

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Mécanique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème PFE STARTUP

**Fabrication par matériaux composites d'un échantillon de la coque
d'une embarcation destinée aux petits métiers.**

Présenté par :

- 1) Mr BENMANSOUR Nabil
- 2) Mr SIDI IKHLEF Abdelkrim

Soutenu le --- Juin 2025 devant le jury composé de :

Mr. Hicham Salah	M C B	Université d'Ain Témouchent	Président
Mr. Mohammed Hachemi	M C B	Université d'Ain Témouchent	Examineur
Mr. Amine Beloufa	Pr	Université d'Ain Témouchent	Encadrant
Mr. Mohamed Amirat	Pr	Université de Tlemcen	Co-Encadrant
Mme. Wahiba Chaibi	M C A	Université d'Ain Témouchent	Co-Encadrante

Année universitaire : 2024/2025

DEDICACES

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie sincèrement mon directeur de mémoire, le Professeur Amine Beloufa, pour son encadrement exceptionnel, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce projet.

*A Mes très chers parents
et Mes frères*

ملخص:

كجزء من مشروعنا PFE STARTUP ، قمنا بتصنيع عينة من هيكل القارب باستخدام مواد مركبة (ألياف زجاجية من النوع E ، وراتنج بوليستر) قمنا بإجراء العديد من الاختبارات الميكانيكية لقياس نفاذية العينات وصلابتها ومعامل يونج. كما قمنا بإجراء قياسات للخواص الكيميائية لتحديد درجات حرارة انتقال الزجاج (T_g ، T_c ، T_f)

نود أن نظهر أن عينة هيكل القارب لدينا المصنوعة من المواد المركبة تتمتع بالخصائص الميكانيكية والكيميائية الموصى بها في قواعد السلامة البحرية وبناء القوارب والتي تطالب بها المواصفات المفروضة واللوائح السارية

Résumé :

Dans le cadre de notre projet PFE STARTUP nous avons fabriqué un échantillon de coque de bateau en utilisant les matériaux composites (la fibre de verre E type Mat, la résine de polyester), nous avons effectué plusieurs tests mécaniques pour mesurer la perméabilité, la dureté et le module de Young de nos éprouvettes. Egalement, nous avons procédé aux mesures des propriétés chimiques pour déterminer les températures de transition vitreuse (T_g , T_c , T_f).

On voudrait montrer que notre échantillon de coque de bateau fabriqué par les matériaux composites possède les propriétés mécaniques et chimiques préconisés dans les règles de la sécurité maritime et de construction des bateaux qui sont revendiquées par le cahier de charge imposé et la réglementation en vigueur.

Abstract:

As part of our PFE STARTUP project, we manufactured a boat hull sample using composite materials (E-type Mat fiberglass and polyester resin). We performed several mechanical tests to measure the permeability, hardness, and Young's modulus of our specimens. We also measured the chemical properties to determine the glass transition temperatures (T_g , T_c , T_f).

We aimed to demonstrate that our boat hull sample made from composite materials possesses the mechanical and chemical properties recommended in the maritime safety and boat construction specifications and standard regulations.

Sommaire

DEDICACES.....	2
Introduction générale	11
Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites.....	12
1. Définition:.....	13
2. Propriétés générales des matériaux composites :	13
2.1 Propriétés thermiques :	14
2.2 Propriétés chimiques et environnementales :	14
2.3 Propriétés physiques et électriques :	14
2.4 Propriétés mécaniques des matériaux composites :	15
3. Classification des matériaux composites :	17
3.1 Classification selon la nature de la matrice :	17
3.1.1 Composites à matrice polymère (CMP) :	17
3.1.2 Composites à matrice métallique (CMM) :	17
3.1.3 Composites à Matrice Céramique (CMC) :	18
3.2 Classification selon la nature du renfort :	18
3.2.1 Composites à particules :	18
3.2.2 Composites à fibres courtes (discontinues) :	18
3.2.3 Composites à fibres longues (continues) :	18
3.2.4 Composites tissés (2D ou 3D ou stratifié ou Sandwich) :	19
4. Constituants des matériaux composites :	21
4.1 La Matrice.....	22
4.2 Le Renfort.....	24
4.3 Charges et renforts particuliers :	28
5. Les applications des matériaux composites :	28
6. Calcul théorique des propriétés mécanique des matériaux composites :	29

6.1	Module de Young longitudinal (E_L) du composite :.....	30
6.2	Module de Young transversal (E_T) du composite :.....	30
6.3	Calcul des contraintes et déformations dans les matériaux composites :[9]	31
6.4	Calcul théorique de E pour un tissu de type Tafetta :.....	31
6.5	Calcul théorique de E pour Mat de fibres discontinues orientées aléatoirement :.....	36
Chapitre2 : Technique d'élaboration des matériaux composites		38
1.	Obtention des renforts fibreux dans les composites :.....	39
1.1	Processus de fabrication des renforts fibreux :.....	39
1.2	Traitement et caractéristiques des renforts fibreux :.....	42
1.3	Avantages et inconvénients des renforts fibreux :	42
1.4	Perspectives et innovations dans l'obtention des renforts fibreux :.....	42
2.	Obtention des matrices dans les composites :	43
3.	Technique d'élaboration des matériaux composites :.....	44
3.1	Processus de moulage :.....	44
3.2	Procédés de formage:	54
Chapitre 3 : Elaboration de notre matériau composite et de la résine et du fibre de verre		59
1.	Introduction :.....	60
2.	Propriétés de la fibre de verre de type E :	60
3.	Propriétés de la résine Polyester :	62
4.	Matériaux et produits utilisés :	64
5.	Les étapes d'élaboration de notre matériau composite :.....	65
6.	Technique d'élaboration de la résine Polyester PET	73
6.1	Propriétés physico-chimiques :.....	73
6.2	Autres propriétés :	73
6.3	Méthodes utilisées pour caractériser le PET	73
6.4	Synthèse du Polyethylene terephthalate (PET) :	74

6.4.1	Matériel et réactifs pour la 1 ^{ère} méthode de la synthèse de PET:.....	74
6.4.2	Matériel et réactifs pour la 2 ^{ème} méthode de la synthèse de PET:	75
Chapitre 4 : Tests mécaniques de la résistance de nos échantillons composites et mesures chimiques (Analyse et Résultats).....		76
1.	Mesure et calcul théorique de la masse volumique de notre matériau composite	77
2.	Essai de la perméabilité.....	79
3.	Essai de dureté	79
4.	Essai de traction	81
5.	Rigidité en flexion.....	88
6.	Mesure des températures de la transition vitreuse TTV	90
Conclusion Générale		94
Bibliographie		95

Liste des Figures

Figure 1- 1 : Matériau composite.....	15
Figure 1- 2 : Classification des matériaux composites	17
Figure 1- 3 : Les différents types des composites renforcés par des fibres.....	19
Figure 1- 4 : Structure 3D [6]	19
Figure 1- 5 : Composite stratifié.....	20
Figure 1- 6 : Représentation d'un pli unidirectionnel	20
Figure 1- 7 : Structure sandwich	21
Figure 1- 8 : Composition d'un matériau composite.....	21
Figure 1- 9 : Organigramme des différentes familles de matrice.....	22
Figure 1- 10 : Organigramme des différentes familles de renfort	24
Figure 1- 11 : Les différents types de fibres de verre.....	25
Figure 1- 12 : (a) Fibres de Graphite, (b) fibre de Carbone	25
Figure 1- 13 : Les fibres d'aramides (Kevlar)	26
Figure 1- 14 : Les formes de tissus tissés	31
Figure 1- 15 : Notation pour une couche de tissu.....	32
Figure 1- 16 : Coupe transversale d'une couche avec.....	32
Figure 1- 17 : Module hors axe.....	35
Figure 1- 18 : Fibres discontinues et orientées aléatoirement.....	36
Figure 2- 1 : Procédé d'obtention des fibres de verre par étirage.....	39
Figure 2- 2 : Principe d'élaboration des fibres en carbone	40
Figure 2- 3 : a) Fabrication des fibres de bore (à gauche) et des fibres de SiC (à droite),	41
Figure 2- 4 : Moulage par contact. [9].....	45
Figure 2- 5 : Moulage par compression.[10]	46
Figure 2- 6 : Moulage sous vide [10]	47
Figure 2- 7 : Faisceau d'électrons ou moulage par rayons X [8].....	47
Figure 2- 8 : Moulage par injection de résine. [10]	48
Figure 2- 9 : Injection de prémélange. [10].....	49
Figure 2- 10 : Injection de mousse [14]	50
Figure 2- 11 : Principe du moulage par pultrusion [3].	51
Figure 2- 12 : Enroulement du filament. [14].....	52
Figure 2- 13 : Enroulement filamentaire sur mandrin complexe. [14].....	53
Figure 2- 14 : Formage de feuilles. [14].....	54
Figure 2- 15 : Formation de profil.[14]	55
Figure 2- 16 : Formation de tampon. [8]	55
Figure 2- 17 : Processus de drapage. [8]	57

Figure 3- 1 : Mat de verre E (450g/m ²)	62
Figure 3- 2 : Résine PRE-63 TAB	62
Figure 3- 3 : Produits et Matériaux pour fabriquer notre composite	64
Figure 3- 4 : Les dimensions du moule.....	65
Figure 3- 5 : Découpage de la fibre de verre.....	65
Figure 3- 6 : La masse de la fibre de verre	66
Figure 3- 7 : L'ajout du durcisseur.....	68
Figure 3- 8 : Mélange de la résine avec le durcisseur	68
Figure 3- 9 : Pose des plis.....	69
Figure 3- 10 : Le matériau composite final de 04 plis	69
Figure 3- 11 : La pression pour éliminer l'air.....	70
Figure 3- 12 : Le démoulage du matériau composite	70
Figure 3- 13 : Le découpage des bords.....	71
Figure 3- 14 : Le découpage des éprouvettes	72
Figure 3- 15 : Méthode 1 de la Synthèse de PET.....	74
Figure 3- 16 : Méthode 2 de la Synthèse de PET.....	75
Figure 4- 1 : Mesure de l'épaisseur de la plaque en composite par micromètre et ses dimensions	78
Figure 4- 2 : Test de perméabilité sur notre plaque en composite.....	79
Figure 4- 3 : Mesure de la dureté de notre plaque composite par un appareil de mesure à rebond	79
Figure 4- 4 : Duretés de notre composite	80
Figure 4- 5 : Machine de traction CONTROLAB modèle H0003	83
Figure 4- 6 : Eprouvette de traction normalisée	84
Figure 4- 7 : Eprouvettes rompues après test de traction	84
Figure 4- 8 : Courbes de traction pour chaque éprouvette testée	85
Figure 4- 9 : Courbes de traction pour toutes les 5 éprouvettes testées	86
Figure 4- 9 : Défaut de moulage rencontré au niveau de l'échantillon de traction.....	87
Figure 4- 11 : DSC du polymère PET (Polyéthylène Téréphtalate) pur (sans additifs)	90
Figure 4- 12 : DSC du polymère (PET (Polyéthylène Téréphtalate) + additifs).....	91
Figure 4- 13 : DSC du polymère PET mélangé avec les fibres en verre	91

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 : Les propriétés de la matrice résine	23
Tableau 1-2 : Les propriétés des renforts.....	27
Tableau 1-3 : Propriétés des composites tissu/époxy équilibrés.....	33
Tableau 1-4 : Module d'élasticité des fibres	34
Tableau 1-5 : Les valeurs du facteur k en fonction de la direction des fibres.....	36
Tableau 3- 1 : Composition chimique du verre E utilisé comme renfort	60
Tableau 3- 2 : Les propriété mécanique de la fibre E.....	61
Tableau 3- 3 : Caractéristiques du Mat (Fibre de verre)	61
Tableau 3- 4 : Les propriétés chimiques de la résine	63
Tableau 3- 5 : Les propriétés mécaniques de la résine	63
Tableau 3- 6 : La masse de la fibre de verre.....	66
Tableau 3- 7 : Les dimensions de la plaque.....	71
Tableau 4- 1 : Module de Young (valeur moyenne mesurée expérimentalement).....	86
Tableau 4- 2 : Limite à la rupture maximale et déformation maximale à la rupture de nos éprouvettes	87

Introduction Générale

Introduction générale

L'application des matériaux composites ne cesse à apparaître dans les différents filiales de la fabrication mécanique y compris la construction des bateaux (coque) tout en écartant les méthode classique, cette technologie moderne a aidé les constructeurs mécaniques de prendre les défis en améliorant les propriétés mécanique, chimique, physique de leurs produits ce qui nous a incité à les découvrir par notre projet en suivant un plans de travail constitué de quatre chapitres :

- Le premier chapitre représente une introduction générale aux matériaux composites,
- Le deuxième chapitre définit les méthodes d'élaboration des matériaux composites,
- Le troisième chapitre est consacré à la fabrication de notre échantillon de coque de bateau destiné aux petits pêcheurs,
- Le dernier chapitre reflète les résultats finaux de nos essais expérimentaux.

Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

1. Définition:

Les **matériaux composites** sont des matériaux constitués de deux ou plusieurs substances distinctes, qui sont combinées de manière à ce que chaque composant conserve ses propriétés propres tout en conférant au matériau final des caractéristiques supérieures à celles des matériaux individuels. En d'autres termes, un matériau composite est une association de deux phases : une phase continue appelée **matrice** et une phase dispersée ou renforçante appelée **renfort**.

-La matrice : Elle constitue la phase principale, généralement continue, et sert de liaison entre les autres composants. Elle peut être d'origine polymère (plastique), métallique, céramique, etc.

-Le renfort : C'est la phase dispersée dans la matrice, souvent sous forme de fibres, de particules ou de nappes. Le renfort sert à améliorer les propriétés mécaniques du matériau composite, telles que la résistance et la rigidité.

En résumé, un matériau composite est conçu pour combiner les avantages des matériaux de base (comme une résistance élevée, une légèreté, ou une résistance à la corrosion), tout en permettant une plus grande flexibilité de conception et de performance que les matériaux classiques pris individuellement.

2. Propriétés générales des matériaux composites :

Les matériaux composites sont des matériaux constitués de deux ou plusieurs phases distinctes ayant des propriétés complémentaires, généralement une matrice et un renfort. Leurs propriétés mécaniques, thermiques et chimiques dépendent de la nature des constituants et de leur interaction.

2.1 Propriétés thermiques :

- **Faible dilatation thermique** : anisotropie thermique due à l'orientation des fibres.
- **Bonne résistance aux hautes températures** : certains composites céramiques résistent à plus de 2000 °C.
- **Conductivité thermique variable** : dépend du type de matrice (polymère, métal, céramique).[2].

2.2 Propriétés chimiques et environnementales :

- **Bonne résistance à la corrosion** : contrairement aux métaux, les composites polymères ne rouillent pas.
- **Stabilité chimique** : insensibilité à de nombreux produits chimiques agressifs.
- **Sensibilité aux UV et à l'humidité** : certains composites nécessitent des revêtements protecteurs.[3]

2.3 Propriétés physiques et électriques :

- **Propriétés isolantes** : de nombreux composites polymères sont de bons isolants électriques.
- **Possibilité de conductivité contrôlée** : introduction de fibres de carbone ou d'additifs pour ajuster la conductivité.[4]

2.4 Propriétés mécaniques des matériaux composites :

Les matériaux composites possèdent des propriétés mécaniques remarquables qui les rendent largement utilisés dans des domaines exigeant des performances élevées, tels que l'aéronautique, l'automobile, et le génie civil. Ces propriétés dépendent de la nature de la matrice, du type de renfort et de la configuration des fibres.

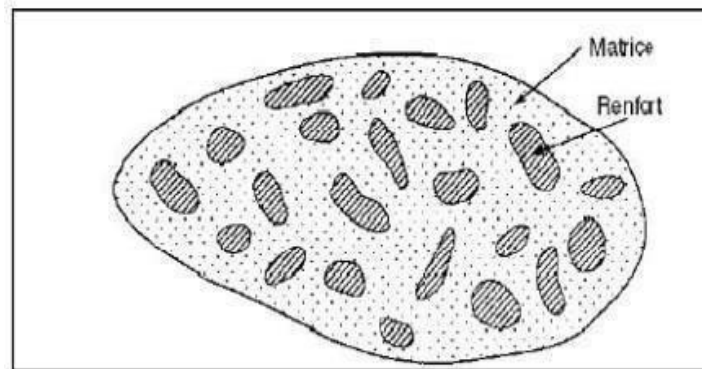


Figure 1- 1 : Matériau composite

Résistance Mécanique :

La résistance mécanique des composites dépend de l'orientation des fibres, du type de matrice et du procédé de fabrication.

- **Haute résistance spécifique** : les composites présentent un rapport résistance/poids supérieur à celui des métaux.
- **Résistance en traction élevée** : particulièrement pour les composites à fibres longues (ex. : carbone, verre, aramide).
- **Résistance en compression variable** : souvent inférieure à la résistance en traction, nécessitant des conceptions optimisées.[3]

Module d'Élasticité et Rigidité :

Le module d'élasticité des composites est influencé par la fraction volumique des fibres et leur orientation.

- **Matériaux anisotropes** : les propriétés mécaniques varient selon la direction des fibres.
- **Rigidité ajustable** : une combinaison de fibres peut permettre d'optimiser la rigidité dans certaines directions.[2]

Ténacité et Résistance aux Chocs :

Les composites possèdent une bonne absorption d'énergie, ce qui les rend efficaces contre les chocs et les fissures.

- **Capacité d'amortissement** : meilleure que celle des métaux, utile dans l'aéronautique et les équipements sportifs.
- **Propagation des fissures contrôlée** : la matrice et les fibres empêchent une fracture instantanée.[1]

Fatigue et Durabilité :

Les composites ont une bonne tenue à la fatigue mais peuvent être sensibles aux délaminages.

- **Bon comportement sous charges cycliques** : surtout avec des renforts continus bien orientés.
- **Risque de délaminage** : nécessité d'une bonne adhésion matrice-fibre pour éviter ce problème.[4]

Fluage et Comportement à Long Terme :

- Fluage faible pour les composites à matrice métallique ou céramique.
- Sensibilité pour les matrices polymères à long terme, en particulier sous charge constante et en température élevée.[5]

3. Classification des matériaux composites :

Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes constitués d'une matrice et d'un renfort, offrant des propriétés mécaniques et physiques améliorées par rapport aux matériaux traditionnels. Leur classification repose sur plusieurs critères, notamment la nature de la matrice et du renfort.

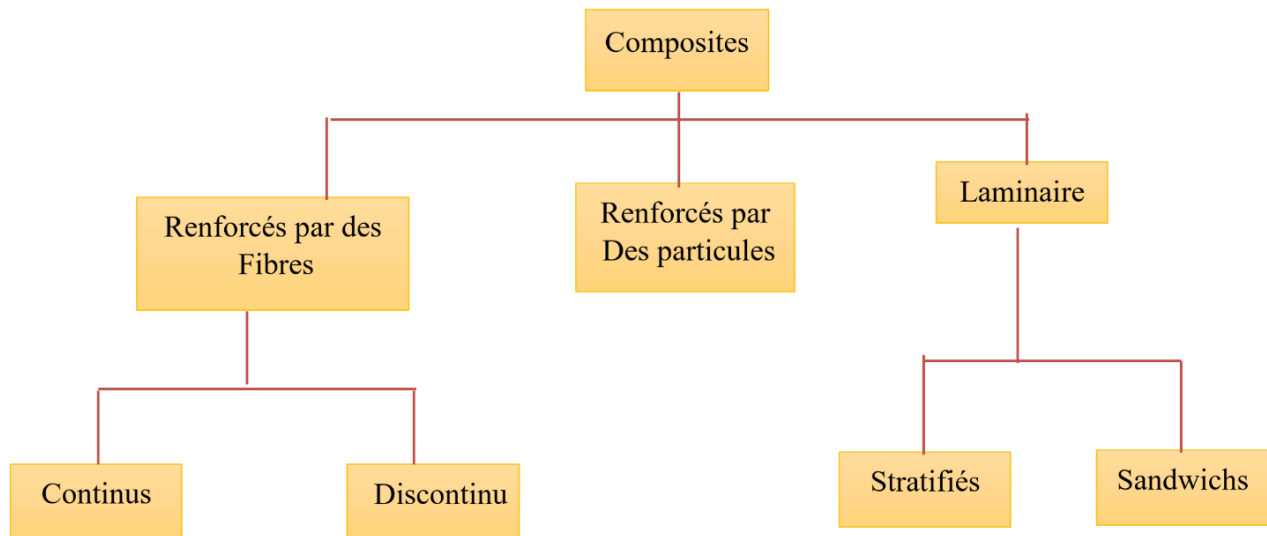


Figure 1- 2 : Classification des matériaux composites

3.1 Classification selon la nature de la matrice :

3.1.1 Composites à matrice polymère (CMP) :

- Constitués d'une matrice polymère (thermodurcissable ou thermoplastique).
- Légers, résistants à la corrosion, faciles à mettre en œuvre.
- Utilisés dans l'aéronautique, l'automobile et les équipements sportifs.[3]

3.1.2 Composites à matrice métallique (CMM) :

- Constitués d'une matrice métallique (aluminium, titane, magnésium).

