

## I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1.Introduction

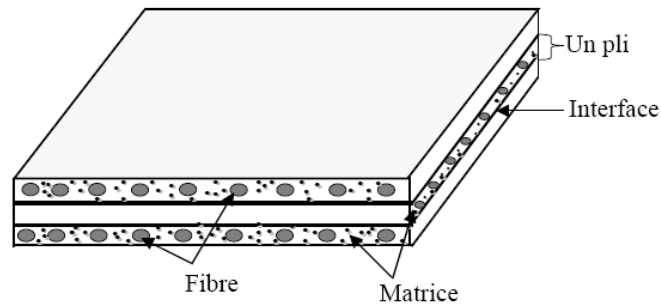
Une multitude de matériaux naturels, les uns rigides mais légers, comme les os, les autres souples mais résistants, comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur **structure composite**. Ces matériaux font partie de la famille des composites puisqu'ils comprennent des **fibres** noyées dans une **matrice** de nature différente [3]. A titre d'exemple; Le bois contient des fibres de cellulose souples et résistantes en traction, associées à une matrice de lignine qui les enveloppe et assure la continuité structurale. Sa structure fibreuse se manifeste par le fil du bois.

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la **cohésion** et **l'orientation** des fibres, elle permet également de **transmettre les sollicitations** auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très **hétérogènes** et **anisotropes**. Il faut différencier entre les charges et les renforts [4].

Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

### I.2. Caractéristiques générales

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



**Fig.1.1.**Microstructure d'un matériau composite UD.

Une exception importante est faite à la description précédente est le cas des polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériaux, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées [5].

Les propriétés des matériaux composites résultent [5], [6] :

- Des propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique,
- De leur interaction, etc.

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

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

La géométrie du renfort sera caractérisé par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. la concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. une distribution uniforme assurera une « Homogénéité » du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes de point de mesure. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite.

Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptées aux propriétés souhaitées.

### **I.3. Classification des matériaux composites**

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composant, suivant la nature des composant et suivant le type de matériau composite [7], [5], [8], [4].

#### **I.3.1 Classification suivant la forme des constituants**

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

##### **I.3.1.1. Composites à fibres**

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibre. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotrope à des matériaux isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur la nature des constituants, la proportion des constituants et l'orientation des fibres suivant le cahier des charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifié une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. Notre travail pratique sera essentiellement consacré à l'étude de ce type de matériau.

##### **I.3.1.2. Composites à particules**

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres ne possède pas de dimensions privilégiées.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charge pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Les cermets sont des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à température élevées.

Par exemple, les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à haute température.

Egalement, des particules d'élastomères peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragile, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

### **I.3.2 Classification suivant la nature des constituants**

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renfort sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autre faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvant citer :

#### **I.3.2.1 Composites à matrice organique (résine, charge), avec**

- Des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- Des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

#### **I.3.2.2. Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec**

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- Des fibres métalliques : bore,
- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

#### **I.3.2.3 Composites à matrice minérale (céramique), avec**

- Des fibres métalliques : bore,
- Des particules métalliques : cermets,
- Des particules minérales : nitrures, carbures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux à matrice métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice minérale.

### I.3.3. Classification suivant la structure des matériaux composites

#### I.3.3.1. Monocouches

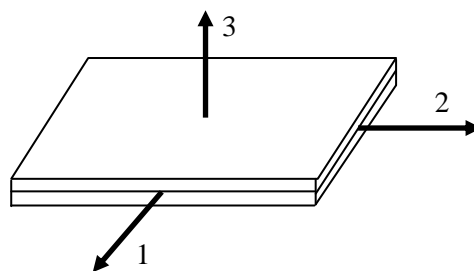
Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.



**Fig.1.2.**Matériau composite UD [2].

#### I.3.3.2. 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. La figure ci-après représente un matériau composite stratifié [17].



**Fig.1.3.** Un matériau composite stratifié [17].

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Un stratifié possédant l'empilement  $(0, +45, +90, -45)_2s$  est un stratifié avec quatre couches dans les directions  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $+45^\circ$ , l'orientation  $0^\circ$  coïncidant avec la direction une du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

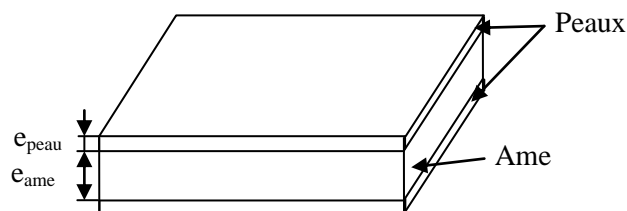
On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientée suivant la direction  $-\theta$ .
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches  $90^\circ$ .

