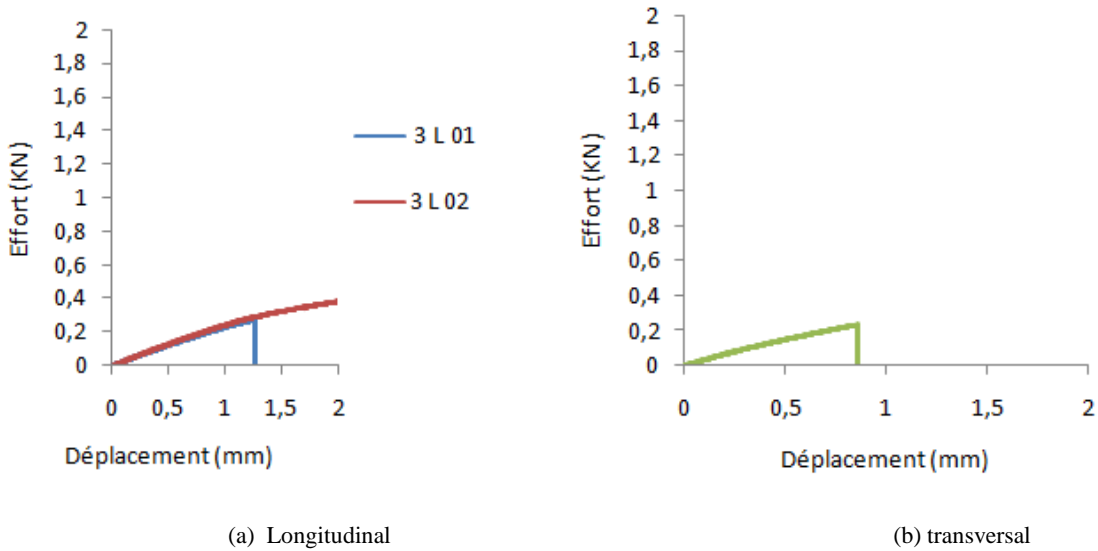


Figure 63: Courbes de traction des essais sur les éprouvettes perlons (effort-déplacement)

Afin de mettre en évidence les différences entre les éprouvettes composites, verre et perlon. On calcule la moyenne et l'écart types pour différents cas. Pour la moyenne arithmétique, le calcul se fait en fonction des données recueillies :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots(6)$$

L'écart type se calcul en fonction de la variance empirique (s²). La racine carrée de la variance est appelée écart type :

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \dots\dots\dots(7)$$

	Eprouvettes composite		Eprouvettes verre		Eprouvettes perlon	
	F _{rup} (KN)	D _{rup} (mm)	F _{rup} (KN)	D _{rup} (mm)	F _{rup} (KN)	D _{rup} (mm)
Moyenne	0.75	1.46	0.49	1.04	0.30	1.49
Ecart-type	0.03	0.16	0.23	0.21	0.08	0.05

Tableau 13 : La moyenne et l'écart type des efforts et déplacements (longitudinal).

	Eprouvettes composite		Eprouvettes verre		Eprouvettes perlon	
	F_{rup} (KN)	D_{rup} (mm)	F_{rup} (KN)	D_{rup} (mm)	F_{rup} (KN)	D_{rup} (mm)
Moyenne	1.19	1.98	0.59	1.084	0,30	1,12
Ecart-type	0.41	0.18	0.041	0.185	0,06	0,31

Tableau 14 : La moyenne et l'écart type des efforts et déplacements (transverse).