- Offrent une bonne résistance mécanique et thermique.
- Utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale.[6]

3.1.3 Composites à Matrice Céramique (CMC) :

- Constitués d'une matrice céramique (SiC, Al₂O₃).
- Excellente résistance aux hautes températures et à l'usure.
- Applications dans l'aérospatiale, les turbines et les freins de véhicules hautes performances.[7]

3.2 Classification selon la nature du renfort :

3.2.1 Composites à particules :

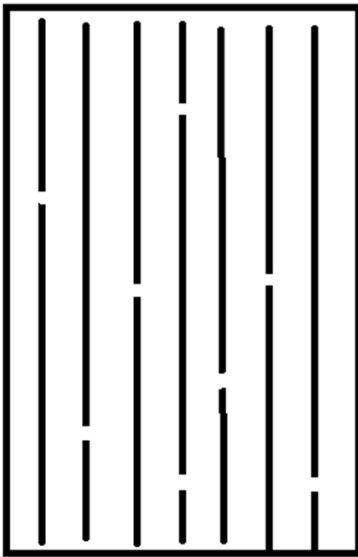
- Renfort sous forme de particules (métalliques, céramiques).
- Utilisés pour améliorer la dureté et la résistance à l'usure.
- Exemples : composites en carbure de tungstène dans les outils de coupe.[1]

3.2.2 Composites à fibres courtes (discontinues) :

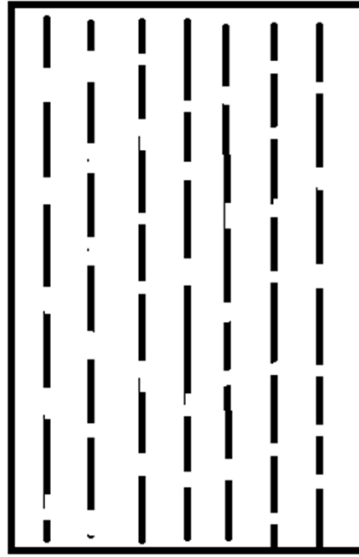
- Fibres courtes dispersées dans la matrice.
- Faciles à fabriquer mais moins performants mécaniquement.
- Utilisés dans l'industrie automobile et électronique.[2]

3.2.3 Composites à fibres longues (continues) :

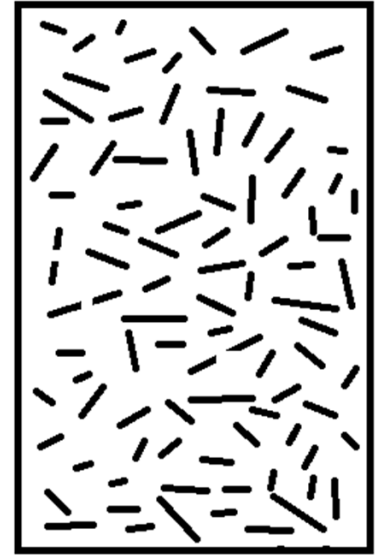
- Fibres continues alignées dans une direction spécifique.
- Très bonnes propriétés mécaniques et anisotropie élevée.
- Applications en aéronautique et structures légères.[4]



Fibres continues et alignées



Fibres discontinues et alignées



Fibres discontinues et orientées aléatoirement

Figure 1- 3 : Les différents types des composites renforcés par des fibres.

3.2.4 Composites tissés (2D ou 3D ou stratifié ou Sandwich) :

Structure 2D et 3D :

- Structures multicouches ou tissées pour une meilleure résistance.
- Utilisés pour les coques de bateaux, panneaux d'avions et prothèses médicales.[8]

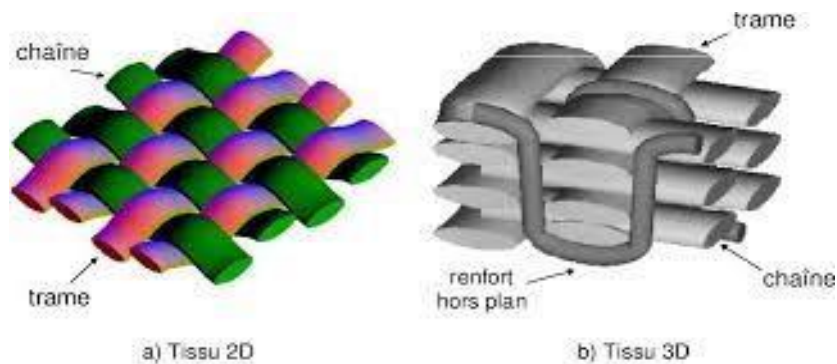


Figure 1- 4 : Structure 3D [6]

Les stratifiés :

Un stratifié est un composite constitué d'un empilement de feuilles (panneaux) dont les propriétés varient selon la direction. Les différentes couches d'un stratifié sont superposées et collées de façon telle que la direction de leurs plus grande résistance varie d'une couche à l'autre comme le montre la figure(1-5 et 1-6).

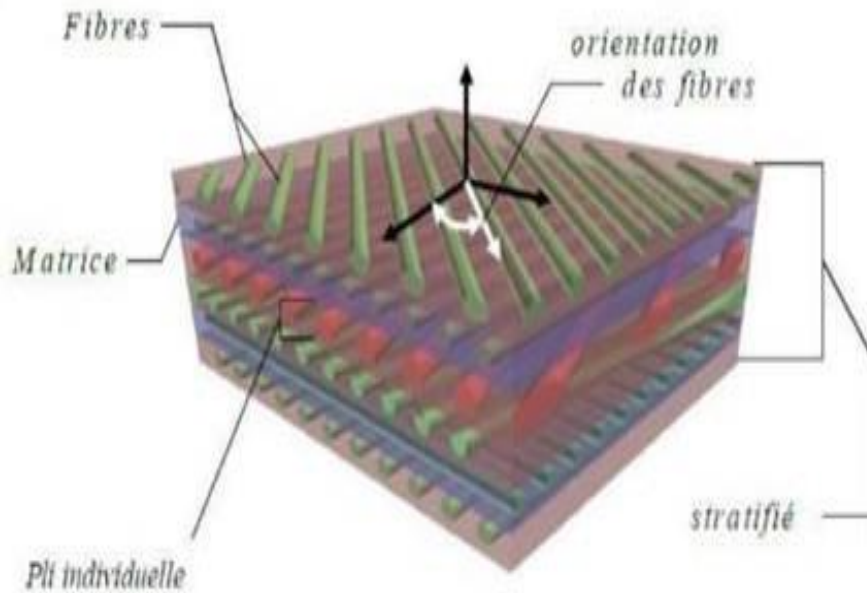


Figure 1- 5 : Composite stratifié

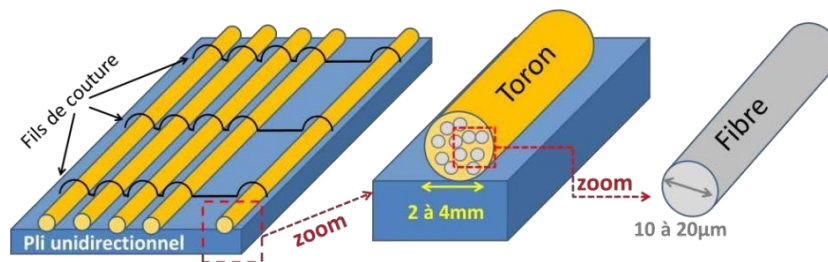


Figure 1- 6 : Représentation d'un pli unidirectionnel

Les panneaux sandwich :

Ces composites sont constitués de deux couches d'un matériau très résistant entre lesquelles on a intercalé un coeur fait d'une matière moins dense, moins résistante et moins rigide (figure 1-7).

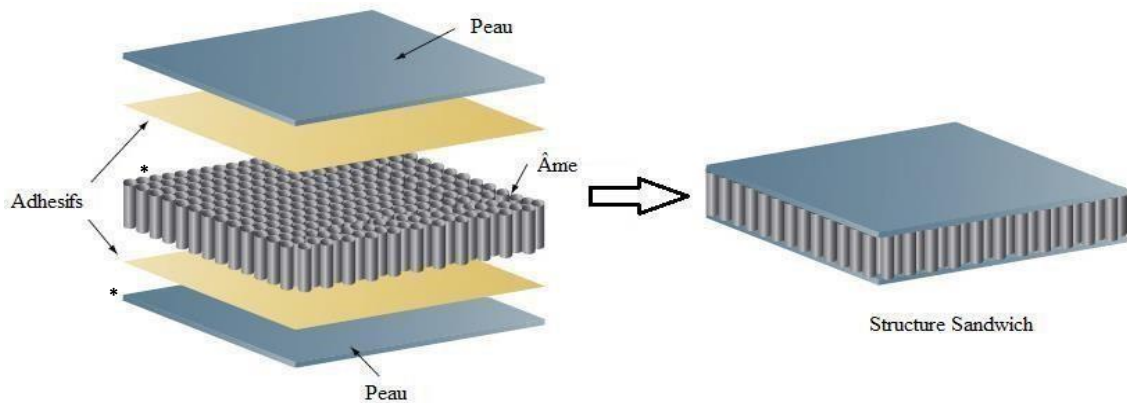


Figure 1- 7 : Structure sandwich

4. Constituants des matériaux composites :

Les matériaux composites sont constitués de plusieurs éléments qui leur confèrent leurs propriétés exceptionnelles. Les principaux constituants sont la **matrice**, le **renfort**, et parfois des **additifs** qui améliorent certaines caractéristiques spécifiques.

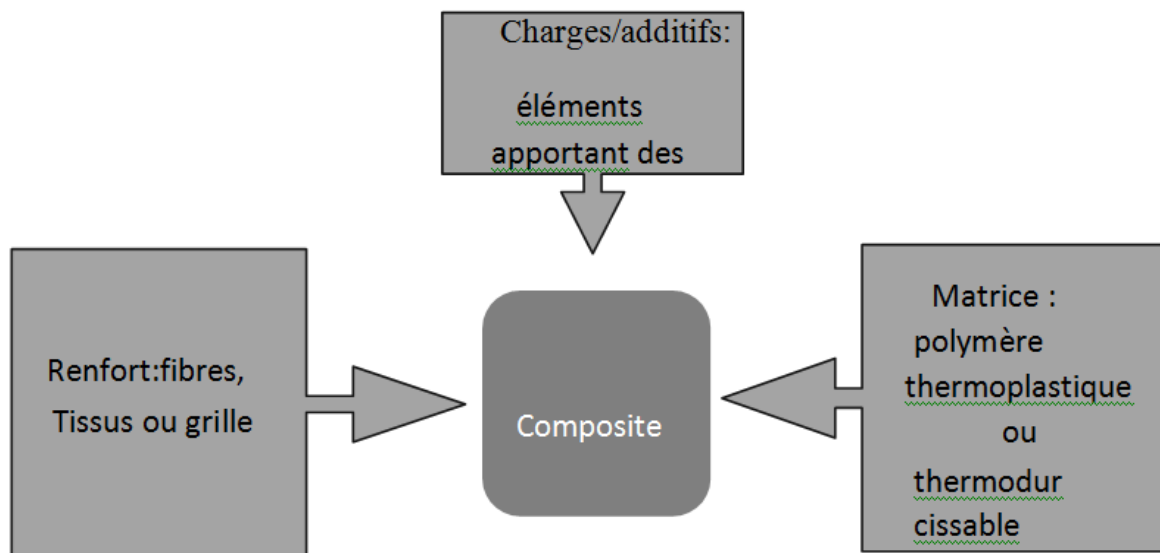


Figure 1- 8 : Composition d'un matériau composite

4.1 La Matrice

La matrice est la phase continue du composite. Son rôle est d'enrober les renforts, de transférer les charges mécaniques et de protéger les fibres contre les agressions extérieures.

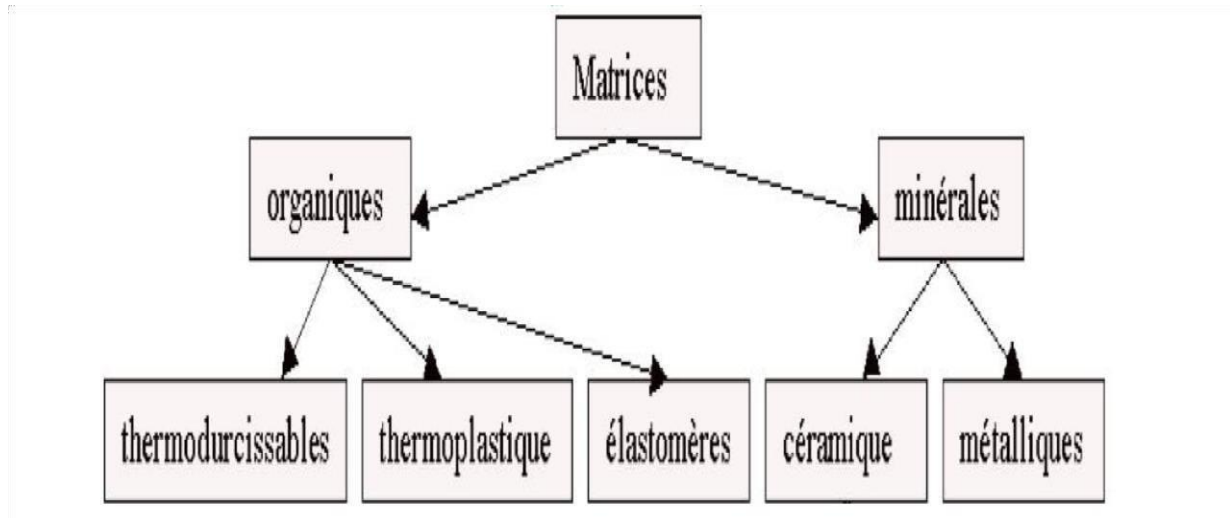


Figure 1- 9 : Organigramme des différentes familles de matrice

Matrice Polymère :

- Peut être **thermodurcissable** (ex. : époxy, polyester, phénolique) ou **thermoplastique** (ex. : polyéthéréthercétone – PEEK).
- Légère, résistante à la corrosion et facile à mettre en œuvre.
- Utilisée dans l'aéronautique, l'automobile et le sport.^[3]

Le tableau ci-dessous montre les propriétés mécaniques des résine polymère thermoplastique ou thermodurcissable.

<i>Resine Polymère</i>	<i>Densité ρ(kg/m³)</i>	<i>Module de elasticité E(MPa)</i>	<i>Module de cisaillement G(MPa)</i>	<i>Coefficient de poisson ν</i>	<i>Résistance a la traction Erupture(MPa)</i>	<i>allongement, A(%)</i>	<i>Coefficient de dilatation thermique α(°C⁻¹)</i>	<i>Coefficient de conductivité thermique ϕ(W/m °C)</i>	<i>Capacité thermique c(J/kg °C)</i>	<i>Température limite, T_{max}(°C)</i>	<i>Prix (\$/kg)</i>
Thermodurcissable											
Epoxy	1200	4,500	1600	0.4	130	2(100 °C); 6(200 °C)	11×10 ⁻⁵	0.2	1000	90-200	6-20
Phenolic	1300	3,000	1100	0.4	70	2.5	1×10 ⁻⁵	0.3	1000	120-200	
Polyester	1200	4,000	1400	0.4	80	2.5	8×10 ⁻⁵	0.2	1400	60-200	2.4
Polycarbonate	1200	2,400		0.35	60		6×10 ⁻⁵		1200	120	
Vinylester	1150	3,300			75	4	5×10 ⁻⁵			>100	4
Silicone	1100	2,200		0.5	35					100-350	40
Urethane	1100	700-7,000			30	100				100	4
Polyimide	1400	4,000-19,000	1100	0.35	70	1	8×10 ⁻⁵	0.2	1000	250-300	
Thermoplastics											
PP	900	1,200		0.4	30	20-400	9×10 ⁻⁵		330	70-140	2
PPS	1300	4,000			65	100	5×10 ⁻⁵			130-250	
PA	1100	2,000		0.35	70	200	8×10 ⁻⁵		1200	170	6
Polyether sulfone(PES)	1350	3,000			85	60	6×10 ⁻⁵			180	25
Polyetherimide (PEI)	1250	3,500			105	60	6×10 ⁻⁵	0.2		200	20
PEEK	1300	4,000			90	50	5×10 ⁻⁵	0.3		140-250	96

Tableau 1-1 : Les propriétés de la matrice résine

Matrice Métallique :

- Métaux comme l'aluminium, le titane ou le magnésium.
- Excellente résistance aux hautes températures et aux charges mécaniques.
- Applications dans l'aérospatiale et l'industrie automobile de haute performance.[6]

Matrice Céramique :

- Céramiques comme le carbure de silicium (SiC) et l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃).
- Très bonne résistance thermique et mécanique, mais fragile.
- Utilisée pour les freins d'avion, les protections thermiques et les réacteurs nucléaires.[7]

4.2 Le Renfort

Le renfort est la phase dispersée qui confère au composite ses propriétés mécaniques spécifiques.

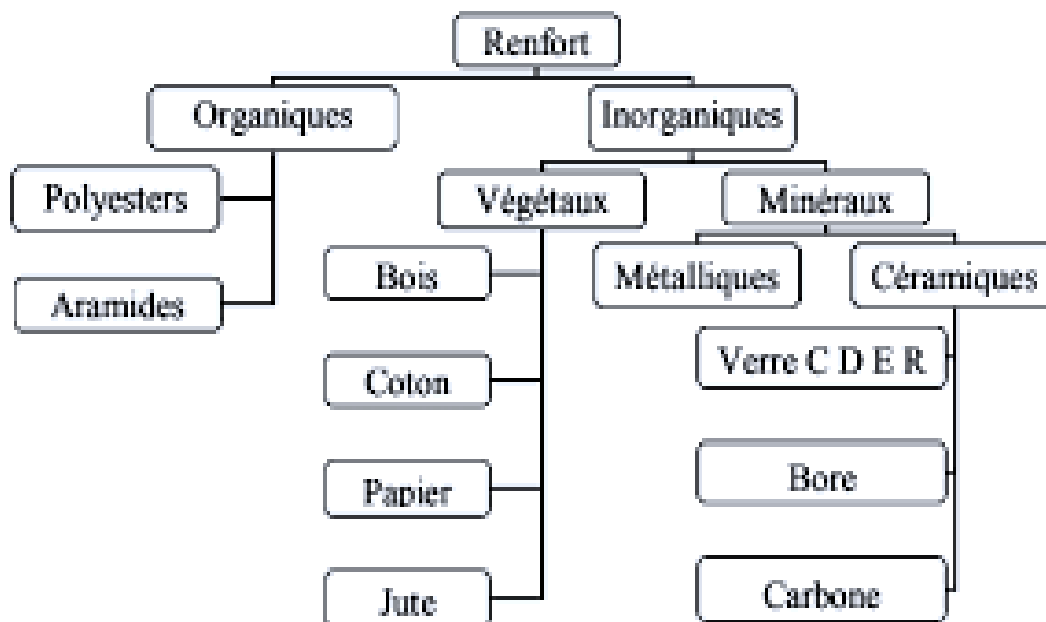


Figure 1- 10 : Organigramme des différentes familles de renfort

Fibres de Verre

- Bon marché, résistantes à la corrosion et isolantes.
- Utilisées dans les coques de bateaux, les carrosseries et les équipements sportifs.[2]

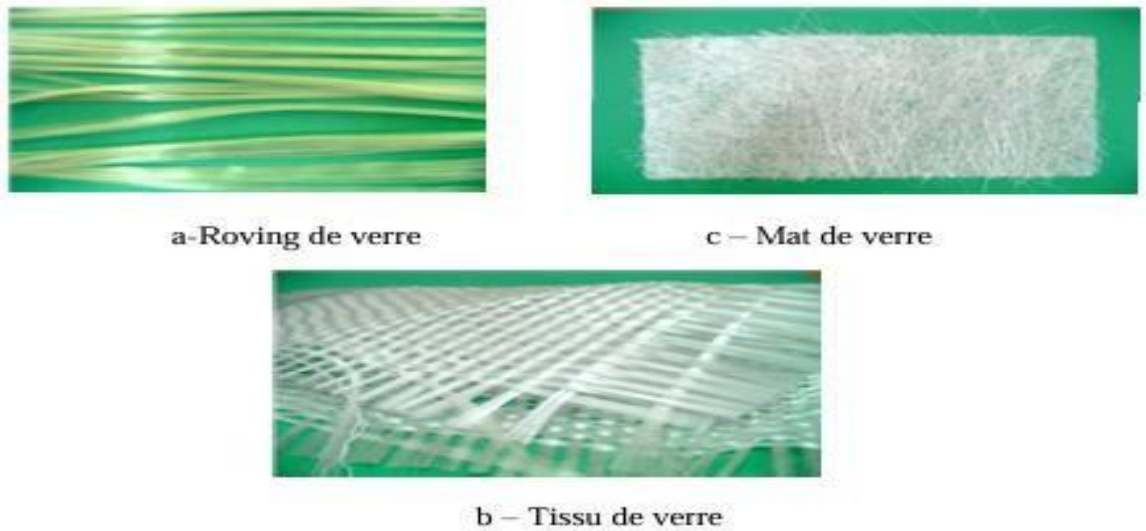


Figure 1- 11 : Les différents types de fibres de verre

Fibres de Carbone

- Très résistantes mécaniquement, légères et rigides.
- Utilisées en aéronautique, automobile et équipements sportifs haut de gamme.[1]

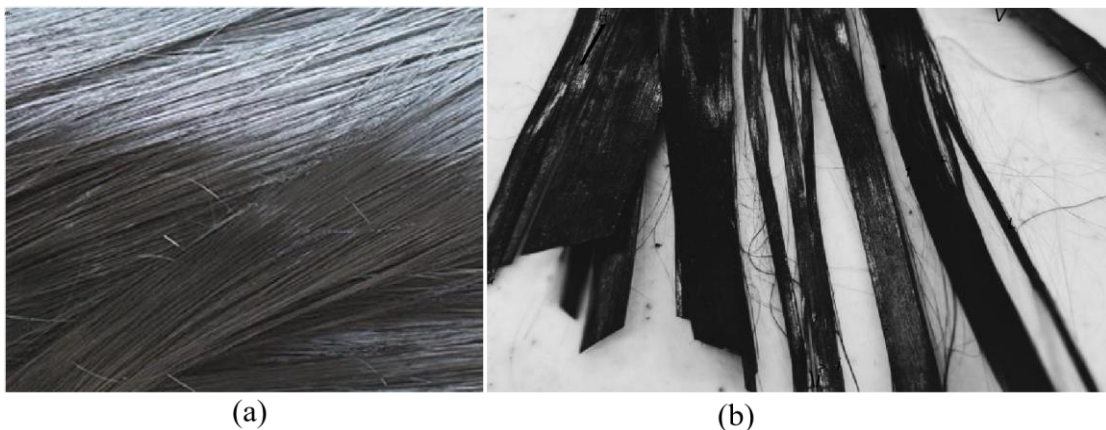


Figure 1- 12 : (a) Fibres de Graphite, (b) fibre de Carbone

Fibres d'Aramide (Kevlar) :

- Excellente résistance aux chocs et aux températures élevées.
- Utilisées pour les gilets pare-balles et les applications aéronautiques.[4]

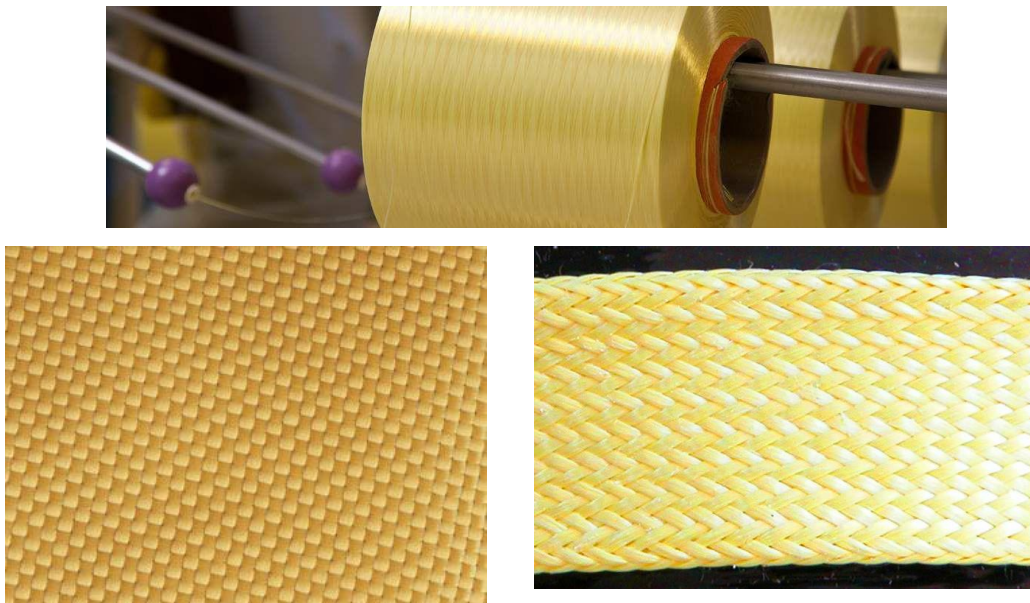


Figure 1- 13 : Les fibres d'aramides (Kevlar)

Le tableau ci-dessous montre les propriétés mécaniques des renforts fibreux.

Renfort Fibre	Diamètre de fibre, d(μm)	Densité , ρ (kg/m³)	Modul e d' élastic ité E(MPa)	Module de cisaille ment G(MPa)	Coeffici ent de poisson ν	Résista nce a la traction Eruptur e(MPa)	allongem ent, A(%)	Coefficie nt de dilatation thermiqu e,α(°C⁻¹)	Coefficient de conductivité thermique ,φ(W/m °C)	Capacite thermiqu e ,c(J/kg°C)	Temperatu re limite T_{max}(°C)	Prix (\$/kg)
“R”glass	10	2500	86,000		0.2	3200	4	0.3×10 ⁻⁵	1	800	700	14
“E”glass	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	0.5×10 ⁻⁵	1	800	700	2
Kevlar49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	-0.2×10 ⁻⁵	0.03	1400		70
HRgraphite	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	0.02×10 ⁻⁵	200(20°C); 60(800°C)	800	>1500	60-200
HMgraphite	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	0.08×10 ⁻⁵	200(20°C); 60(800°C)	800	>1500	
Boron	100	2600	400,000			3400	0.8	0.4×10 ⁻⁵			500	500
Alumina	20	3700	380,000			1400	0.4	0.8×10 ⁻⁵	50(20°C); 7(800°C)	900	>1000	
Alumina silicate	10	2600	200,000			3000	1.5					
Siliconcarbide	14	3000	400,000		0.14	2800	1.3	0.4×10 ⁻⁵	120	750	1300	600
Polyethylene	12	960	100,000			2400	3.5	1.3×10 ⁻⁵	20		70	

Tableau 1-2 : Les propriétés des renforts

4.3 Charges et renforts particuliers :

- Poudres métalliques, nanoparticules, et charges minérales.
- Utilisées pour améliorer la résistance à l'usure, la conductivité et les propriétés thermiques.[8]
- **Plastifiants** : augmentent la flexibilité des matrices polymères.
- **Antioxydants et stabilisants UV** : protègent contre le vieillissement.
- **Agents de couplage** : améliorent l'adhésion fibre-matrice.[5]

5. Les applications des matériaux composites :

Les matériaux composites sont largement utilisés dans divers secteurs en raison de leurs propriétés uniques, notamment leur légèreté, leur résistance mécanique élevée et leur résistance à la corrosion. Voici quelques-unes de leurs principales applications :

Aéronautique et aérospatiale :

- Construction des fuselages et ailes d'avions (ex. : Boeing 787, Airbus A350)
- Composants de satellites et de fusées
- Hélices et rotors d'hélicoptères

Automobile :

- Carrosseries et pièces structurelles pour alléger les véhicules et améliorer la consommation de carburant
- Pièces de voitures de course (F1) pour une meilleure performance et aérodynamisme
- Réservoirs de carburant et éléments de sécurité

Bâtiment et construction :

- Bétons renforcés de fibres pour augmenter la durabilité des structures
- Panneaux composites pour l'isolation thermique et acoustique
- Ponts et structures en composites résistants aux intempéries

Énergie :

- Pales d'éoliennes en matériaux composites pour plus de légèreté et de résistance.
- Réservoirs de stockage pour gaz et pétrole
- Structures offshore résistantes aux conditions extrêmes

Industrie maritime :

- Coques et superstructures de bateaux légers et résistants à la corrosion
- Hélices et composants de sous-marins

Sport et loisirs :

- Cadres de vélos, skis, snowboards et raquettes de tennis
- Équipements de haute performance pour les sports motorisés et nautiques

Médical :

- Prothèses et implants légers et biocompatibles
- Appareils orthopédiques
- Équipements d'imagerie médicale

L'essor des composites est principalement dû à leur capacité à remplacer les matériaux traditionnels (métaux, bois, plastiques classiques) tout en offrant de meilleures performances.

6. Calcul théorique des propriétés mécanique des matériaux composites :

E^f est le module de Young d'une seule fibre.

E^m est le module de Young de la matrice.

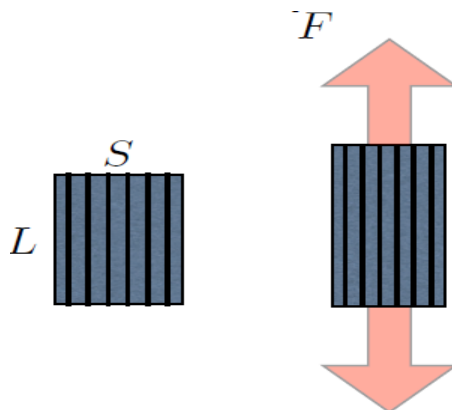
V^f est la fraction volumique des fibres = volume des fibres v_f divisée par le volume totale v_T du composite.

V^m est la fraction volumique de la matrice = volume de la résine v_r divisée par le volume totale v_T du composite.

$$V^f + V^m = 1 = (v_f/v_T) + (v_r/v_T)$$

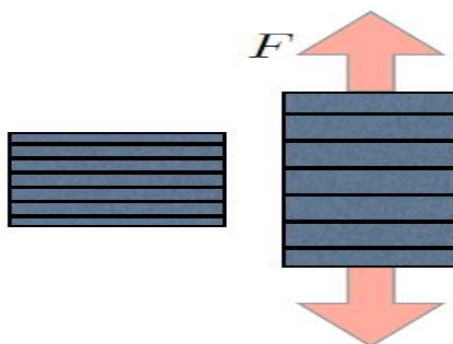
6.1 Module de Young longitudinal (E_L) du composite :

$$E_L = E^f V^f + E^m V^m \quad (1)$$



6.2 Module de Young transversal (E_t) du composite :

$$E_t = \frac{E^f E^m}{E^f V^m + E^m V^f} \quad (2)$$



6.3 Calcul des contraintes et déformations dans les matériaux composites :[9]

$$F_c = F_m + F_f \quad (3)$$

$$F = \sigma \cdot S \quad (4)$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{S_m}{S_c} + \sigma_f \frac{S_f}{S_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{V_m}{V_c} + \sigma_f \frac{V_f}{V_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (5)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (6)$$

$$\sigma_c = V_m \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} + V_f \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f}$$

6.4 Calcul théorique de E pour un tissu de type Tafetta :

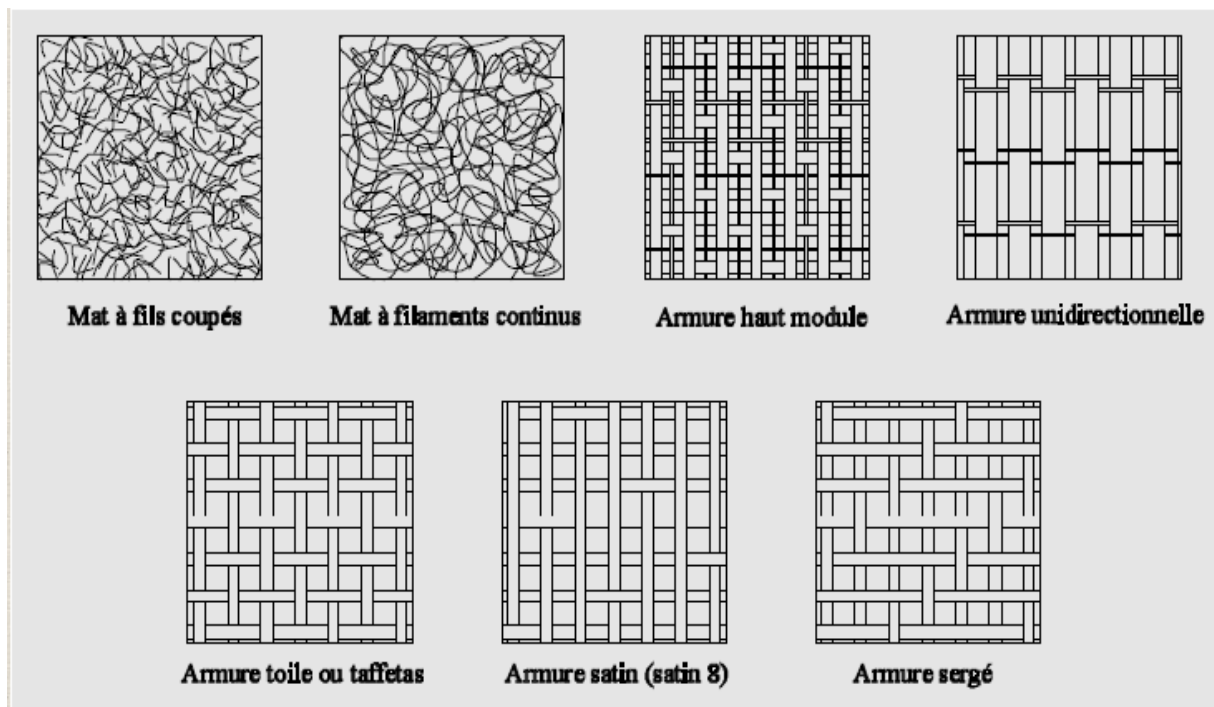


Figure 1- 14 : Les formes de tissus tissés

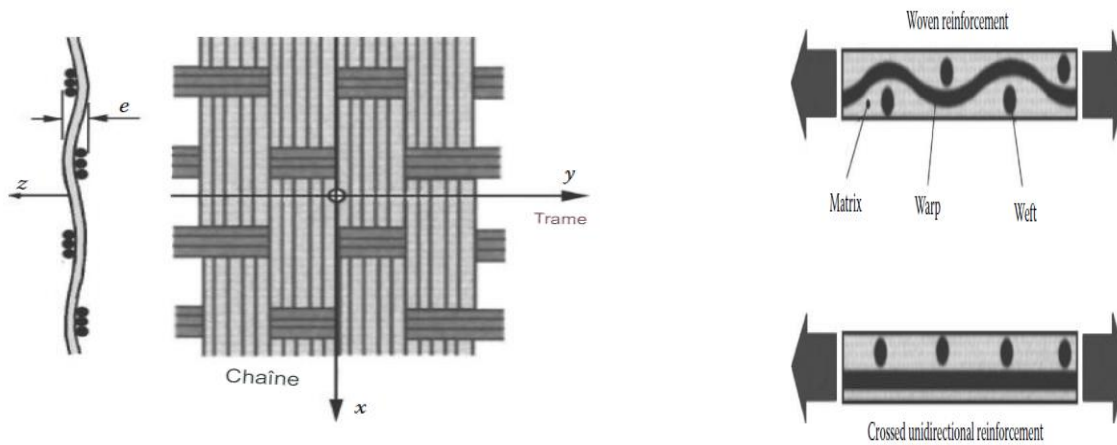
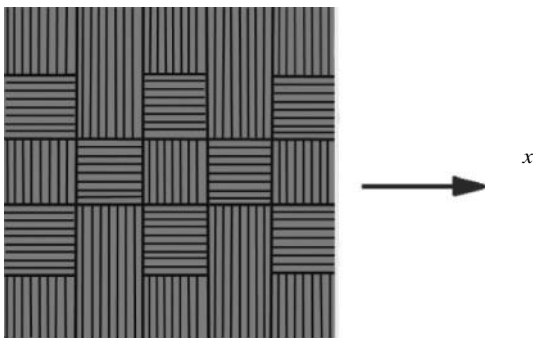


Figure 1- 15 : Notation pour une couche de tissu

Figure 1- 16 : Coupe transversale d'une couche avec des fibres croisées à 90°

	E verre	Kevlar	Carbon
			
Fraction volumique des fibres, Vf (%)	50	50	45
Masse spécifique, ρ(kg/m3)	1,900	1,330	1,450
Résistance à la traction longitudinale : E_{l,rupture tra} (MPa)	400	500	420
Résistance à la compression longitudinale : E_{l,comp} = (MPa)	390	170	360
Résistance au cisaillement dans le plan, rupture Gxy (MPa)		150	55
Module d'élasticité, Ex = Ey (MPa)	20,000	22,000	54,000
Module de cisaillement, Gxy (MPa)	2,850		4,000
Coefficient de Poisson, νxy	0.13		0.045

Coefficient de dilatation thermique, $\alpha_x = \alpha_y (^\circ\text{C}^{-1})$		0.2×10^{-5}	0.05×10^{-5}
Allongement à la rupture, A (%)		2.1	1.0
Prix (valeur relative)	1	4.2	7.3

Tableau 1-1 : Propriétés des composites tissu/époxy équilibrés

E_x : module de Young effectif du tissu tissé dans une direction donnée.

E_l : module de Young dans la direction longitudinale (chaîne-warp).

E_t : module de Young dans la direction transversale (trame-weft).

K : facteur de pondération qui dépend du rapport entre la fraction de fibres dans chaque direction.

$$k = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (7)$$

$$E_x = k \cdot E_l + (1 - k) \cdot E_t \quad (8)$$

$$E_y = (1 - k) \cdot E_l + k \cdot E_t \quad (9)$$

$$G_{xy} = G_{lt} \quad (10)$$

$$v_{xy} = \frac{v_{lt}}{\left[k + (1 - k) \cdot \frac{E_l}{E_t} \right]} \quad (11)$$

-Module d'élasticité dans la direction de la fibre, E_l

Une valeur assez précise est donnée par

$$E_l = E_m \cdot V_m + E_f V_f$$

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

En pratique, ce module dépend essentiellement du module longitudinal de la fibre E_f

car $E_m \ll E_f$ (comme $E_m \text{ résine} / E_f \text{ verre} \approx 6 \%$).

-Module d'élasticité dans la direction transversale à l'axe de la fibre, E_t

Dans l'équation suivante, E_{ft} représente le module d'élasticité de la fibre dans la direction perpendiculaire à la fibre, comme indiqué dans le tableau 1.4 : [10]

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

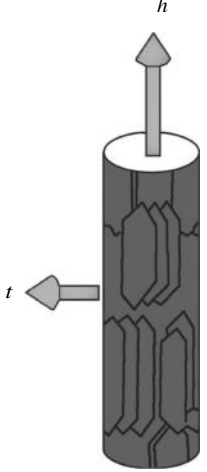
		VerreE	Kevlar	Carbon HR	Carbo HM n
	Module longitudinal de la fibre dans la direction ℓ , $E_{f\ell}$ (MPa)	74,000	130,000	230,000	390,000
	Module Fibre transversale module int direction, E_{ft} (MPa)	74,000	5,400	15,000	6,000
	Module de cisaillement des fibres, G_{ft} (MPa)	30,000	12,000	50,000	20,000
	Rapport de Poisson des fibres, $\nu_{f\ell t}$	0.25	0.4 1	0.3	0.35
		Isotropic	Anisotropic		

Tableau 1-2 : Module d'élasticité des fibres

-Module de cisaillement, G_{lt} : Un ordre de grandeur de ce module (difficile à estimer par calcul) est donné par l'expression suivante, dans laquelle G_{flt} représente le module de cisaillement de la fibre, comme indiqué dans le tableau 1.4 : **[10]**

$$G_{lt} = G_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_{flt}} V_f} \right] \quad (12)$$

-Coefficient de Poisson, ν_{lt} : Le coefficient de Poisson représente la contraction dans la direction transversale t lorsqu'un pli est soumis à une charge de traction dans la direction longitudinale l.

$$\nu_{lt} = \nu_m \cdot V_m + \nu_f V_f \quad (13)$$

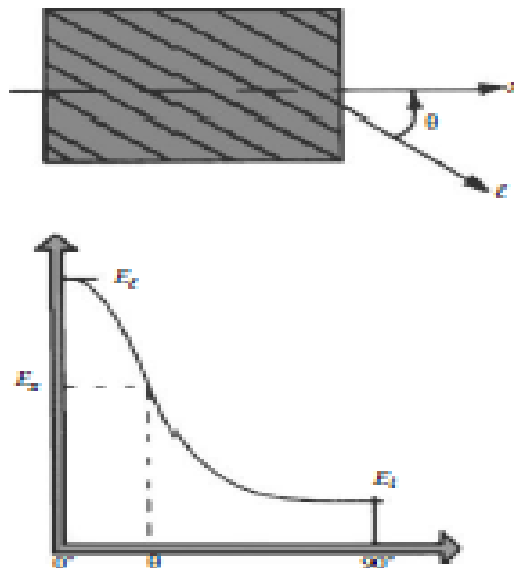


Figure 1- 17 : Module hors axe

Module selon n'importe quelle direction : Il est possible d'évaluer le module d'élasticité et de cisaillement selon n'importe quelle direction du plan (l, t).* Le module longitudinal selon la direction x, appelé E_x , est représenté par l'équation suivante : $c = \cos \theta$ et $s = \sin \theta$ (voir figure 1-15). Il est à noter que ce module diminue rapidement lorsque x s'écarte de la direction de la fibre (lorsque θ augmente)

$$E_x = \frac{1}{\frac{\cos^4 \theta}{E_l} + \frac{\sin^4 \theta}{E_t} + 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left(\frac{1}{2G_{lt}} - \frac{\nu_{lt}}{E_t} \right)} \quad (14)$$

6.5 Calcul théorique de E pour Mat de fibres discontinues orientées aléatoirement :

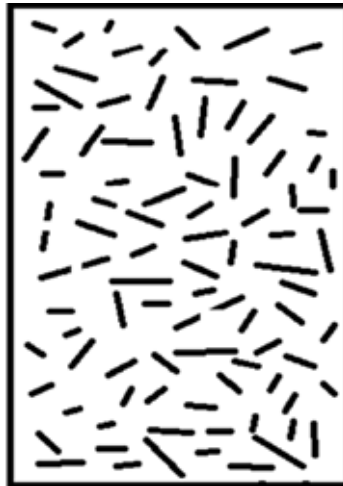


Figure 1- 18 : Fibres discontinues et orientées aléatoirement

$$E_c = E_m \cdot (1 - V_f) + k E_f V_f \quad (15)$$

Orientation des fibres	Direction de la contrainte	K
Fibres totalement alignées	Parallèle aux fibres	1
	Perpendiculaires aux fibres	0
Fibres orientées aléatoirement et uniformément dans un plan	Toute direction dans le plan des fibres	3/8
Fibres orientées aléatoirement et uniformément dans toutes les direction	Toute direction	1/5

Tableau 1-3 : Les valeurs du facteur k en fonction de la direction des fibres

$$\mathbf{E}_{mat} = \frac{3}{8} \mathbf{E}_l + \frac{5}{8} \mathbf{E}_t \quad (16)$$

$$G_{mat} = \frac{E_{mat}}{2 \cdot (1 + \nu_{mat})} \quad (17)$$

$$\nu_{mat} = 0.3 \quad (18)$$

Chapitre2 : Technique d'élaboration des matériaux composites

No table of figures entries found.