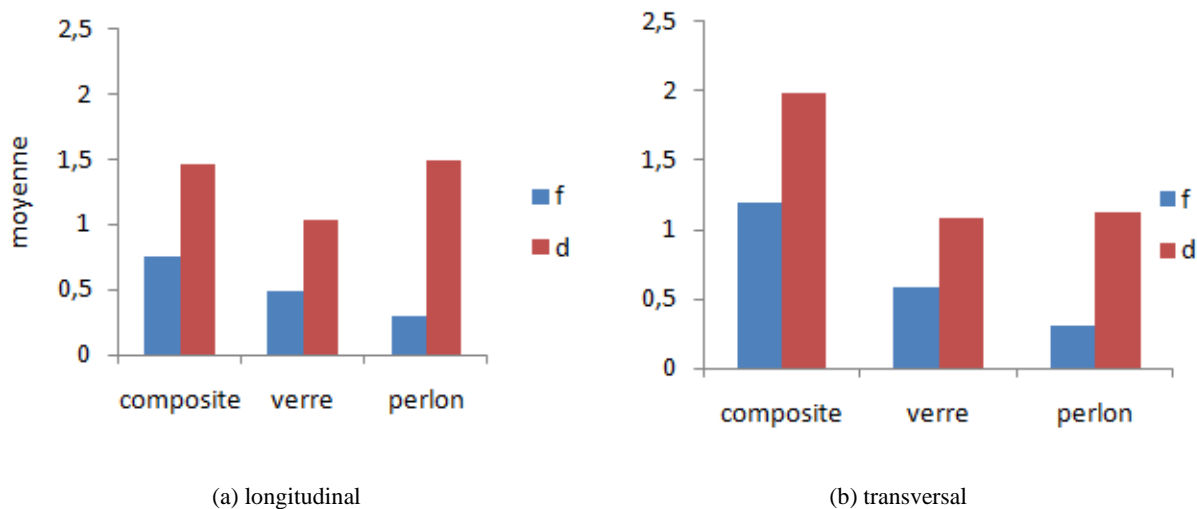


Figure 64: La moyenne des épreuves composites et verres et perlons

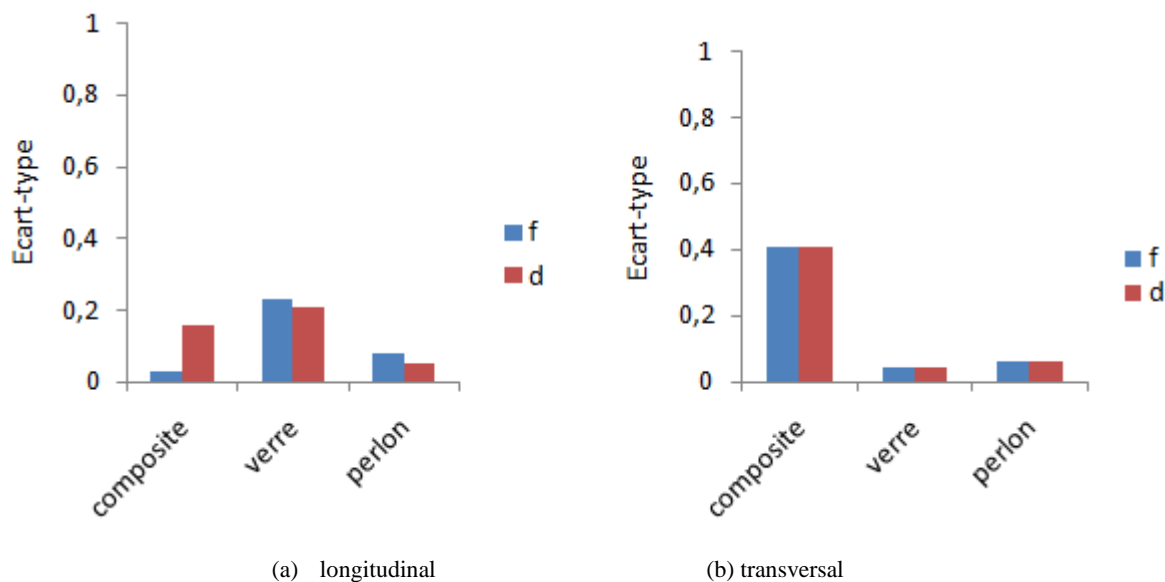


Figure 65: L'écart-type des épreuves de composite, verres et perlon

IV. 8. L'endommagement de rupture :

L'analyse de la morphologie de rupture se présente sous deux aspects : l'aspect macroscopique et l'aspect microscopique. A l'échelle des éprouvettes, la localisation de la rupture finale pour le perlon est en générale au niveau des mors, par contre, le composite et le verre, la rupture est en générale au centre.

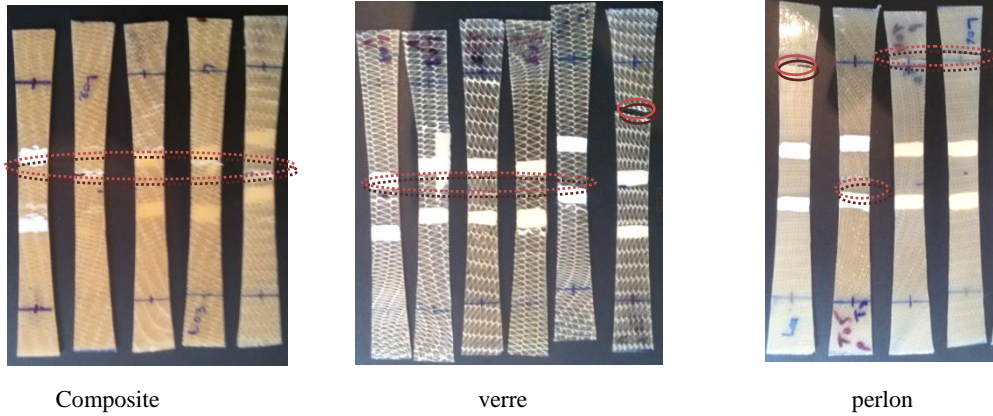


Figure 66: L'endommagement de rupture

V. 1. Introduction :

Il est fondamental pour le concepteur de prévoir et de connaître aussi précisément que possible les caractéristiques géométrique et mécanique d'un mélange « renfort + matrice » qui est la structure de base des pièces composites. La première partie de ce chapitre est consacré les caractéristiques du mélange renfort-matrice. En second lieu la modélisation du composite.

V. 2. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice :

a) La teneur en masse de renfort :

On appelle ainsi le rapport : $M_f = \text{masse de renfort} / \text{masse totale}$

En conséquence, la teneur en masse de matrice est telle que :

$$M_m = \text{masse de matrice} / \text{masse totale}$$

Ou encore :

$$M_m = 1 - M_f \dots\dots\dots(8)$$

b) La teneur en volume de renfort :

On appelle ainsi le rapport : $V_f = \text{volume de renfort} / \text{volume totale}$

En conséquence, la teneur en volume de matrice est telle que :

$$V_m = \text{volume de matrice} / \text{volume totale}$$

Ou encore :

$$V_m = 1 - V_f \dots\dots\dots(9)$$

Remarque

- On peut passer du taux volume, et réciproquement. Si ρ_f et ρ_m désignent les masses volumiques respectivement du renfort et de la matrice, on a :

$$V_f = \frac{M_f / \rho_f}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \dots\dots\dots(10)$$

Nous avons effectué des mesures du taux de renfort par pesée au moyen d'appareil de pesée (figure 67)



Figure 67 : pesage des échantillons.

Les échantillons considérés sont à base de perlon, verre et verre- perlon. Le tableau présent des mesures du taux de renfort :

	Echantillon 1		Echantillon 2	
	Mélange	Fibre	Mélange	Fibre
Verre	0.6325	0.0858	0.6249	0.1279
Perlon	0.8631	0.0818	1.0272	0.1033

Tableau 15 : mesures des masses.

M_f = masse de fibre / masse composite

Et V_f , V_p (équation 10), V_m (équation 9)

Calcul de la fraction volumique :

V_f	V_m
0.10	0.89

Tableau 16 : calcul de la fraction volumique

V. 3. Le pli unidirectionnel :

a) Modules élastiques :

Les caractéristiques mécaniques du mélange renfort/matrice peuvent être estimées à partir des caractéristiques de chacun des constituants. On trouve à ce sujet dans la littérature un certain nombre de relations obtenues par voie théorique ou semi-empirique, et dont les résultats ne concordent pas toujours avec les valeurs déduites d'essais. On l'on notera les faibles valeurs des modules d'élasticité longitudinaux dans le sens transverse aux fibres pour le verre apparaissant isotrope.