1. Obtention des renforts fibreux dans les composites :

1.1 Processus de fabrication des renforts fibreux :

Fibres Synthétiques :

Les fibres de verre :

Ces fibres, dont le diamètre varie de 5 à 15 μm , sont obtenues généralement par étirage. Les fibres ainsi obtenues sont revêtues d'une résine de protection (Ensimage) comme le montre la (figure. 2.1.) Ces fibres présentent un bon rapport qualité/prix. Elles offrent une bonne résistance thermique, électrique et à l'humidité. Le principal inconvénient des fibres de verre est la faible résistance aux chocs.[9]

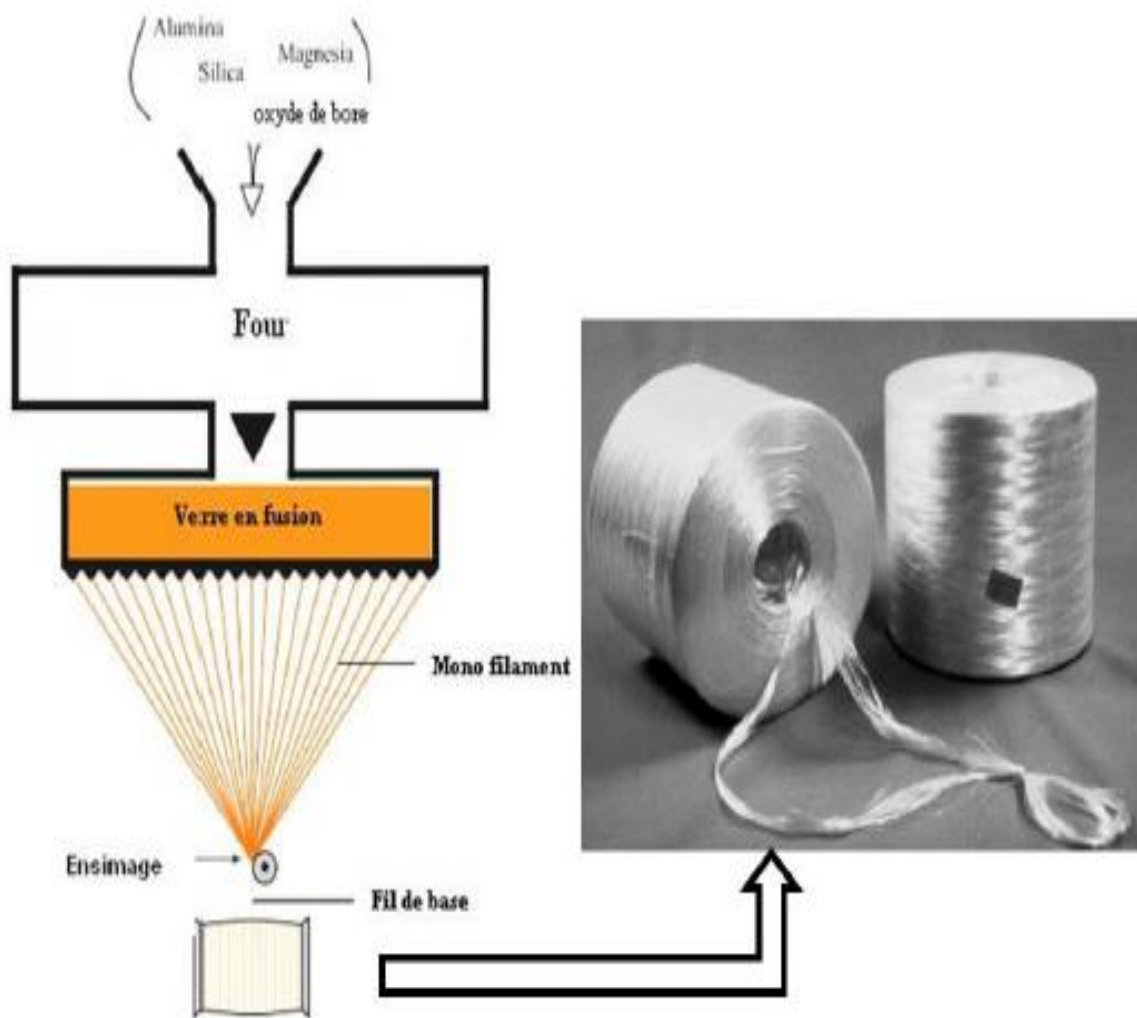


Figure 2- 1 : Procédé d'obtention des fibres de verre par étirage

Fibres de Carbone :

- **Procédé de fabrication** : Utilisation de polyacrylonitrile comme précurseur, traitement thermique sous conditions contrôlées, Les fibres de carbone sont obtenues par pyrolyse en atmosphère contrôlée à partir d'un polymère de base appelé précurseur et constitué généralement de fibres acryliques. Les différentes phases d'élaboration des fibres de carbone sont présentées par la figure 2.2.
- **Propriétés** : Légèreté, résistance à la traction, et conductivité thermique.

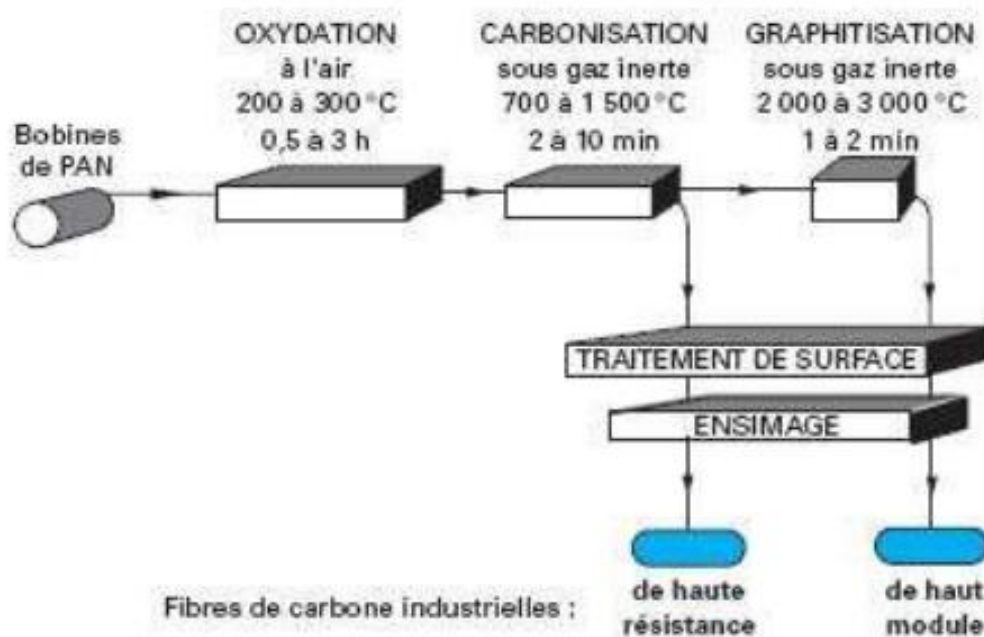


Figure 2- 2 : Principe d'élaboration des fibres en carbone

Les fibres de Carbure de Silicium (SiC) et les fibres de Bore (B) :

Les filaments de Carbure de Silicium et de bore sont fabriqués par dépôt de bore en phase vapeur (CVD en anglais) sur un substrat de tungstène ou en carbone pour le SiC et un substrat en tungstène pour le bore (Figure 2.3). Cette technique de dépôt d'un matériau sur un substrat permet d'obtenir un dépôt dense composé de petits grains [11]

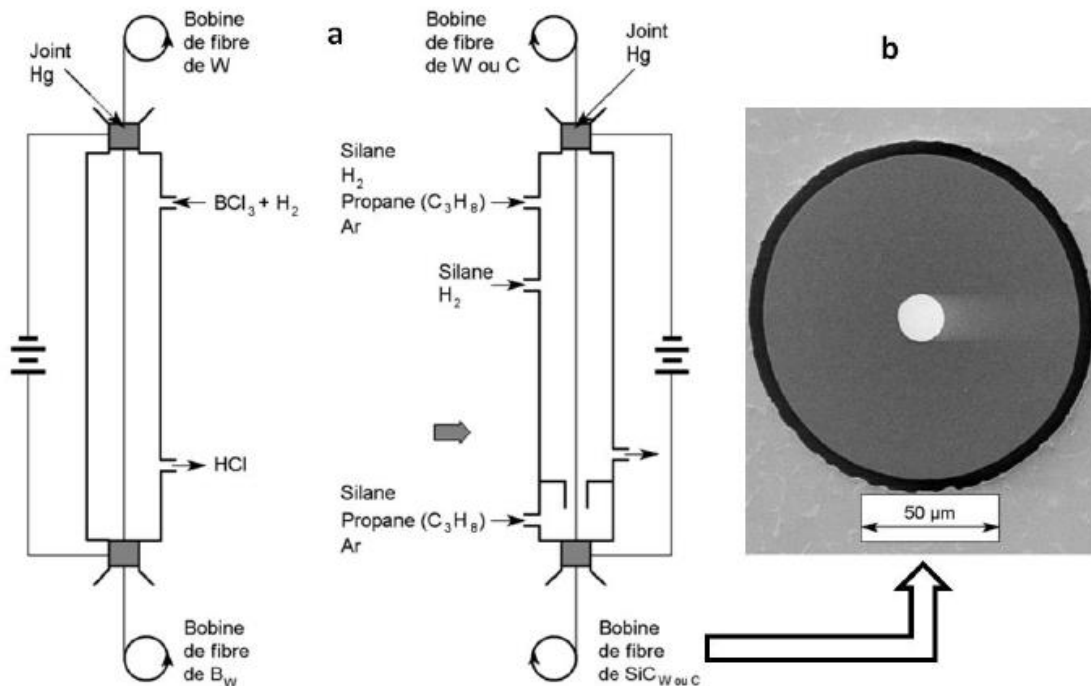


Figure 2- 3 : a) Fabrication des fibres de bore (à gauche) et des fibres de SiC (à droite),
 b) Section d'une fibre de SiC fabriquée par déposition en phase vapeur

Fibres Aramides :

- **Fabrication** : Polymérisation des monomères aromatiques pour obtenir des fibres très résistantes.
- **Applications spécifiques** : Utilisées dans les gilets pare-balles et les matériaux aérospatiaux.

Fibres Naturelles :

- **Procédé de fabrication** : Extraction et traitement des fibres végétales, généralement moins polluantes que les fibres synthétiques.

Fibres Métalliques :

Peu utilisées mais dans certains cas, elles peuvent renforcer des composites en raison de leur conductivité thermique ou de leur résistance à la chaleur. Le processus de *fabrication* de filage ou d'extrusion des métaux, parfois en combinaison avec d'autres fibres pour des propriétés spécifiques.

1.2 Traitement et caractéristiques des renforts fibreux :

Traitements de surface : Certains renforts, comme les fibres de verre et de carbone, subissent des traitements de surface pour améliorer l'adhésion avec la résine et la durabilité.

Propriétés mécaniques : Résistance à la traction, à la flexion, et à la compression. Comparaison entre les fibres naturelles et synthétiques.

Durabilité : Résistance aux conditions environnementales (humidité, chaleur, UV) et techniques de protection.

1.3 Avantages et inconvénients des renforts fibreux :

Avantages :

- **Légèreté :** Réduction du poids dans les applications critiques.
- **Résistance et durabilité :** Amélioration des propriétés mécaniques et de la longévité des matériaux.
- **Diversité :** Choix entre fibres naturelles et synthétiques selon les besoins spécifiques.

Inconvénients :

- **Coût :** Certaines fibres comme le carbone et l'aramide peuvent être coûteuses.
- **Recyclabilité :** Bien que les fibres naturelles soient plus écologiques, les composites à base de fibres synthétiques sont parfois difficiles à recycler.
- **Propriétés thermiques :** Certaines fibres, notamment les naturelles, peuvent ne pas offrir la même résistance thermique que les fibres synthétiques.

1.4 Perspectives et innovations dans l'obtention des renforts fibreux :

- **Fibres hybrides :** Combinaison de fibres naturelles et synthétiques pour optimiser les coûts et la performance.
- **Fibres recyclées :** Développement de fibres récupérées à partir de déchets pour des applications écologiques.

- **Nanotechnologie** : Intégration de nanomatériaux dans les fibres pour améliorer les propriétés mécaniques et thermiques.
- **Futures applications** : Utilisation dans des domaines comme l'aviation, les véhicules électriques, et les technologies de pointe.

2. Obtention des matrices dans les composites :

La matrice d'un composite a pour rôles :

- d'enrober les renforts, les protégeant ainsi du milieu extérieur;
- d'assurer une répartition spatiale homogène des renforts;
- de transmettre aux renforts les efforts extérieurs et de les répartir;
- de conférer la forme à la pièce: ce sont elles qui conditionnent l'aptitude à la mise en forme du composite [12]

Les matrices sont classées selon le matériau d'élaboration. Ainsi, on trouve :

Les matrices organiques :

Les matrices organiques sont faites de matières plastiques thermoplastiques et thermodurcissables. Ces matrices présentent une faible masse volumique et résistent bien aux attaques chimiques. Elles sont facile à mettre en œuvre, leur coût de revient est faible mais présentent une faible tenue en température.

Les matrices organiques les plus utilisées sont :

- les résines de polyester ;
- les résines époxy ;
- les résines phénoliques ;
- les résines polyimides ;
- les résines mélamines.[9]

Les matrices métalliques :

Par rapport à une matrice organique, une matrice métallique présente en effet les avantages particuliers suivants [13]:

- des propriétés mécaniques supérieures ;
- une gamme de température d'utilisation plus vaste ;
- une bonne conductivité thermique et électrique (permettant l'évacuation de la chaleur) ;
- une facilité d'usinage et d'assemblage.

Notons que le coût de revient des matrices métalliques demeure supérieur à celui des matrices organiques.

Différentes techniques sont employées pour réaliser les matrices métalliques comme le laminage, l'imprégnation en phase liquide et le dépôt physique en phase vapeur. [9]

Les matrices céramiques :

Composées principalement d'oxydes, de nitrures et de carbures (C, Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃, MgO, SiC, Si₃N₄...), les matrices céramiques offrent une bonne résistance à la compression et une faible masse volumique par rapport aux matrices métalliques. Cependant, elles sont peu résistantes aux chocs et nécessitent des techniques d'élaboration onéreuses. [9]

3. Technique d'élaboration des matériaux composites :

3.1 Processus de moulage :

les processus varient en fonction de la nature de la pièce, du nombre de pièces et du coût. Le matériau du moule peut être en métal (acier, aluminium, invar), en polymère, en bois, ou encore en plâtre. [8]

Moulage par contact :

Le moulage par contact (voir Figure 2.4) est un procédé de moulage ouvert (il n'existe qu'un seul moule, soit mâle ou femelle). Les couches de fibres imprégnées de résine et d'accélérateur sont déposées sur le moule.

Le compactage se fait à l'aide d'un rouleau ou d'un aspirateur pour éliminer les poches d'air. La durée du durcissement de la résine varie, en fonction de la quantité d'accélérateur et de la température, de quelques minutes à quelques heures. De cette façon, des pièces de grandes dimensions peuvent être produites à raison d'environ 2 à 4 par jour et par moule, en fonction de leur complexité au stade du drapage [8]

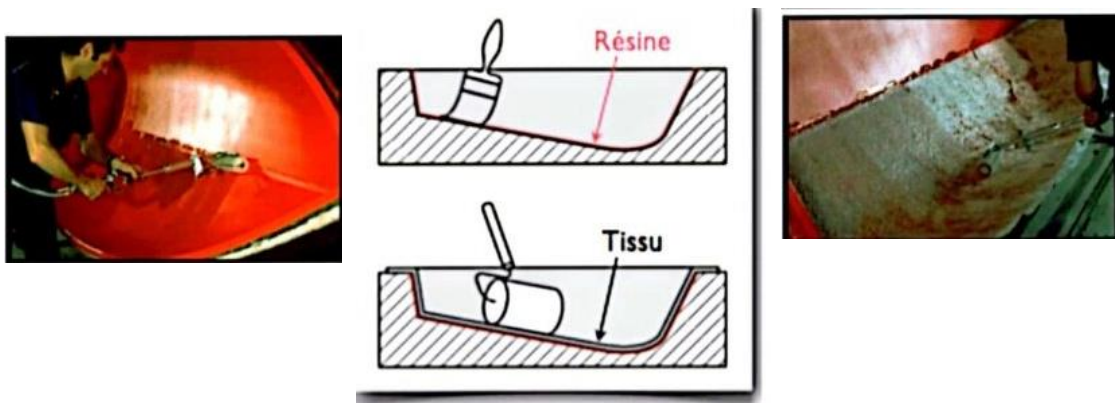
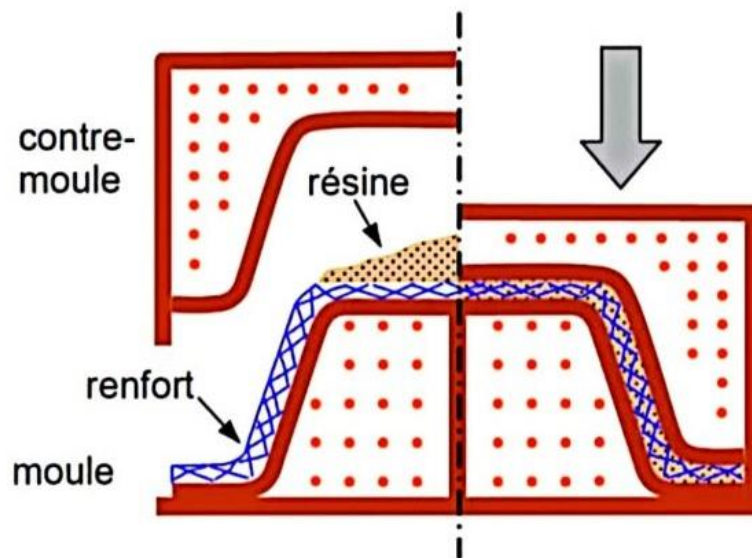


Figure 2- 4 : Moulage par contact. [9]

Moulage par compression :

Avec le moulage par compression (voir Figure 2.5), un contre-moule fermera le moule après y avoir placé les renforts imprégnés. L'ensemble est placé dans une presse qui peut appliquer une pression de 1 à 2 bars. La polymérisation a lieu soit à température ambiante, soit à une température supérieure.

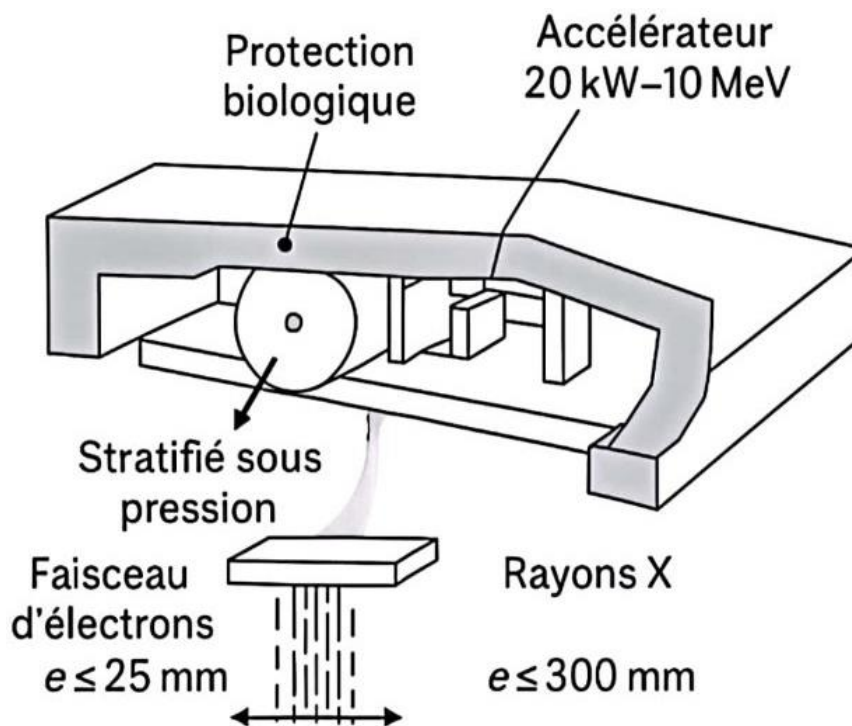
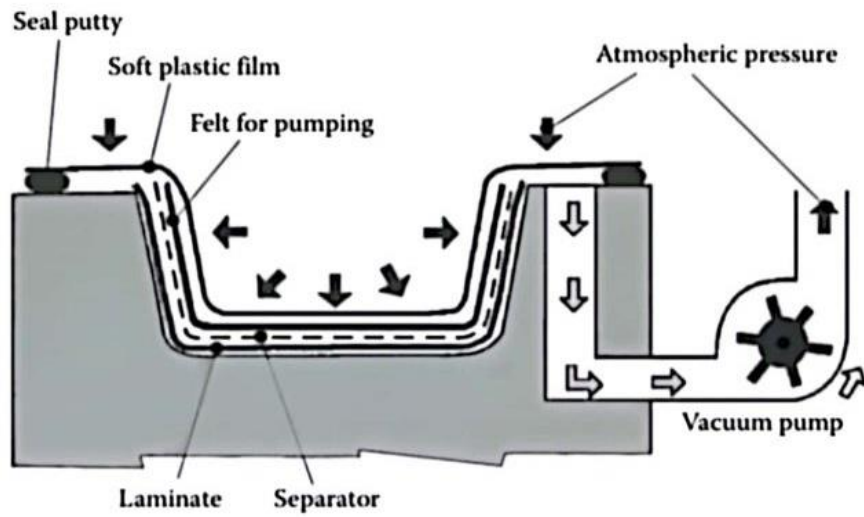
Le procédé convient aux moyennes séries : plusieurs dizaines de pièces par jour peuvent être fabriquées (jusqu'à 200 avec chauffage, selon leur complexité au stade du drapage). Ceci est utilisé pour les pièces secondaires de l'automobile et de l'aérospatiale. [8]



Moulage sous vide :

Ce procédé de moulage sous vide est encore appelé moulage en dépression ou moulage en sac. Comme dans le cas de moulage par contact décrit précédemment, un moule ouvert sur lequel les renforts imprégnés sont placés est utilisé pour ce processus. Certaines âmes pour matériaux sandwich peuvent être placées dans le moule. Une feuille de plastique souple est utilisée pour le scellement. Il est collé sur le pourtour du moule au moyen d'un mastic de scellement. Le vide est appliqué sous la feuille de plastique (voir Figure 2.6).