Avec les définitions et convention d'écriture du paragraphe précédent, on pourra retenir les expressions pour caractériser le pli unidirectionnel (renfort + matrice) :

➤ Module d'élasticité dans le sens des fibres E_l :

Il est bien approché par la relation :

$$E_l = E_m V_f + E_m V_m \dots\dots\dots (11)$$

Ou encore :

$$E_l = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \dots\dots\dots (12)$$

En pratique, ce module dépend essentiellement du module longitudinal de la fibre E_f car $E_m \ll E_f$ ($E_m / E_f \approx 6\%$)

➤ Module d'élasticité dans le sens travers des fibres E_t :

Dans la relation ci-dessous E_{lt} représente le module d'élasticité de la fibre dans le sens transverse aux fibres telles qu'il figure dans le tableau précédent.

$$E_t = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m V_f}{E_{lt}}} \right] \dots\dots\dots (13)$$

➤ Module de glissement G_{lt} :

Un ordre de grandeur de ce module difficile à approcher par le calcul est donné par l'expression suivante, dans laquelle G_{ft} représente le module de cisaillement de la fibre.

$$G_{lt} = G_m \left[\frac{1}{(1-V_f) + \frac{G_m \cdot V_f}{G_{flt}}} \right] \dots\dots\dots (14)$$

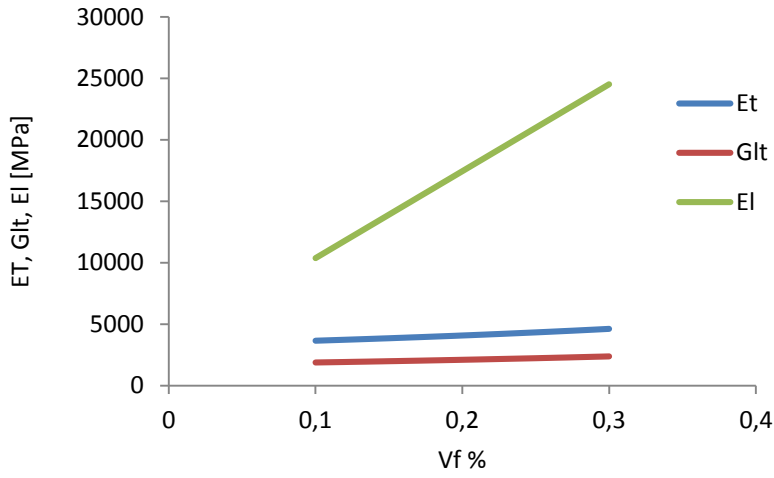


Figure 68 : module d'élasticité et module glissement en fonction du taux fibre.

➤ **Coefficient de poisson ν_{lt} :**

$$\nu_{lt} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \dots\dots\dots (15)$$

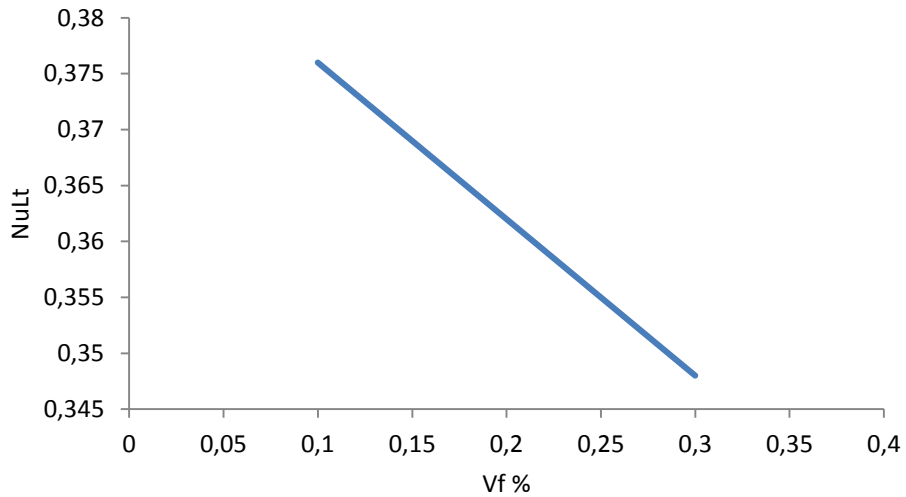


Figure 69: coefficient de poisson en fonction du taux de fibre.