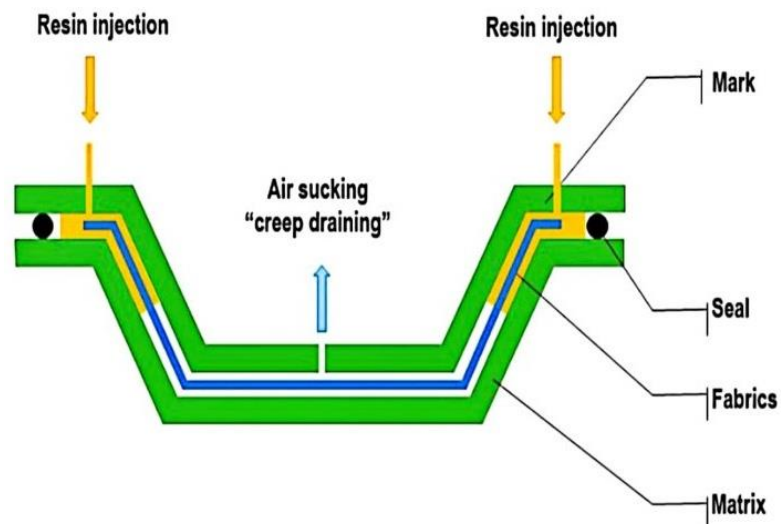
La pièce est ensuite compactée sous l'action de la pression atmosphérique, et les bulles d'air sont éliminées. Le feutre poreux absorbe l'excès de résine. L'ensemble du matériau est polymérisé en étuve ou en autoclave sous pression (7 bars dans le cas du carbone/époxy pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques), ou avec de la chaleur, ou avec un faisceau d'électrons, ou avec des rayons X (voir Figure 2.7). Ce procédé a des applications pour les avions structures, à raison de quelques pièces par jour (en fonction de leur complexité au stade du démontage). [8].



Moulage par injection de résine :

Avec le moulage par injection de résine (voir Figure 2.8), les renforts (tapis, tissus) sont mis en place entre moule et contre-moule. La résine (polyester ou phénolique) est injectée. La pression de moulage est faible. Ce processus peut produire jusqu'à 30 pièces par jour, en fonction de leur complexité à étape de mise en place. L'investissement est moins coûteux et trouve une application dans les carrosseries automobiles.

Les dimensions des autoclaves varient en fonction de la taille des pièces à polymériser. Ils peuvent être très importants, par exemple une longueur allant jusqu'à 32 m pour un diamètre allant jusqu'à 6 m.[8]



Moulage par injection avec pré imprégné :

Le procédé de moulage par injection de pré imprégné permet une automatisation du cycle de fabrication (taux de production jusqu'à 300 pièces par jour).

Résines thermo durcies : Peuvent être utilisées pour fabriquer des composants de carrosserie automobile. Le schéma du processus est présenté à la figure 2.9

Résines thermoplastiques : Peuvent être utilisées pour fabriquer des composants mécaniques à haute température résistance, comme le montre la figure 2.10.[8]

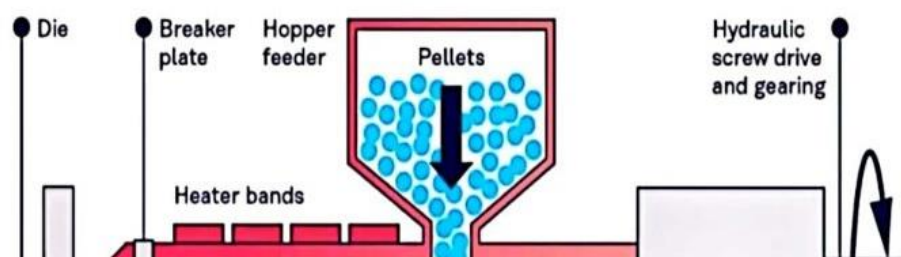
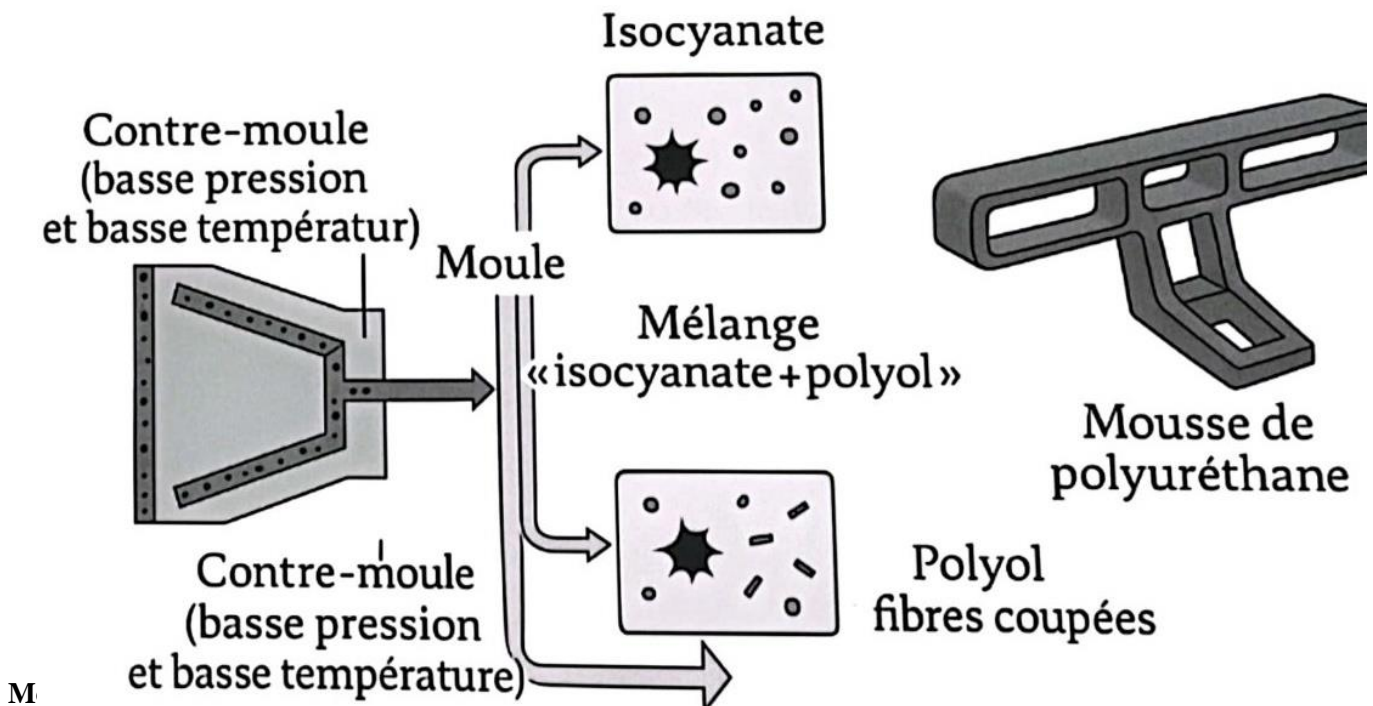


Figure 2- 9 : Injection de prémélange. [10]

Moulage par injection de mousse :

Le moulage par injection de mousse (voir Figure 2.11) permet la transformation de pièces d'assez grandes dimensions en mousse de polyuréthane renforcée de fibres de verre. Ces pièces restent stables dans le temps, avec de bons états de surface, et possèdent des propriétés mécaniques et thermiques satisfaisantes.[8]



Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est : tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé. Les limites sont la lenteur du procédé, uniquement des profilés droits à section constante.

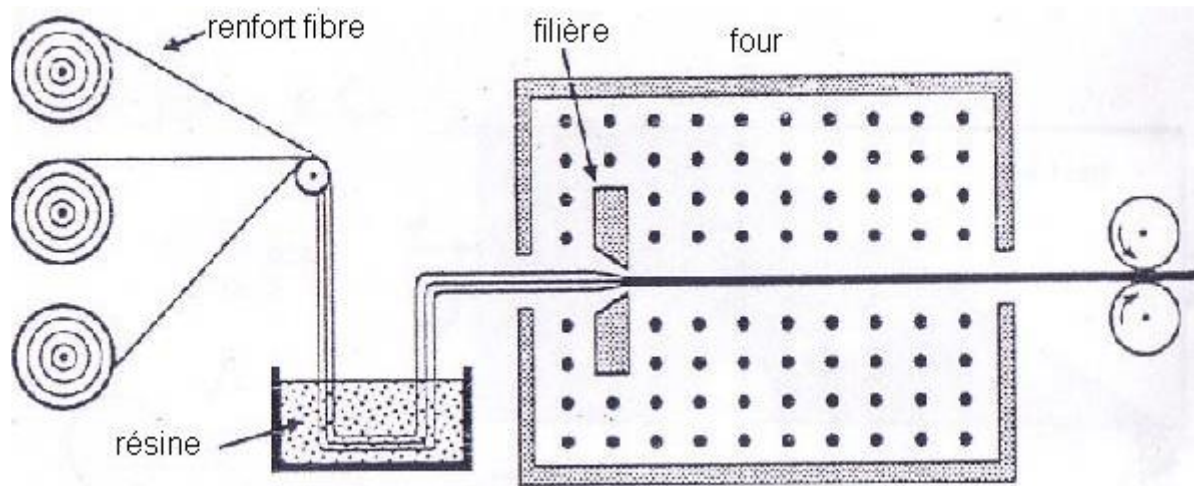


Figure 2- 11 : Principe du moulage par pultrusion [3].

Moulage de composants axisymétriques creux :

Le processus de moulage centrifuge (voir Figure 2.12) est utilisé pour la fabrication de tubes et de tuyaux. Il permet une répartition homogène de la résine avec un bon état de surface , y compris la surface interne du tube. La longueur du tube dépend de la longueur du moule .Le rythme de production varie selon le diamètre et la longueur des tubes (jusqu'à 500 kg de composite par jour) [8]

Le processus d'enroulement filamentaire tel que décrit sur la figure 2.12 peut être intégré dans une chaîne de production continue et peut fabriquer des tubes de grande longueur. Le taux de production peut être jusqu'à 500 kg de composite par jour. Un tel procédé peut être utilisé pour fabriquer différents types de tubes, par exemple, des tubes pour le transport de pétrole et des obus cylindriques pour missiles, fusées , torpilles ,et le conteneur.

Pour les pièces de révolution présentant des courbes méridiennes quelconques, l'enroulement filamentaire peut être réalisé sur des mandrins de révolution aux géométries adaptées. Le composite est durci et le mandrin est retiré (voir Figure 2.13). La fraction volumique de fibres est élevée (jusqu'à 85 %). Ce procédé est utilisé pour fabriquer composants à haute pression interne, tels que les réservoirs et les tuyères de propulsion.[8]

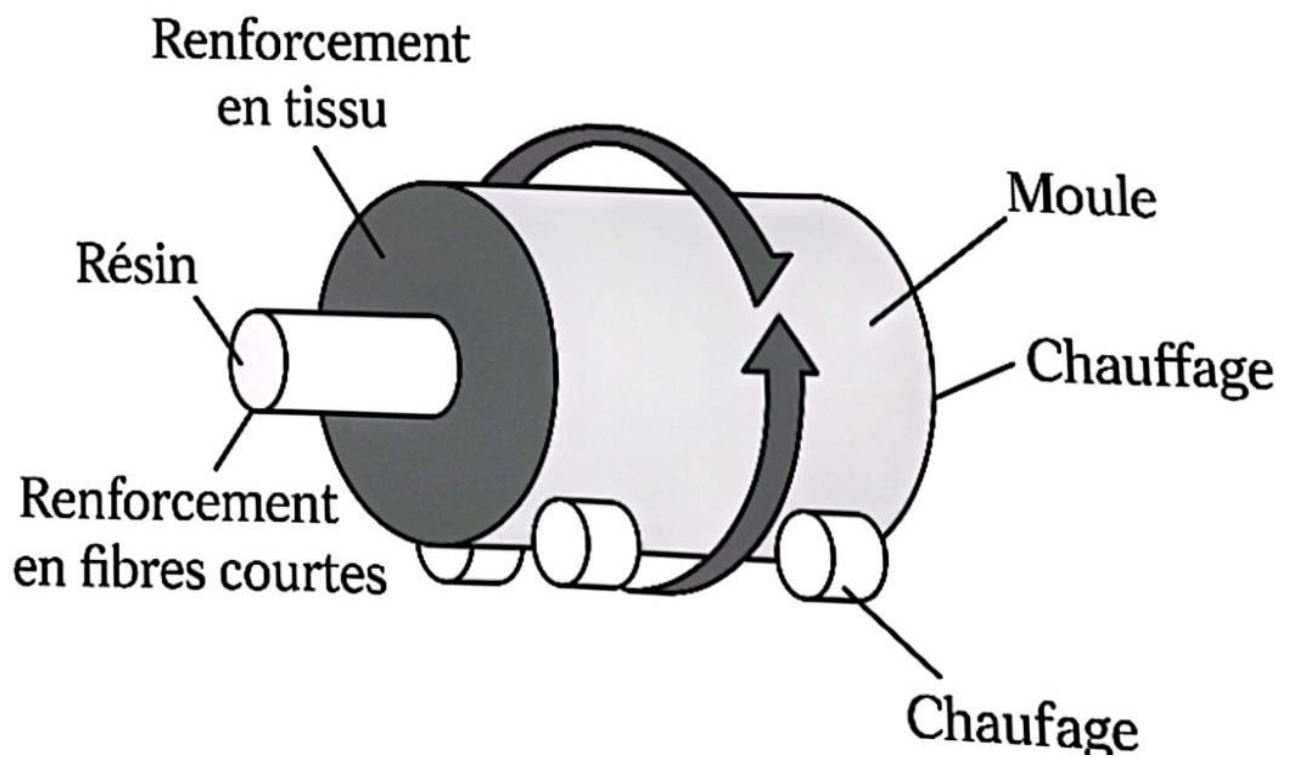
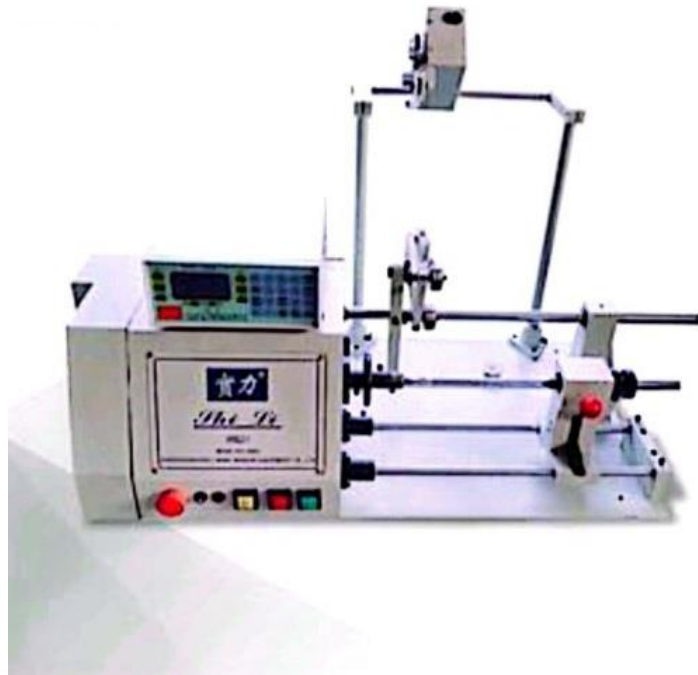


Figure 2- 12 : Enroulement du filament. [14]

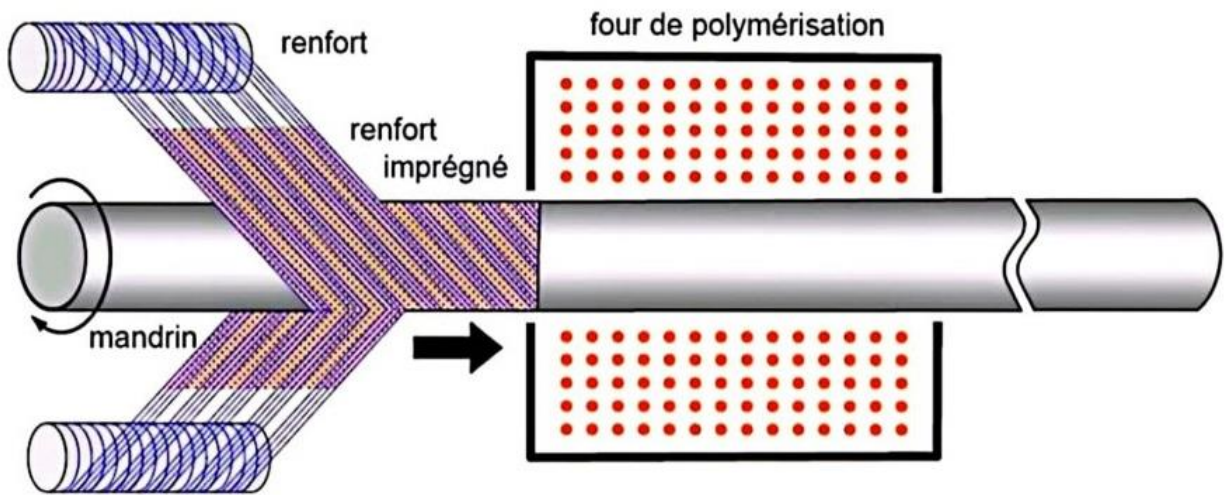


Figure 2- 13 : Enroulement filamentaire sur mandrin complexe. [14]

3.2 Procédés de formage:

Formage de feuilles :

La technique de formage de tôles composites (voir Figure 2.14) permet la réalisation de tôles planes ou des tôles ondulées présentant une rigidité accrue. Ce processus nécessite des investissements importants [8]

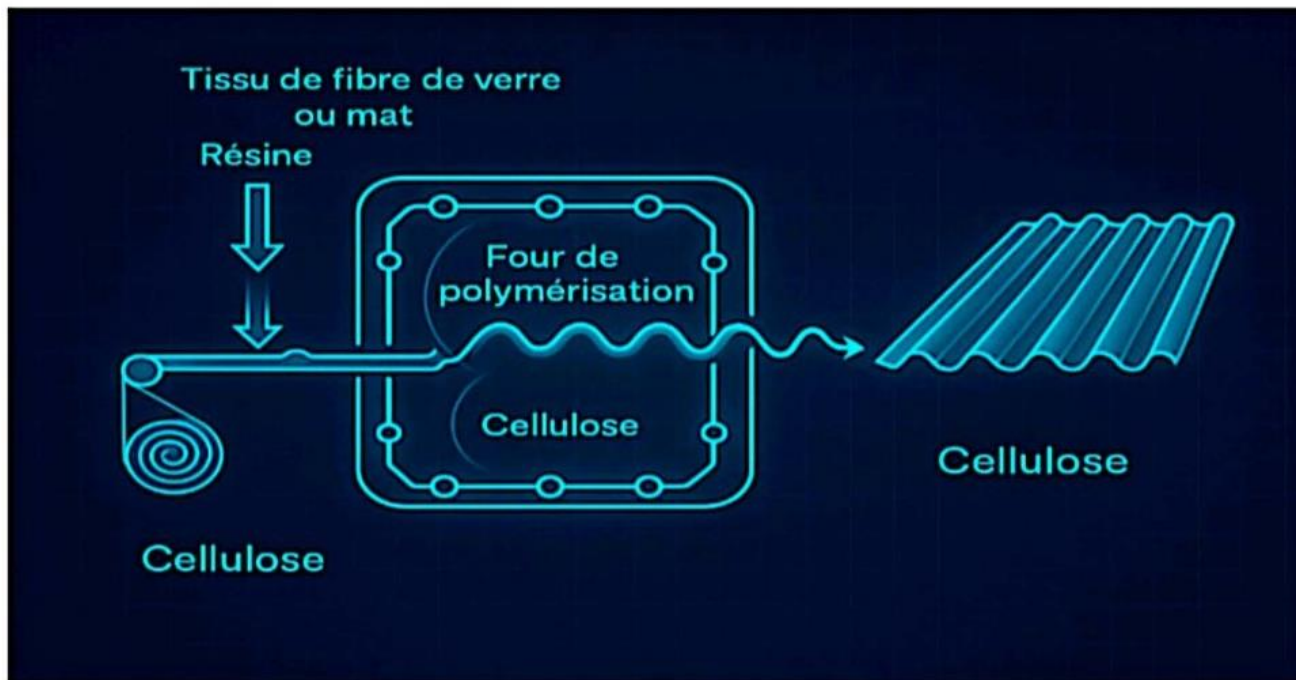


Figure 2- 14 : Formage de feuilles. [14]

Formation de profil :

Le profilé composite pultrudé représenté sur la (figure 2.15) est réalisé par pultrusion à travers une filière façonnée.