V. 4. Equation d'Halpin-Tsai :

A partir des résultats obtenus dans les analyses théoriques ont des équations générales et simples de formulation. Les modules d'un matériau composite unidirectionnel sont exprimés :

Par la loi de mélanges pour le module E_L (équation 11).

Et par l'expression générale suivante pour autre modules :

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1+\xi \eta V_f}{1-\xi V_f} \dots\dots\dots (19)$$

Expression dans laquelle :

Le coefficient η s'exprime par :

$$\eta = \frac{(M_f/M_m) - 1}{M_f/M_m + \xi} \dots\dots\dots (20)$$

- M est le module considéré : E_T, G_L
- M_f le module correspondant des fibres : E_f, G_f
- M_m le module de la matrice : E_m, G_m

Le facteur ξ est une mesure du renforcement des fibres et dépend de la géométrie des fibres, de l'arrangement des fibres et type d'essai (donc du module considéré).

- $\xi = 2$ pour détermine le module E_T
- $\xi = 1$ pour détermine le module G_{LT}

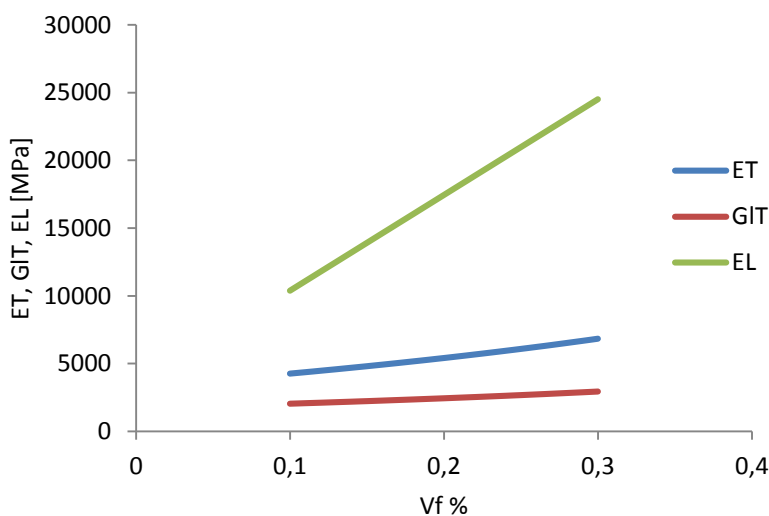


Figure 70: module d'élasticité et module glissement en fonction du taux fibre.

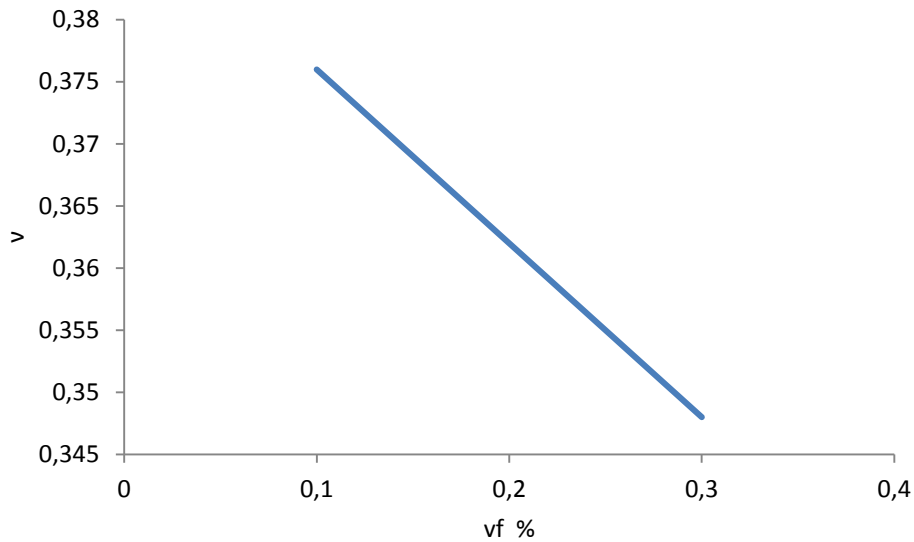


Figure 71: coefficient de poisson en fonction du taux fibre.