Ce procédé permet la fabrication de profils continus ouverts ou fermés. La teneur en fibres peut être importante pour des propriétés mécaniques élevées (plus de 60% en volume). La cadence de production varie entre 0,5 et 3 m/min selon la nature du profil.[8]

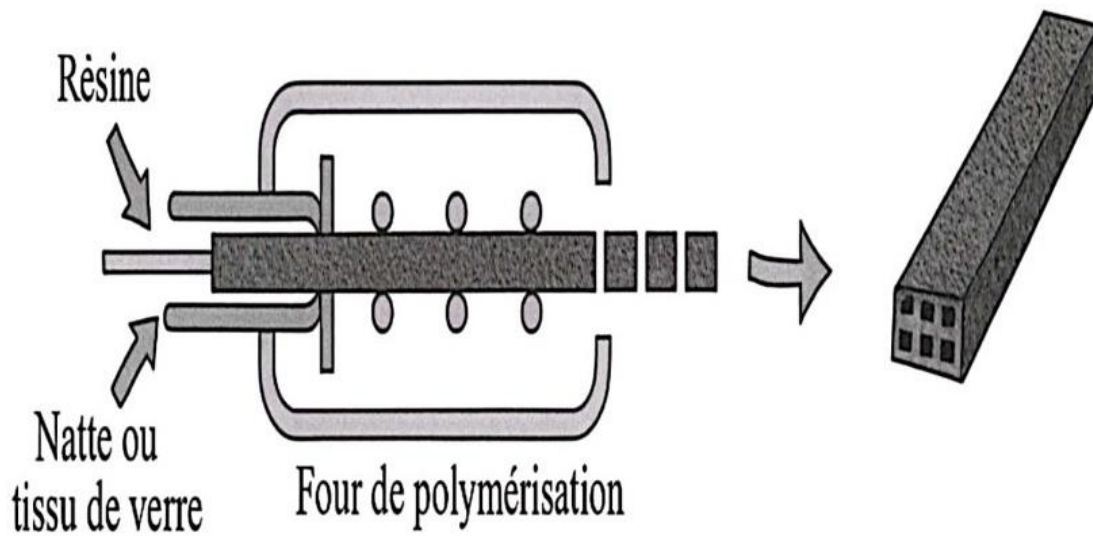


Figure 2- 15 : Formation de profil.[14]

Formage par emboutissage :

Un tel procédé (voir Figure 2.16) n'est applicable qu'aux composites thermoplastiques .On utilise des plaques préformées qui sont chauffées, embouties puis refroidies.[8]

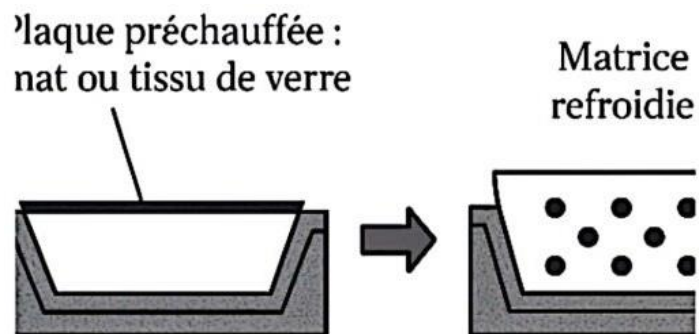


Figure 2- 16 : Formation de tampon. [8]

Préformage par assemblage tridimensionnel :

Carbone/Carbone :

Le renfort préformé est obtenu à partir de tiges en fibre de carbone pultrudées disposées le long de plusieurs directions spatiales et tissées. Ensuite, l'espace vide entre les tiges est comblé par imprégnation. Les deux techniques suivantes sont utilisées:

- **Imprégnation par liquide** : Le brai est utilisé sous une pression de 1000 bar, suivi d'une carbonisation.

-**Imprégnation à l'aide de gaz** : il s'agit d'un dépôt chimique en phase vapeur par décomposition thermique d'un hydrocarbure gazeux.[8]

Silicium/Silicium :

Le renfort est composé de filaments de céramique silicone. La matrice de silicium est déposée dans sous forme de solution liquide de silicium colloïdal, suivi d'un séchage sous haute pression et haute température (2000 bars, 2000°C).

Les préformes sont ensuite usinées. Les phases de développement de ces composites, comme le densification (formation de la matrice), sont longues et délicates. Cela rend les produits très onéreux. Par exemple, les tuyères de missiles et de lanceurs, les disques de frein et les tuiles ablatives pour le corps de rentrée de vaisseau spatial dans l'atmosphère.[8]

Pose automatisée de bandes et placement de fibres :

Nécessité de l'automatisation :

Certaines pièces composites nécessitent de nombreuses couches unidirectionnelles ou couches de tissu (des dizaines ou des centaines).

Pour les petites ou moyennes séries, il devient trop risqué et trop coûteux d'opérer manuellement pour Suivez la forme d'un modèle de découpe Respecter l'orientation spécifiée par la conception Minimiser le gaspillage de matériel Ceci explique l'utilisation de machines automatisées pour la découpe et le drapage des couches, avec les caractéristiques suivantes:

- Une trajectoire programmable du pli suivant plusieurs axes de mouvement
- Un outil de coupe rapide, comme un couteau de coupe vibrant orientable ou un faisceau laser avec diamètre d'environ 0,2 mm et une vitesse de coupe variant de 15 à 40 m/min, selon la puissance du laser et l'épaisseur de la pièce [8]

Exemple 1:

Avec une machine à draper MAD Forest-Line (FRA), le drapage se fait en deux étapes au moyen de deux installations distinctes:

1- Une machine de découpe qui produit un rouleau sur lequel sont fixées les pièces découpées (cassettes)

2- Une machine de dépose qui utilise la cassette de pièces découpées pour réaliser le drapage.

Les deux opérations sont schématisées sur la figure 2-17.[8]

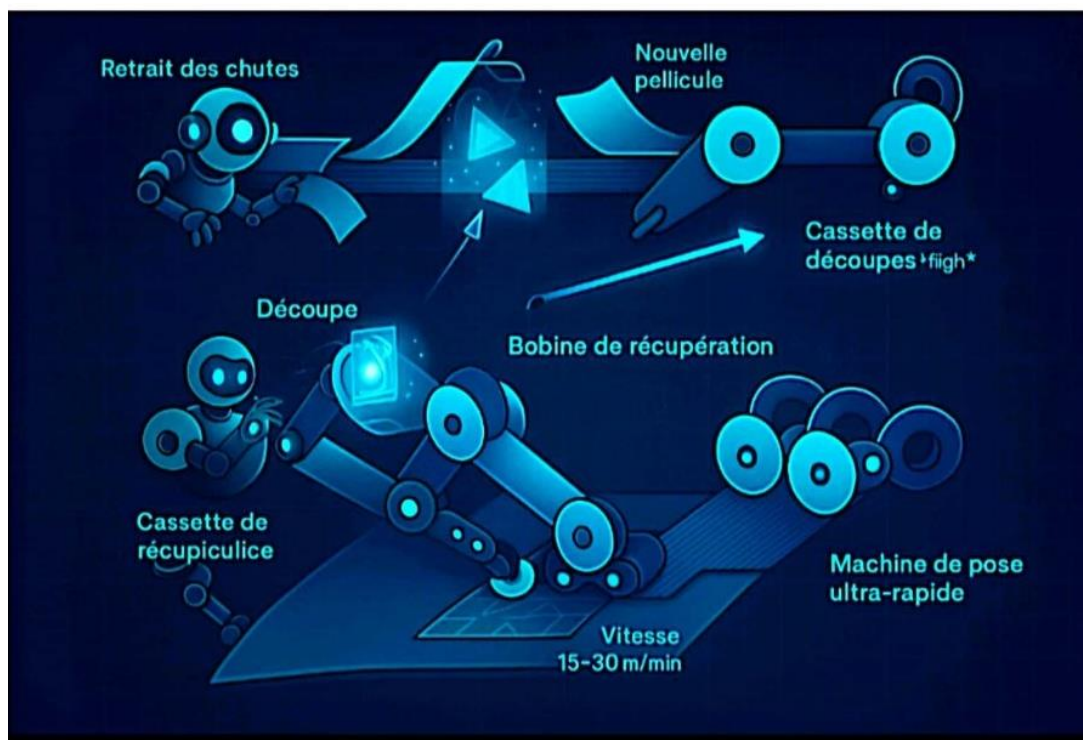


Figure 2- 17 : Processus de drapage. [8]

Exemple 2:

La machine automatique de pose de bandes (ATL) à grande vitesse à 11 axes avec couteaux de découpe à ultrasons, Avance des couches de 15 à plus de 60 m/min , Largeur de bande de 75 mm à 600 mm en configuration multibande

Aujourd'hui, ces solutions industrielles à forte valeur ajoutée comprennent Le drapé de formes complexes à double courbure, le placement des fibres (en rubans) sur des moules de forme concave, le drapage de grandes pièces à faibles courbures.

Usinage : fraisage, perçage et alésage [8]

Exemple 3:

Robots et logiciels pour AFP-Automatique Placement de fibres Coriolis Composites (FRA)Le processus de placement de fibres est mis en oeuvre sur des robots poly articulés standards couramment utilisés dans l'industrie automobile, combinée à des systèmes innovants de placement de fibres. Le choix des robots plutôt que les machines fixes permet de bénéficier d'une technologie éprouvée, facilement disponible et relativement bon marché L'approvisionnement et le placement des fibres sont obtenus au moyen d'une tête de placement de moins de 50 kg associé à une solution simple et efficace de guidage des fibres sur près de 3 m de longueur depuis le cantre, qui se situe au pied du robot jusqu'à la tête. La tête qui place les fibres est compact et léger et peut fonctionner avec tous types de moules aux géométries complexes (mâle, femelle de concavité jusqu'à 1 m de rayon, etc.).La programmation du robot huit axes et des actionneurs de la tête sont optimisés afin d'obtenir un temps de réponse et une précision de placement adapté aux cadences de production d'avions.[8]

Chapitre 3 : Elaboration de notre matériau composite et de la résine et du fibre de verre

1. Introduction :

Nous avons utilisé pour fabriquer notre échantillon en matériau composite le mat des fibres de verre de type E avec la résine polyester. Nous présentons dans ce qui suit, les étapes de fabrication de notre échantillon en matériau composite.

2. Propriétés de la fibre de verre de type E :

Le tableau suivant montre la composition chimique des fibres de verre (Table 3-1) :

Composition chimique de verre E	SiO₂ (silice)	B₂O₃ (trioxyde de bore)	AL₂O₃ (l'alumine)	CaO (l'oxyde de calcium)
Teneur en %	54.5	8.5	14.5	22

Tableau 3- 1 : Composition chimique du verre E utilisé comme renfort

Le tableau suivant présente les propriétés mécaniques de la fibre de verre E

Propriétés mécaniques	Fibre de verre E
Diametre de fibre (d) (μm)	16
Densité (ρ) (kg/m³)	2600
Module d'élasticité(E) (MPa)	74000

Module de cisaillement (G) (MPa)	30000
Coefficient de Poisson (ν)	0,25
Résistance a la traction (E_{rupture}) (MPa)	2500
Allongement, A(%)	3,5
Coefficient de dilatation thermique ,(α) (°C⁻¹)	0,5.10 ⁻⁵
Coefficient de conductivité thermique (φ) (W/m °C)	1
Capacité thermique (c) (J/kg°C)	800

Tableau 3- 2 : Les propriétés mécaniques de la fibre E

Le mat de verre est principalement composé de fibres de verre coupées et agglomérées de manière aléatoire, avec un liant servant à renforcer les matières synthétiques en fibres de verre. Les fibres de verre sont disposées dans différentes orientations, ce qui permet une distribution homogène de la charge et une augmentation de la résistance mécanique. La taille des fibres et la quantité de liant utilisée influencent la structure interne du MAT de verre, ce qui impacte directement ses propriétés de renforcement.

Poids surfacique	450 g/m ²
Matériau	Verre E
Longueur des fils	50 mm
Matière des fils	silane

Tableau 3- 3 : Caractéristiques du Mat (Fibre de verre)

La figure ci-dessous montre le mat de verre E utilisé pour fabriquer notre composite.



Figure 3- 1 : Mat de verre E (450g/m²)

3. Propriétés de la résine Polyester :

La résine utilisée est de type PRE-63 TAB (Figure 3-2), est une résine polyester à base d'orthophtale, à réactivité moyenne, à viscosité moyenne, à propriétés thixotropiques, pré-accélérée avec un indicateur de couleur bleue, destinée aux applications de GRP, de FRP et de casting clair.



Figure 3- 2 : Résine PRE-63 TAB

Le tableau suivant présente les propriétés chimiques de la résine :

Couleur	bleuté
Description	thixotrope
Contenu chimique	Orthophytalique/standard glycol
Propriétés sous forme liquide	
Accélérateur	oui
Réactivité	moyen
Thixotropie	oui
Viscosité(cps)	250-350
Durée du gel (min)	24-26
Taux de monomère%	35-45

Tableau 3- 4 : Les propriétés chimiques de la résine

Le tableau suivant présente les propriétés mécaniques de la résine polyester

Résine	Masse volumique (g/cm³)	Module de Young (MPa)	Dureté Barkol (934-1)	Résistance Mécanique à la traction (MPa)
PRE- 63 TAB	1,2	4000	42-47	70-80

Tableau 3- 5 : Les propriétés mécaniques de la résine

4. Matériaux et produits utilisés :

Les matériaux et les produits utilisés pour fabriquer notre matériau composite sont (Figure 3-3) :

- Moule et contre moule
- Pinceau
- Agitateur
- Masques protecteurs jetables
- Gants jetables
- Ruban adhésif
- Pots pour mélanger la résine
- Diluant
- Balance électronique
- Ciseau
- Papier sulfurisé (papier cuisson)
- Les fibres de verre Mat
- La résine
- Durcisseur



Figure 3- 3 : Produits et Matériaux pour fabriquer notre composite

5. Les étapes d'élaboration de notre matériau composite :

Les Dimensions de notre composite sont présentées dans la figure ci-dessous :

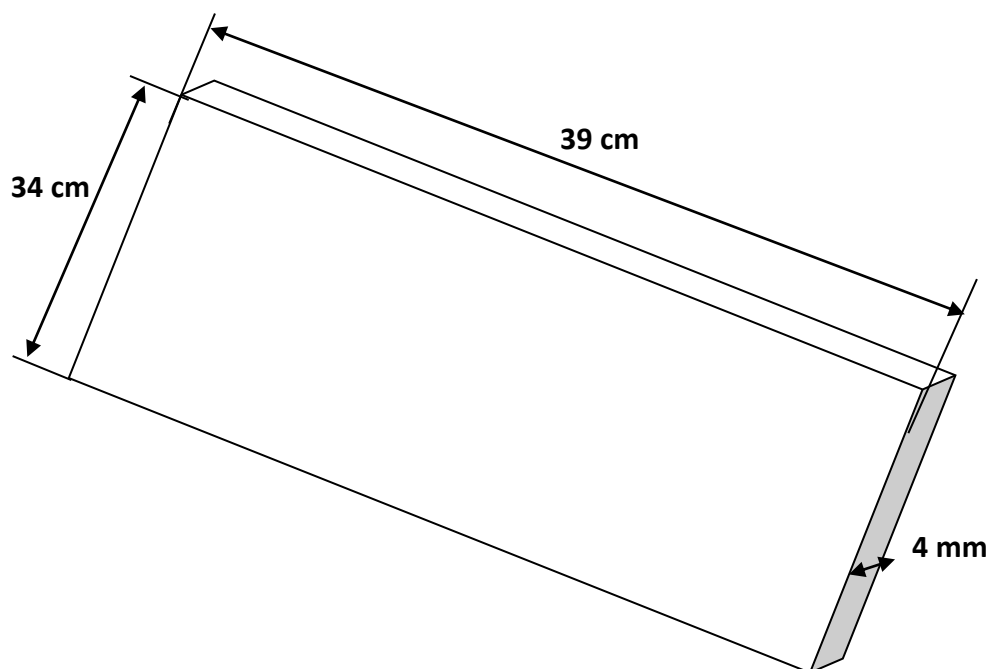


Figure 3- 4 : Les dimensions du moule

Etape 01 : Découpe de la fibre de verre



Figure 3- 5 : Découpage de la fibre de verre

Etape 02 : Définir la masse de la fibre de verre



Figure 3- 6 : La masse de la fibre de verre

Le tableau suivant présent les poids des plis du mat.

Les plis	Masse
Pli 01	61g
Pli 02	67g
Pli 03	61g
Pli 04	63g
Total des masses des fibres	252g

Tableau 3- 6 : La masse de la fibre de verre

Le tableau ci-dessus montre bien que la surface de chaque morceau de plis de fibre du mat ($0,39\text{cm} \times 0,34\text{cm} = 0,1326 \text{ cm}^2$) possédant une masse de 61g correspond bien à la caractéristique de notre fibre 450 g/m^2 .

Etape 03 : Calcul du volume de la fibre de verre

On montre dans ce qui suit, comment calculer le volume de notre fibre V_{fibre} :

$$\rho_{\text{fibre de verre}} = 2600 \text{ kg/m}^3 = 2,6 \text{ kg/l}$$

$$M_{\text{fibre de verre}} = 252 \text{ g} = 0,252 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{fibre}} = m_{\text{fibre}} / v_{\text{fibre}}$$

$$V_{\text{fibre}} = m_{\text{fibre}} / \rho_{\text{fibre}}$$

$$v_{\text{fibre}} = 0,252 / 2,6 = 0,09692 \text{ l}$$

$$V_{\text{fibre}} = 96,92 \text{ cm}^3 = 96,92 \text{ ml}$$

Etape 04 : Calcul de la masse de la résine

On montre dans ce qui suit, comment calculer le volume de notre fibre $V_{\text{résine}}$:

$$V_{\text{composite total}} = \text{longueur} \cdot \text{largeur} \cdot \text{épaisseur}$$

$$V_{\text{composite total}} = 39 \cdot 34 \cdot 0,4 = 530,4 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{c total}} = V_{\text{résine}} + V_{\text{fibre}}$$

$$V_{\text{résine}} = V_{\text{c total}} - V_{\text{fibre}} = 530,4 - 96,92 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{résine}} = 433,48 \text{ cm}^3 = 0,43348 \text{ l}$$

Volume de la résine 433,48 ml pour 4 plis :

(la masse volumique ρ de la résine = 1,2 kg/l)

$$M = \rho \cdot v = 0,43348 \cdot 1,2 = 0,5 \text{ kg}$$

Donc nous devons utiliser environ 0,5 kg de résine.

Etape 05 : L'ajout du durcisseur

Nous savons qu'il faut utiliser 10g du durcisseur pour 1kg de résine et puisque nous avons 0,5 kg de résine, donc la masse du durcisseur prise est de 6g à 5g. Le durcisseur sera mélangé avec la résine pour accélérer son séchage.



Figure 3- 7 : L'ajout du durcisseur

Etape 06 : Agitation de la résine avec le durcisseur



Figure 3- 8 : Mélange de la résine avec le durcisseur

Etape 07 : Pose du premier pli de mat

On a étaler au début la résine puis on posé le premier pli du mat du verre et nous avons continué avec la même manière pour les autres 3 plis qui restent.



Figure 3- 9 : Pose des plis

La figure ci-dessous présente le matériau composite finalisé avec 4 plis du mat de verre.



Figure 3- 10 : Le matériau composite final de 04 plis

Etape 08 : Application de la pression sur le contre moule

Le but de l'application de la pression est de chasser l'air incorporé à l'intérieur de notre matériau composite, éliminer les bulles d'air et pour avoir une bonne compression de la résine avec les plis du mat des fibres de verre.



Poids de 30 kg et une pression de 2262 Pa

Figure 3- 11 : La pression pour éliminer l'air

Etape 09 : Démoulage

Après démoulage, nous avons obtenu la plaque en composite suivante :

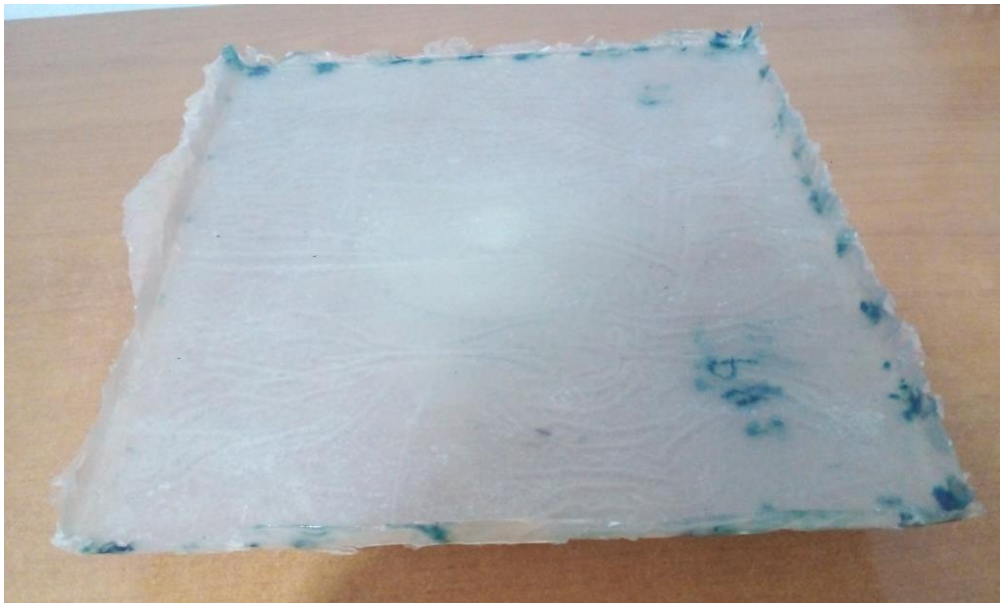


Figure 3- 12 : Le démoulage du matériau composite

Etape 10 : Découpage des bords de notre plaque en composite



Figure 3- 13 : Le découpage des bords

Nous présentons dans ce qui suit le tableau qui donne une comparaison entre les dimensions, la masse mesurées sur notre plaque avant et après la découpe.

dimension	Avant la découpe	Après la découpe
Longueur (mm)	390	385
Largeur (mm)	340	322
Epaisseur (mm)	4	4
Masse (g)	812	758
Masse volumique (g/cm ³)	1,530	1,528

Tableau 3- 7 : Les dimensions de la plaque

Etape 11 : Découpage des éprouvettes pour effectuer l'essai de traction



Figure 3- 14 : Le découpage des éprouvettes

6. Technique d'élaboration de la résine Polyester PET

Le **Polyéthylène Téréphtalate (PET)** est un polymère **thermodurcissable** de la famille des polyesters. Il est largement utilisé pour ses propriétés mécaniques, sa résistance chimique et sa transparence.

6.1 Propriétés physico-chimiques :

- Température de fusion : 245 °C
- Température de transition vitreuse 61-77 °C.
- Température de dégradation : Le polymère se dégrade à partir de 310 °C. A 450 °C, il est dégradé à 81 %.
- Le PET est semi-cristallin. Un refroidissement forcé garde l'état amorphe du polymère le rendant transparent.

6.2 Autres propriétés :

- **Mécaniques** : Résistant à la traction, à l'usure et aux chocs modérés.
- **Thermiques** : Bonne stabilité thermique (température de fusion ~250°C).
- **Chimiques** : Résistant aux acides dilués, mais sensible aux bases fortes.
- **Barrière** : Excellente barrière contre l'humidité, les gaz (CO₂, O₂), et les arômes.

6.3 Méthodes utilisées pour caractériser le PET

- **Etude de la Viscosité intrinsèque** (indique la masse moléculaire)
- **Spectroscopie FTIR, RMN ¹H et RMN ¹³C**
- **DSC (Analyse calorimétrique différentielle)** pour étudier la température de transition vitreuse (T_g) et de fusion (T_m).
- **ATG** : pour étudier la dégradation du polymère
- **DRX** : pour étudier le taux de cristallinité
- **GPC (Chromatographie d'exclusion stérique)** pour déterminer la distribution des masses moléculaires.

6.4 Synthèse du Polyéthylène téréphtalate (PET) :

Méthode (1) : Acide téréphtalique ($C_6H_4(CO_2H)_2$) et Éthylène glycol ($HO-CH_2-CH_2-OH$)

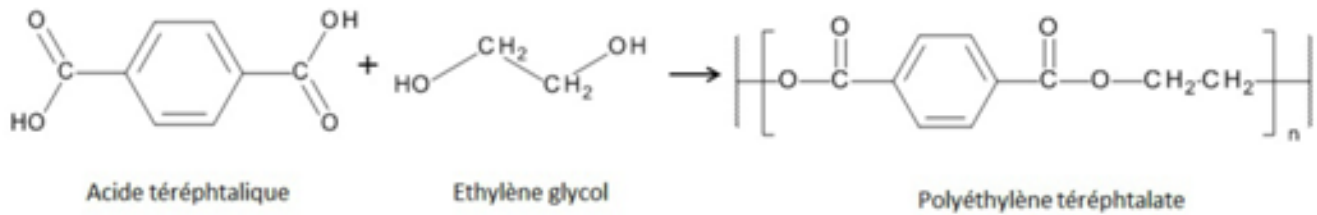


Figure 3- 15 : Méthode 1 de la Synthèse de PET

6.4.1 Matériel et réactifs pour la 1^{ère} méthode de la synthèse de PET:

Réactifs :

Acide téréphtalique ($C_6H_4(CO_2H)_2$)

Éthylène glycol ($HO-CH_2-CH_2-OH$)

Catalyseur : Tétrachlorure de titane ($TiCl_4$) ou acétate de cobalt/manganèse

Solvant (facultatif) : Parfois utilisé pour homogénéiser le mélange

Matériel : Ballon à fond rond, agitateur magnétique, chauffage à bain d'huile, condenseur à reflux, tube à vide

Méthode (2) : Diméthyl téréphtalate (DMT) et Éthylène glycol (HO-CH₂-CH₂-OH)

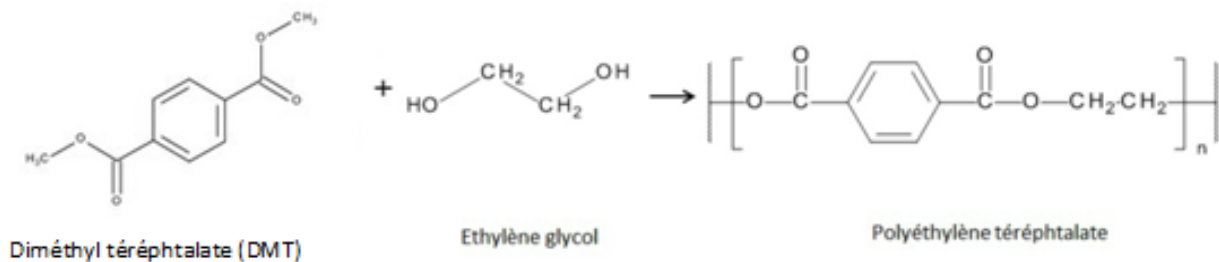


Figure 3- 16 : Méthode 2 de la Synthèse de PET

6.4.2 Matériel et réactifs pour la 2^{ème} méthode de la synthèse de PET:

Réactifs :

Diméthyl téréphtalate (DMT)

Éthylène glycol (EG) (en excès)

Catalyseurs :

Acétate de manganèse (Mn(OAc)₂) ou acétate de cobalt (Co(OAc)₂) pour la transestérification

Oxyde d'antimoine (Sb₂O₃) ou tétrabutyl orthotitanate (Ti(OBu)₄) pour la polycondensation

Stabilisateurs (Facultatif): Triphosphite de trismonophényle (TPP) pour éviter la dégradation

Matériel : Ballon à fond rond, Agitateur magnétique, Condenseur à reflux, Chauffage à bain d'huile, Pompe à vide.

Chapitre 4 : Tests mécaniques de la résistance de nos échantillons composites et mesures chimiques (Analyse et Résultats)

1. Mesure et calcul théorique de la masse volumique de notre matériau composite

a) La fraction volumique de la fibre de verre

$$f_v^f = \frac{V_f}{V_t}$$

$$f_v^f = \frac{96,92}{530,4} = 0,1827 = 18,27\%$$

b) La fraction volumique de la matrice résine

Sachant que : $f_v^f + f_v^{ré} = 1$ donc $f_v^{ré} = 1 - f_v^f$

$$f_v^{ré} = 1 - 0,1827 = 0,8172 = 81,72\%$$

c) Calcul théorique de la masse volumique de notre composite par fractions volumiques

$$\rho_C = f_v^{ré} \cdot \rho_{ré} + f_v^f \cdot \rho_f$$

$$\rho_C = 0,8172 \cdot 1,2 + 0,1827 \cdot 2,6 = 1,456 \text{ g/cm}^3$$

d) Mesure expérimentale de la masse volumique

Nous avons mesuré les dimensions et l'épaisseur de notre échantillon composite en utilisant un palmer micromètre possédant une précision de 0,01 mm) (voir la figure ci-dessous).

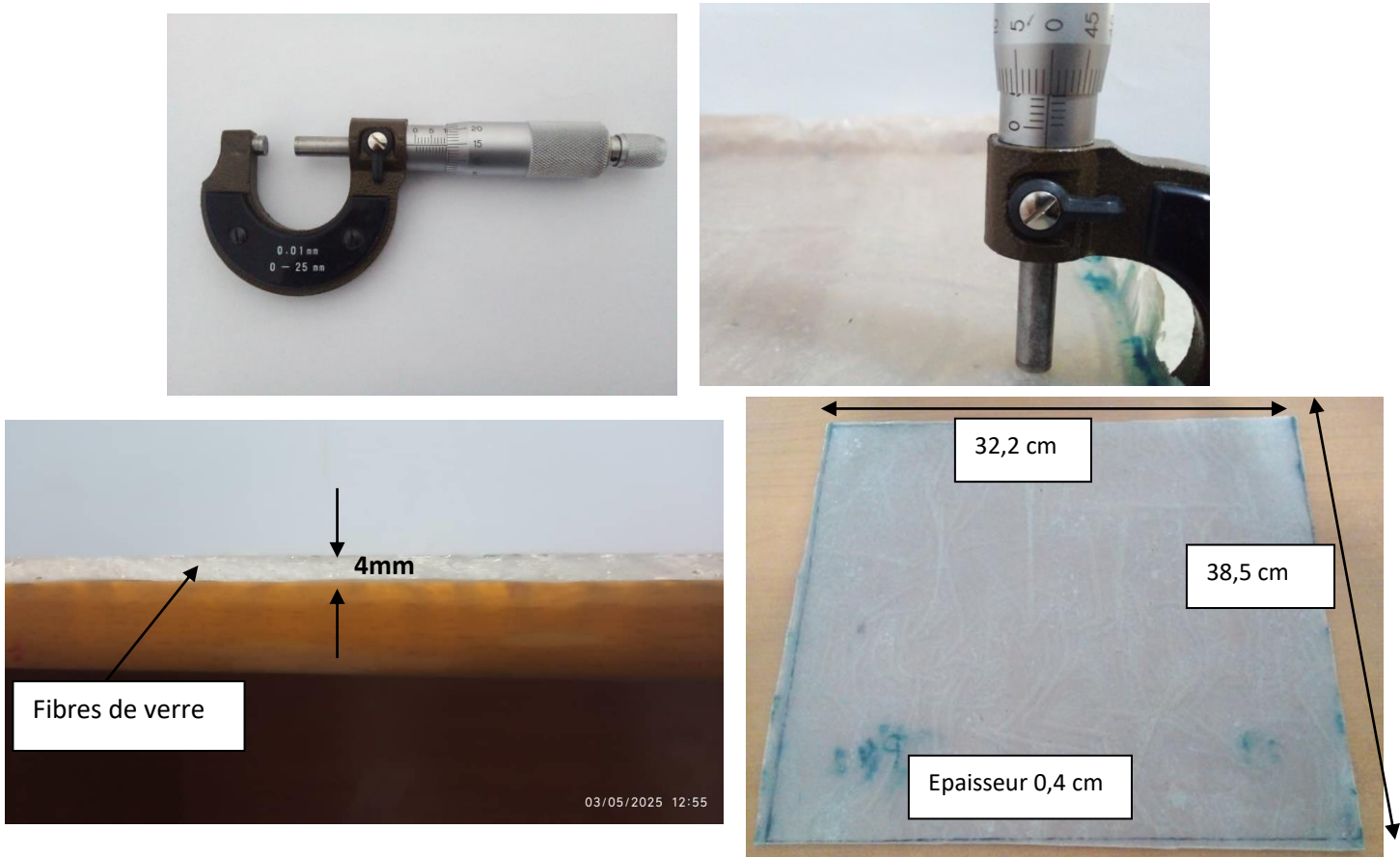


Figure 4- 1 : Mesure de l'épaisseur de la plaque en composite par micromètre et ses dimensions

e) Comparaison de la masse volumique mesurée expérimentalement avec la masse volumique calculée par fractions volumiques

La masse mesurée de l'échantillon ci-dessus est de 758 g, son volume est de $(32,2 \times 38,5 \times 0,4 = 495,88 \text{ cm}^3)$, donc la masse volumique de notre échantillon est m/V , elle sera égale à $1,528 \text{ g/cm}^3$.

La valeur théorique de la masse volumique calculée précédemment est de $1,456 \text{ g/cm}^3$, nous avons une erreur entre la théorie et l'expérience est de **4,7%**.

2. Essai de la perméabilité

Nous avons trempé notre plaque en composite dans l'eau durant 24h, les mesures de la masse de la plaque avant et après trempage sont égales (voir la figure ci-dessous), ceci nous permet de conclure que notre plaque en composite est imperméable.



Figure 4- 2 : Test de perméabilité sur notre plaque en composite

3. Essai de dureté

Nous avons effectué les mesures de la dureté dans plusieurs points de la surface de la plaque en composite. Nous avons utilisé un appareil (INSIZE) qui mesure la dureté HL par la technique du rebond et qui convertit cette mesure ensuite en dureté Rockwell, Vickers, Brinell ...

La figure ci-dessous montre la technique de mesure :

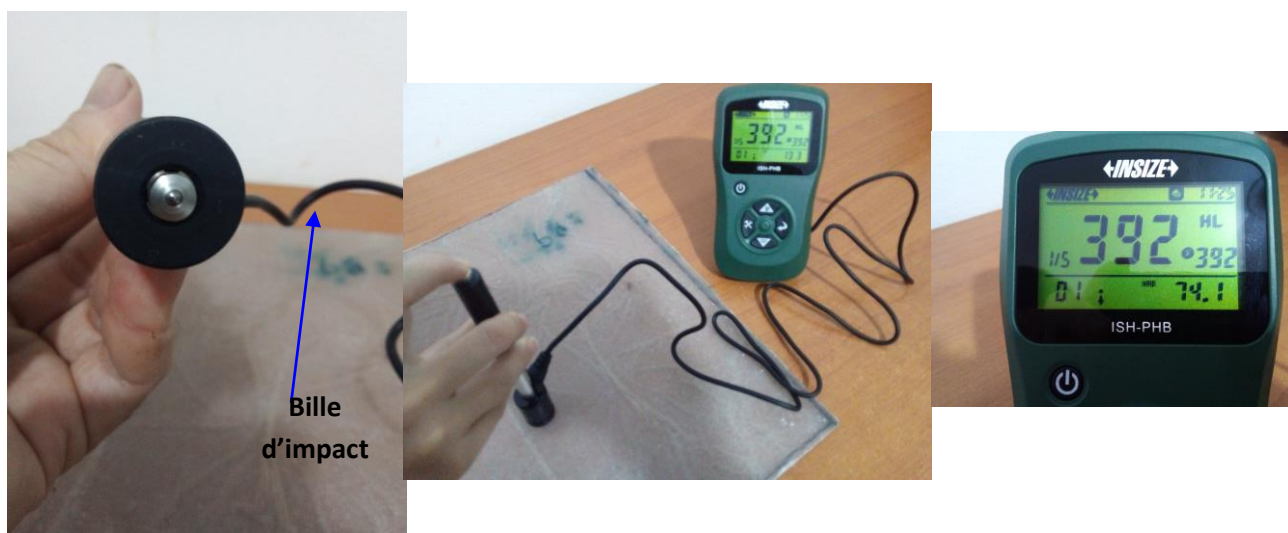


Figure 4- 3 : Mesure de la dureté de notre plaque composite par un appareil de mesure à rebond

Le tableau ci-dessous montre les résultats des différentes mesures, leur moyenne et les valeurs ordinaires pour un acier mi-dur et dur pour une éventuelle comparaison.

Points de mesure sur la plaque de notre composite	HL	Dureté Rockwell (Bille) HRB	Dureté Vickers HV	Dureté Brinell HB
1	392	74	133	132
2	395	74,9	135	133
3	396	75,2	136	134
4	406	78	143	142
5	413	79,7	148	146
Moyenne	400 ,4	76,36	139	137 ,4
Acier normal doux	----	87	173 (Re<250 MPa)	161 (HBS)
Acier dur	825	62,2 (HRC)	770 (Re>600 MPa)	639

Figure 4- 4 : Duretés de notre composite

En comparant la dureté de notre composite avec la dureté des aciers, nous pouvons conclure que notre échantillon est classé doux par rapport aux types des aciers.

4. Essai de traction

a) Calcul théorique du module de Young E du composite

Calcul théorique du module de Young longitudinal de notre matériau composite :

Cas des fibres considérées posées longitudinalement

$$E_{r\acute{e}} = 4000\text{MPa}$$

$$E_f = 74000\text{MPa}$$

$$E_l = E_{r\acute{e}} \cdot f_v^{r\acute{e}} + E_f \cdot f_v^f$$

$$E_l = (4000 \cdot 0,8172) + (74000 \cdot 0,1827)$$

$$E_l = 13519.8 + 3268.8 = 16788.6 \text{MPa} = 16.7886 \text{GPa}$$

Le module de Young a baissé (par rapport à celui des fibres) mais au profit du poids (si on considère que le poids des fibres qui est trop lourd par rapport à celui de la résine).

Calcul théorique du module de Young transversal de notre matériau composite :

Cas des fibres considérées posées transversalement

$$E_t = \frac{E_{r\acute{e}} \cdot E_f}{E_{r\acute{e}} \cdot f_v^f + E_f \cdot f_v^{r\acute{e}}}$$

$$E_t = \frac{(4000 \cdot 74000)}{(4000 \cdot 0,1827) + (74000 \cdot 0,8172)}$$

$$E_t = \frac{296000000}{60472.8 + 730.8} = \frac{296000000}{61203.6} = 4836.31 \text{MPa} = 4,83631 \text{GPa}$$

Le module de Young calculé transversalement est plus faible à celui calculé longitudinalement, en plus, il est peu supérieur à celui de la résine 4GPa parce que nous avons intégré les fibres dans la résine qui ont fait augmenter un peu le module de Young E_t .

Calcul théorique du module de Young de notre matériau composite:

Puisque notre matériau composite est composé de fibre de verre discontinu aléatoirement dans le plan donc on applique la loi du mélange suivant :

$$E_{mat} = \frac{3}{8} \cdot E_l + \frac{5}{8} \cdot E_t$$

$$E_{mat} = \frac{3}{8} \cdot (16788.6) + \frac{5}{8} \cdot (4836.31)$$

$$E_{mat} = 6295.725 + 3022.69 = 9318.41 \text{MPa} = 9.318 \text{GPa}$$

Nous remarquons que le module de Young théorique de notre matériau composite est égal à environ 9,3 GPa, il est deux fois supérieur à celui de la résine et qui est l'intérêt voulu par la fabrication de ce matériau composite, i.e. un matériau moins léger par l'utilisation de la résine et un matériau plus rigide par l'utilisation des fibres plus résistantes.

b) Présentation de la machine de traction

Les essais de traction ont été réalisés dans laboratoire matériaux de construction de département de Génie Mécanique d'Université de Tlemcen, sur une machine hydraulique universelle de type CONTROLAB modèle H0003 ($F_{max} = 600 \text{ kN}$). La machine hydraulique universelle fonctionne selon le principe de transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Voir (Figure 4-). Elle est composée de différents éléments essentiels tels qu'une pompe hydraulique, des vérins hydrauliques, un réservoir d'huile, des vannes de régulation et un système de contrôle électronique. La pompe hydraulique permet de créer un débit d'huile sous pression, qui est ensuite distribué aux vérins pour produire un mouvement mécanique. Les vannes de régulation contrôlent la pression et le débit de l'huile pour assurer un fonctionnement précis de la machine, tandis que le système de contrôle électronique permet de superviser et de réguler l'ensemble du processus. Elle est également connectée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la contrainte et de l'allongement. Ses spécifications incluent une course maximale de 200 mm et une vitesse d'essai réglable jusqu'à 100 mm/min, permettant une grande flexibilité lors des tests. La machine de traction est équipée par des capteurs de mesure de déplacement et de la force d'étirement. La vitesse d'étirement pour nos essais est égale à 0,05 mm/s.



Figure 4- 5 : Machine de traction CONTROLAB modèle H0003

c) Eprouvettes d'essai de traction normalisées (avant et après test de traction)

La longueur normalisée pour calculer la déformation est de 200 mm, Section est de $20 \text{ mm} * 4 \text{ mm} = 80 \text{ mm}^2$.

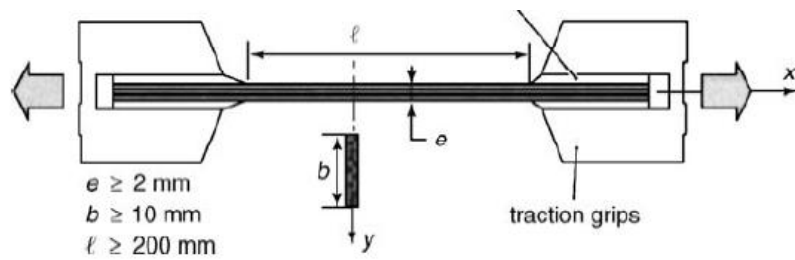


Figure 4- 6 : Eprouvette de traction normalisée

Durant l'essai de traction, nous avons mesuré la force de traction en fonction du déplacement longitudinale de l'échantillon jusqu'à sa rupture. La figure suivante montre des images de nos échantillons de composite après leurs ruptures durant l'essai de traction.