V. 5. Modèle analogue du composite :

Les résultats expérimentaux montrent que le composite présente un comportement isotrope selon les trois directions. A cet effet on se propose d’adopter un modèle de remplacement quasi-isotrope à quatre plis.

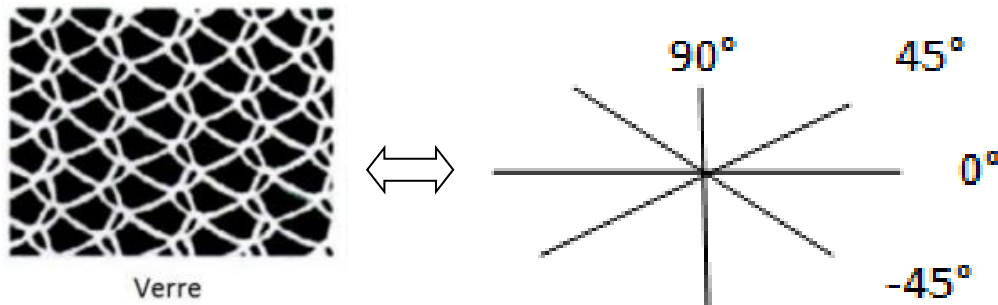


Figure 72: schématisation du modèle analogue

Le choix de ces orientations dépend en premier lieu de la structure des mailles sur laquelle on observe des directions préférentielles des fibres. Ainsi, on peut utiliser les équations de D. GAY [2] :

$$E = \frac{[2(E_l+E_t)+4\nu_{lt}E_l][(E_l+E_t)-2\nu_{lt}E_l+4G_{lt}]}{4[\frac{3}{2}(E_l+E_t)+\nu_{lt}E_l+2G_{lt}]} \dots\dots\dots (21)$$

$$\nu = \frac{\left[\frac{1}{2}(E_l + E_t) + 3\nu_{lt}E_l - 2G_{lt} \right]}{\left[\frac{3}{2}(E_l + E_t) + \nu_{lt}E_l + 2G_{lt} \right]} \dots\dots\dots(22)$$

$$G = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2}(E_l + E_t) - \nu_{lt}E_l + 2G_{lt} \right] \dots\dots\dots(23)$$

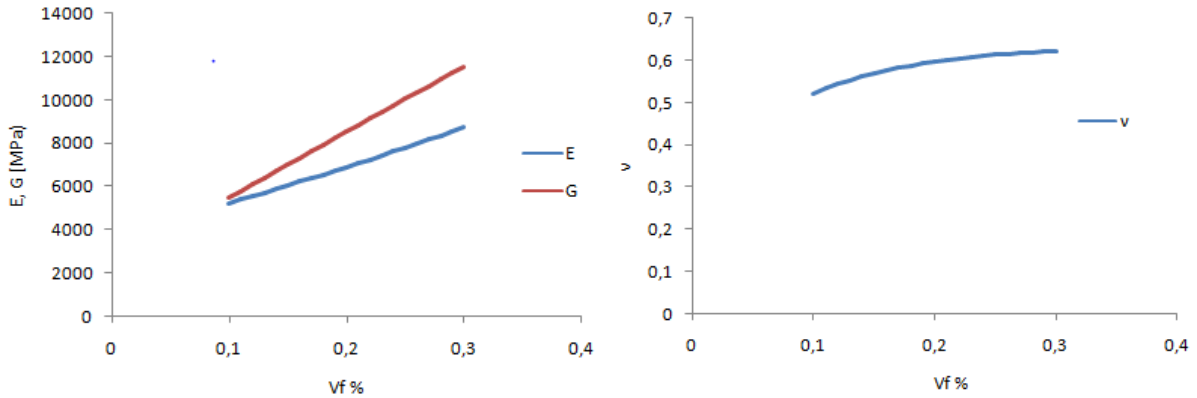


Figure 73: Courbes de la loi du mélange.