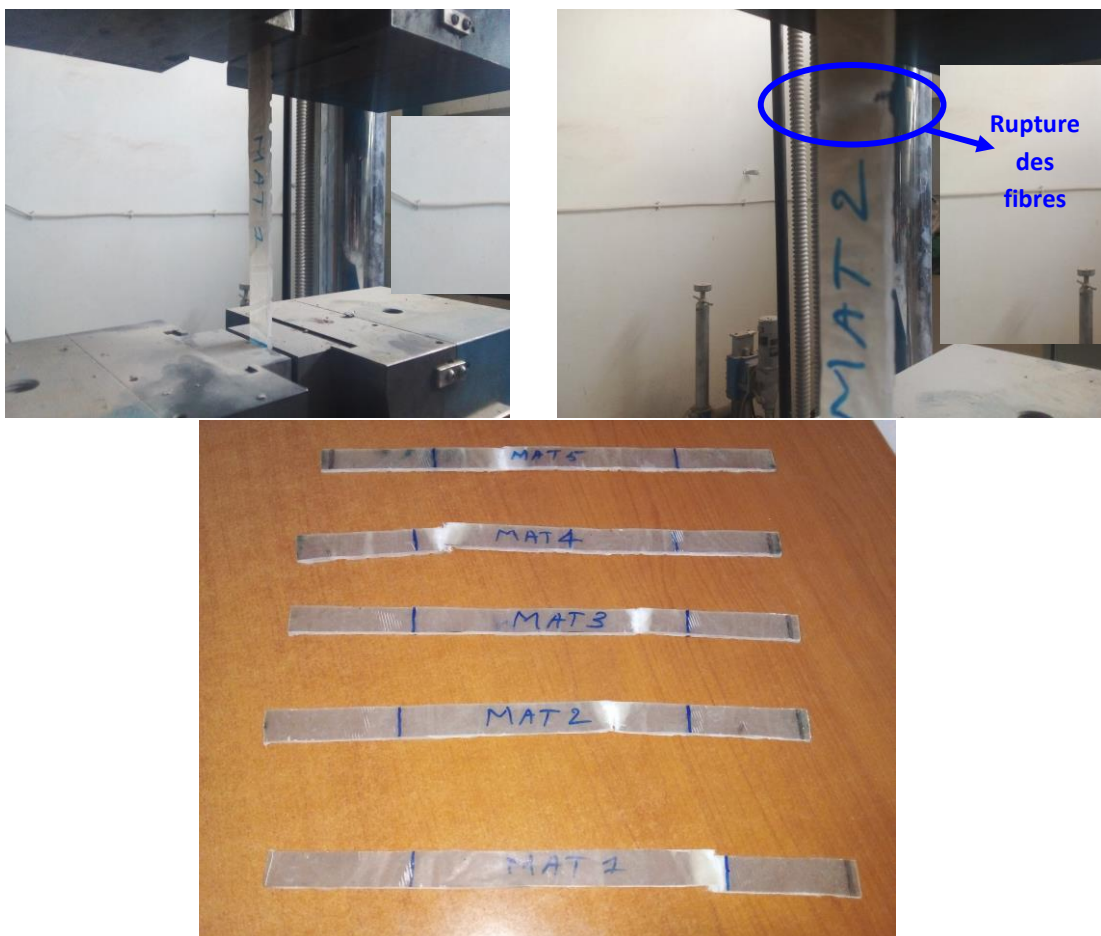


Figure 4- 7 : Eprouvettes rompues après test de traction

d) Courbes de traction

Nous montrons dans ce qui suit les courbes de traction contrainte en fonction du déformation pour les différentes éprouvettes de notre composite.

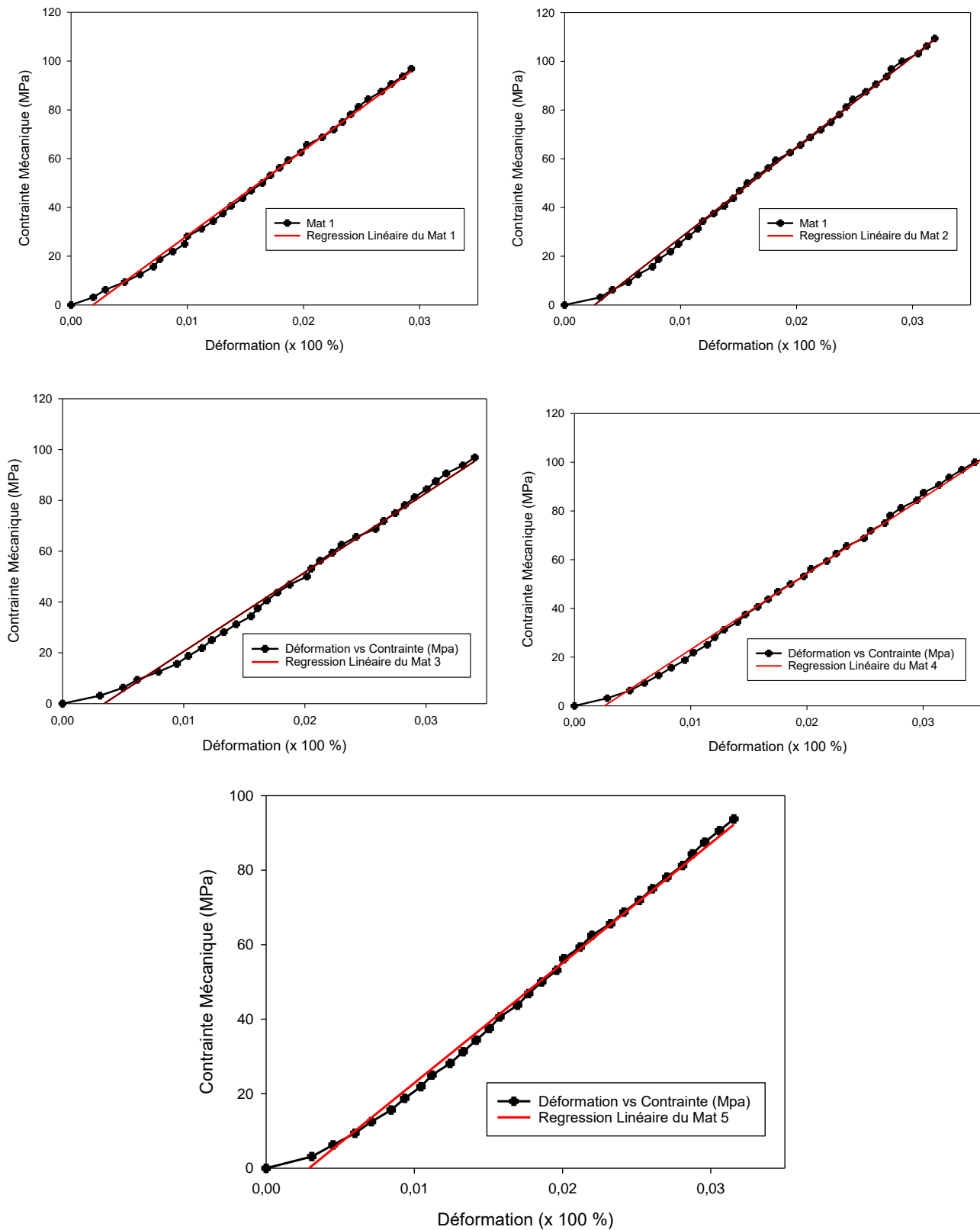


Figure 4- 8 : Courbes de traction pour chaque éprouvette testée

Nous remarquons dans les courbes de traction précédentes une absence de la partie plastique, donc notre matériau il est rigide (pas de souplesse). Egalement, nous remarquons au début de l'essai une augmentation progressive de la contrainte avant son décollage définitif, ceci est causé par le glissement des fibres à l'intérieur du matériau au début de l'essai.

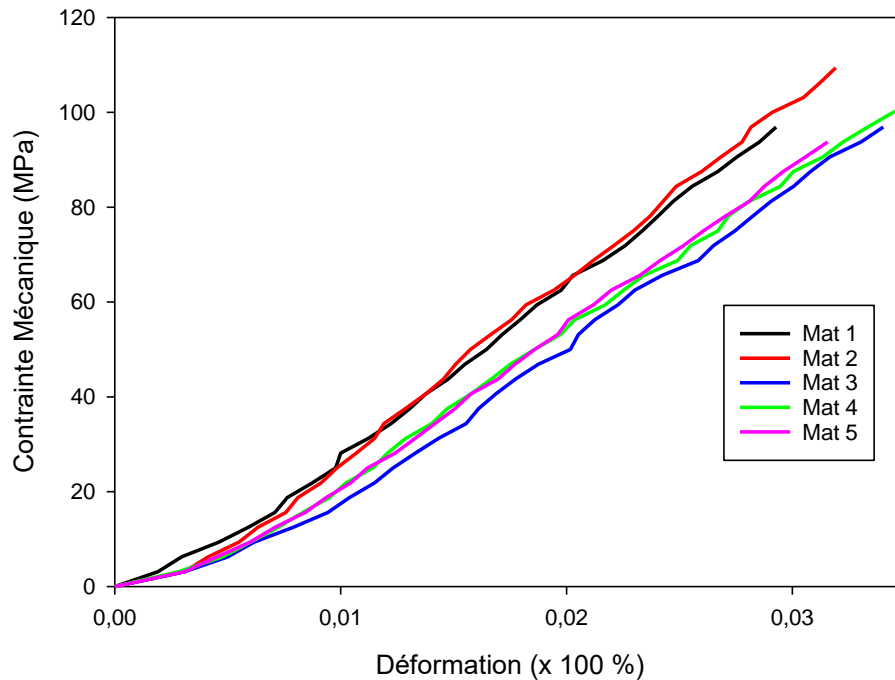


Figure 4- 9 : Courbes de traction pour toutes les 5 éprouvettes testées

Nous remarquons que les courbes ne sont pas totalement linéaires à cause de la distribution aléatoire des fibres du mat à l'intérieure du composites ce qui provoque leur chevauchement durant le l'étirement.

e) Calcul du module de Young moyen *Emoy*

Matériau	Module de Young (MPa)
Mat 1	3497,2294
Mat 2	3716,7360
Mat 3	3119,7966
Mat 4	3115,1506
Mat 5	3217,5364
Moyenne <i>Emoy</i>	3333,2898

Tableau 4- 1 : Module de Young (valeur moyenne mesurée expérimentalement)

f) Limite à la rupture maximale et déformation maximale à la rupture de nos éprouvettes

Matériau	Résistance à la traction R_r (MPa)	Déformation maximale (%)
Mat 1	96,875	2,93
Mat 2	109,375	3,19
Mat 3	96,875	3,40
Mat 4	106,25	3,78
Mat 5	93,75	3,16

Tableau 4- 2 : Limite à la rupture maximale et déformation maximale à la rupture de nos éprouvettes

Nous remarquons dans le tableau ci-dessus que la limite à la rupture pour nos éprouvettes est d'environ 100 MPa avec une déformation moyenne maximale 3,3 %, cette déformation est trop faible car notre matériau est rigide.

g) Comparaison entre le module de Young mesuré expérimentalement et celui calculé théoriquement

Pour le calcul de notre module de Young, nous avons considéré que la section est constante, alors que réellement la section de notre échantillon présente quelques défauts et elle n'est pas totalement constante le long de la longueur de l'échantillon (voir la figure ci-dessous).

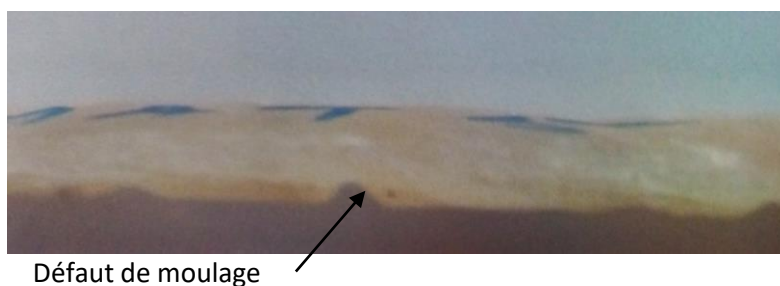


Figure 4- 10 : Défaut de moulage rencontré au niveau de l'échantillon de traction

Ceci nous a conduit à obtenir un module de Young réel plus faible que celui calculé théoriquement. En effet, à cause des défauts d'un mauvais moulage, la section baisse dans quelques endroits et par conséquent nous avons obtenu une rupture prématurée de l'échantillon.

5. Rigidité en flexion

a) Calcul de la rigidité en traction de notre matériau composite en utilisant le module de Young calculé théoriquement :

$$k_{tr} = \frac{E_{composite} \cdot A}{L}$$

$$k_{tr} = \frac{9318,14 \cdot 20,4}{200} = 3727,256 \frac{N}{mm}$$

b) Calcul de la rigidité en flexion de notre matériau composite en utilisant le module de Young calculé théoriquement :

$$k_{fl} = 48 \cdot \frac{E_{composite} \cdot I}{L^3}$$

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I_z = \frac{20,4^3}{12} = 106,66 mm^4$$

$$k_{fl} = \frac{48 \cdot 9318,41 \cdot 106,66}{200^3}$$

$$k_{fl} = 5,96 N/mm$$

On remarque que ce matériau composite est plus rigide en traction que en flexion.

c) Calcul de la rigidité en traction de notre matériau composite en utilisant le module de Young mesuré expérimentalement :

$$k_{tr} = \frac{E_{composite} \cdot A}{L}$$

$$k_{tr} = \frac{3333 \cdot 20,4}{200} = 1333,2 \frac{N}{mm}$$

d) Calcul de la rigidité en flexion de notre matériau composite en utilisant le module de Young mesuré expérimentalement :

$$k_{fl} = 48 \cdot \frac{E_{composite} \cdot I}{L^3}$$

$$k_{fl} = \frac{48 \cdot 3333 \cdot 106,66}{200^3}$$

$$k_{fl} = 2,13 \text{ N/mm}$$

On remarque que ce matériau composite est plus rigide en traction que en flexion.

Malheureusement, la rigidité en traction et en flexion calculée à l'aide du module de Young mesuré expérimentalement est inférieure à celle calculée théoriquement et ceci est dû par le fait que notre module de Young mesuré expérimentalement, $E_{exp} = 3333 \text{ MPa}$ est inférieur à celui calculé théoriquement $E_{theor} = 9318 \text{ MPa}$.

6. Mesure des températures de la transition vitreuse TTV

DSC (Differential Scanning Calorimetry) du polymère PET :

L'analyse DSC (Differential Scanning Calorimetry) du polymère PET pur (sans additifs) révèle des propriétés thermiques clés, notamment la transition vitreuse, température de cristallisation et la température de fusion.

La courbe DSC du PET pur (Figure 4-10) présente un profil thermique caractéristique des polymères semi-cristallins. A $T = 82\text{ }^{\circ}\text{C}$, on observe un léger changement de pente au début de la courbe indique le passage du PET de l'état caoutchouteux à l'état vitreux. Cela correspond à la transition vitreuse (T_g) du PET. La température de cristallisation du PET peut être observée sous forme d'un pic exothermique vers $151\text{ }^{\circ}\text{C}$, suivi d'un pic endothermique de fusion à environ $230\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

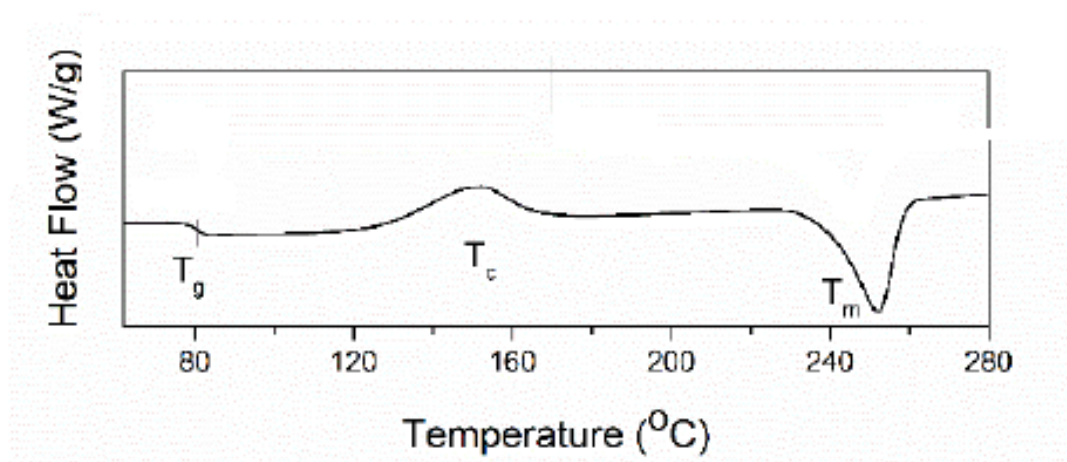


Figure 4- 11 : DSC du polymère PET (Polyéthylène Téréphtalate) pur (sans additifs)

L'échantillon utilisé dans notre travail, est constitués de mélanges de polyéthylène téréphtalate (PET) et des additifs. Le thermogramme DSC du PET modifié par des additifs montre un comportement thermique caractéristique d'un matériau fortement cristallin. On remarque aucune transition vitreuse nette (T_g) n'est observée, ce qui peut être attribué à une cristallinité élevée. L'absence de transition vitreuse (T_g) visible dans la zone $70\text{-}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ suggère que le matériau est majoritairement cristallin, ce qui masque ou atténue cette transition typique des phases amorphes.

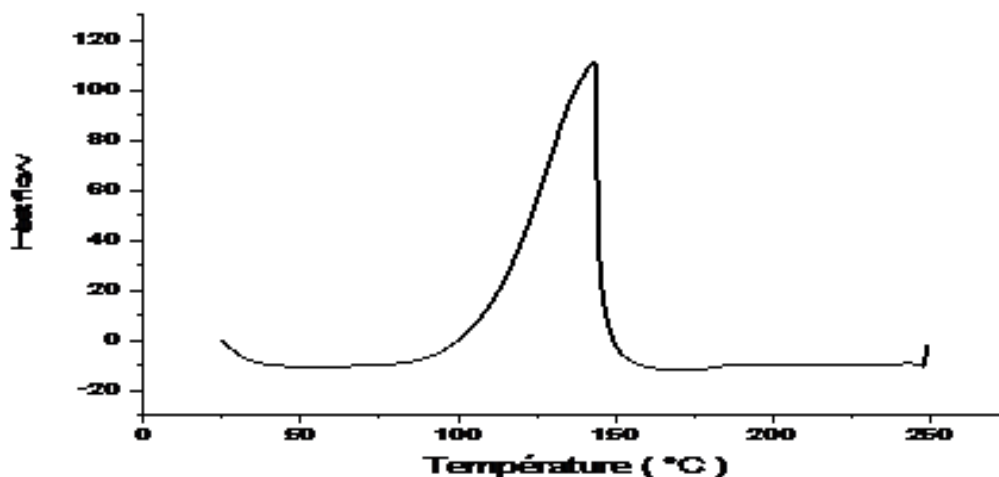


Figure 4- 12 : DSC du polymère (PET (Polyéthylène Téréphtalate) + additifs)

On observe un pic exothermique intense centré autour de 145 °C, correspondant à la température de cristallisation (T_c) des domaines cristallins du PET. Cette cristallinité accrue est probablement due à l'effet des additifs utilisés, qui jouent un rôle de nucléants et favorisent l'organisation des chaînes polymères. En s'approchant de 248 °C, une endothermie apparaît, correspondant au pic de fusion (T_f) du PET. Cette température est typiquement associée à la fusion des domaines cristallins bien ordonnés du polymère. En résumé, le profil DSC obtenu témoigne d'un PET modifié présentant une forte cristallinité, induite par les additifs incorporés, avec une absence de transitions amorphes détectables. La figure ci-dessous, représente le diagramme DSC du composite à base de PET renforcé par des fibres de verre.

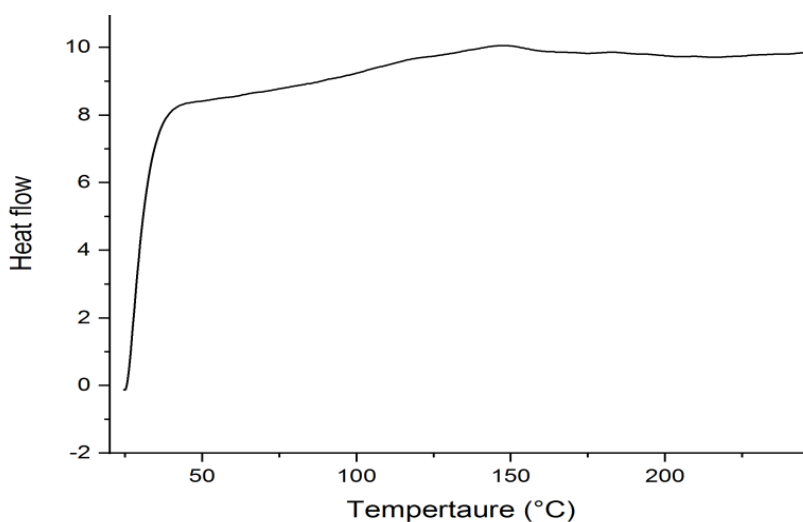


Figure 4- 13 : DSC du polymère PET mélangé avec les fibres en verre

L'intégration des fibres de verre modifie le comportement thermique global du matériau, traduisant une réduction de la phase mobile amorphe, ce qui explique l'atténuation de la Tg.

On remarque, l'apparition d'une bosse exothermique de recristallisation (Tc) moins marqué dans la gamme 100–150 °C. Cela peut être associé à la façon dont les fibres de verre sont intégrées dans la matrice polymère.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Afin d'atteindre l'objectif souhaité qui est la construction d'un bateau, on doit suivre le processus déterminé à travers les étapes précisés dans notre projet PFE STARTUP en respectant les conseils fournis par nos encadreurs spécialisés dans la construction mécanique et la préparation chimique des matériaux composites constitués de la résine de polyester et de la fibre de verre. Cette fibre est destinée à l'industrie maritime. Durant ce travail, nous avons fabriqué un moule pour élaborer notre matériau composite destiné par la suite à la construction des coques des bateaux (petits embarcations), nous avons appris durant ce projet non plus la méthode de fabrication des matériaux composites mais également les tests mécaniques et chimiques que nous avons effectué pour identifier les propriétés mécaniques et chimiques de notre matériau composite.

Bibliographie

- [1] W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- [2] Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press.
- [3] Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press.
- [4] Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. Wiley.
- [5] Jones, R. M. (1998). *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press.
- [6] Chawla, K. K. (2012). *Metal Matrix Composites*. Springer.
- [7] Naslain, R. (2004). "Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview." *Composites Science and Technology*.
- [8] Gibson, R. F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC Press.
- [9] Dr Belhenini Soufyane Génie Mécanique. Université Belhadj Bouchaib - Ain Témouchent.
Cours Matériaux Composites
- [10] Gay Daniel - Composite Materials_ Design and Applications-CRC Press (2014)
- [11] Bathias Claude et al., 2005.
- [12] Michel Dupeux 2008 Science des matériaux
- [13] Jean-Paul Bailon 2000 Des matériaux composites.