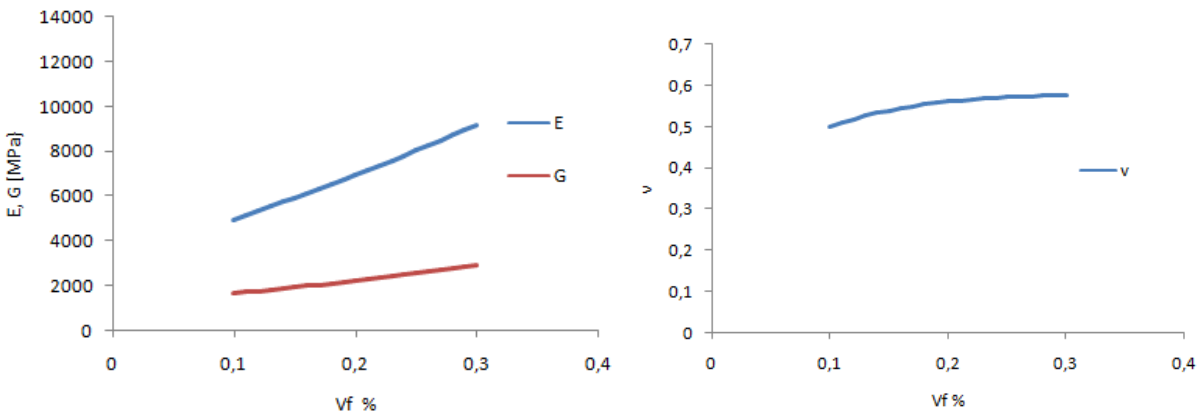


Figure 74: Courbes de la loi du d’Halpin-Tsai.

Dans le cas d’un taux de fibre Vf=10% on retrouve approximativement la valeur expérimentale du module de Young (tableau 06, chapitre 03) pour le composite.

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude qui vise le comportement des prothèses orthopédiques de l'ONAAPH, dans le but d'améliorer leur durée de vie. Notre contribution se résume à l'étude du comportement mécanique du matériau composite en fonction du pli de verre et de perlon.

La partie expérimentale, basée en premier lieu sur des essais de traction sur les éprouvettes composites et éprouvettes verres et perlons, montre un comportement élastique avec une faible non linéarité. Le pli de perlon présente une faible rigidité qui se traduit par la rupture au niveau des mors. Selon les différentes orientations, on observe un comportement similaire dans le cadre de la dispersion.

L'application de la loi des mélanges et le modèle HALPIN STAI combinés au modèle quasi-isotrope pour la détermination analytique des propriétés mécaniques montrent des résultats acceptables. Il serait possible de négliger l'apport du perlon en termes de rigidité et de résistance.

Références Bibliographiques

- [1] Jean-M Berthelot « Matériaux Composites », Comportement Mécanique et Analyse des structures 5^e édition 2012, Lavoisier, Paris ISBN : 978-2-7430-1450-6
- [2] Daniel Gay « Matériaux Composites » 4^e édition revue et augmentée, HERMES Paris, 1997 ISSN 1158-3509
- [3] A. DESSARTHE « conception de pièces mécanique en plastique et composite » 2^e édition 1996, CETIM Paris.
- [4] Techniques de l'ingénieur « les structures composites » d'impression : AM 5665
- [5] Documentations techniques (ONAAPH), 1993
- [6] Benamira. M, A. Mohamadi « contribution à la caractérisation du matériau composite de l'ONAAPH » mémoire de fin d'études, ingénieur d'état en construction mécanique, institut de mécanique université BADJI MOKHTAR-ANNABA, juin 1998.
- [7] M .BENAMIRA et AL « Etude des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite à renfort tricot par l'analyse ANOVA » Proceeding of the 4th international conference on maintenance and industrial safety CIMSI 2017, skikda
- [8] Benamira Mohamed « Caractérisation à la rupture du matériau composite utilisé par l'ONAAPH » mémoire de magister en mécanique de la rupture université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2002
- [9] S. BENZAADA / D. FELACHI « Essais Mécaniques » 2eme édition office des publications universitaires 01-2008 ISBN : 9961.0.0756.5