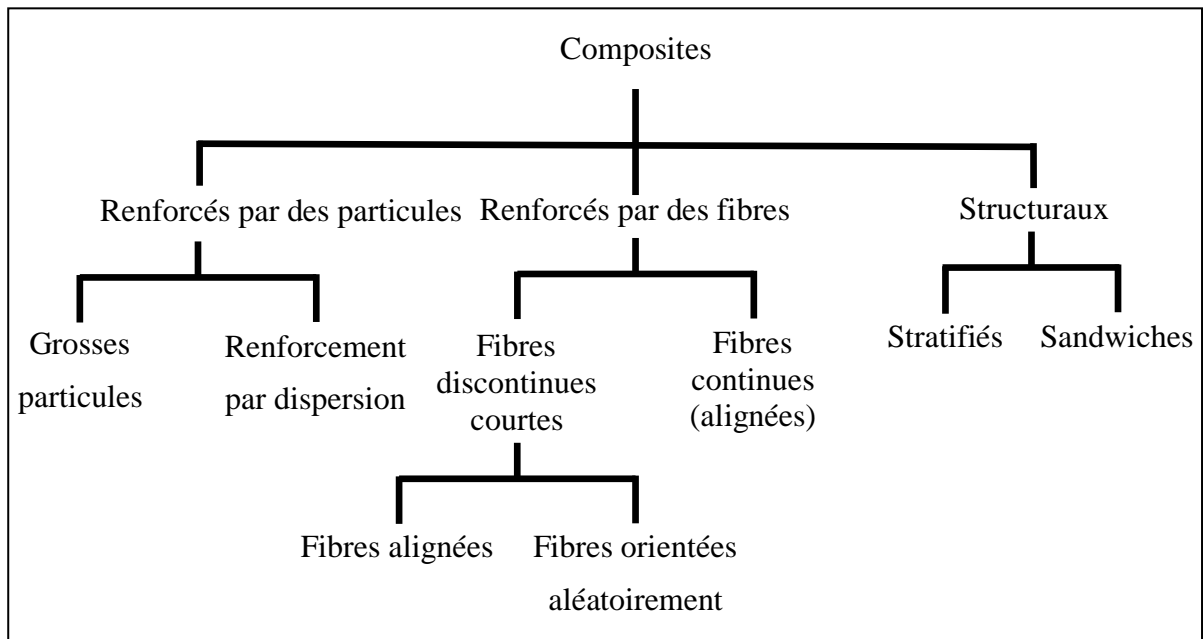
### I.3.3.3. Les sandwichs

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. La figure ci-après représente un matériau composite sandwichs [17].

$$10 \leq e_{\text{ame}}/e_{\text{peau}} \leq 100$$



**Fig.1.4.** Matériau composite sandwichs [17].



**Fig.1.5.** Schéma de différents types de matériaux composites [9]

### I.3.4. Classification suivant le type de matériau composite

En fonction des performances mécaniques souvent rapportées à la densité. On a ainsi introduit la notion de composite grande diffusion et de composites hautes performances [17].

#### I.3.4.1. Composites de grande diffusion

Ils représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30 %.

Les principaux constituants de base sont les résines polyesters (résines thermodurcissables) avec des fibres de verre. Les demandeurs les plus importants sont l'industrie des transports (Automobile, ferroviaire) et la construction électrique, destinés à des fabrications en grande série, souvent très automatisés.

#### I.3.4.2. Composites de haute performance

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique, leurs propriétés mécaniques, résistance et rigidité, sont largement supérieures à celles des métaux. Les constituants sont des résines époxydes renforcées par des fibres longues de verre, mais surtout de carbone ou d'aramide, le taux de renfort est supérieur à 50 %.

Contrairement aux composites GD. Les demandeurs, intéressés par leurs caractéristiques mécaniques et thermiques élevées, mais aussi par des séries de productions très faibles, sont l'industrie aéronautique et spatiale, l'automobile sportive, les chantiers navals.

## **I.4. Les éléments constitutants d'un matériau composite**

### **I.4.1.introduction**

Un composite est un matériau qui diffère des matériaux macroscopiquement homogènes habituels comme les métaux et les polymères. Il comprend des fibres continues ou coupées d'un matériau résistant (renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. Il existe plusieurs types d'arrangement de fibres. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [5], [6].

### **I.4.2.la matrice**

#### **I.4.2.1. Introduction**

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. C'est un matériau organique léger, facilement déformable, qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur (chocs thermiques ou mécaniques). La matrice doit avoir une masse volumique faible afin de conserver au composite des caractéristiques mécaniques élevées ([30], [34]).

Les résines polymères les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP).

Il existe d'autres catégories de résines : les résines thermostables et les polymères thermoplastiques qui peuvent résister à des sollicitations thermiques continues de 200°C et même plus. Toutefois l'usage de ces résines reste spécifique ce qui limite leur fabrication.

#### **I.4.2.2. Les résines thermodurcissables (TD)**

Ce sont des polymères, qui après traitement thermique se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont la particularité de n'être mises en forme qu'une seule fois (processus irréversible). Ces résines sont exceptionnellement utilisées avec renforts du fait de leur fragilité.

Aussi leurs caractéristiques thermomécaniques élevées font qu'elles sont les plus employées actuellement. Les principales résines thermodurcissables utilisées sont [5] : les polyesters insaturés (polyester condensé, vinylesters, etc....), les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, etc....) et les résines époxydes.



### I.4.2.2.1. Les résines polyester insaturé

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur.

Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante. La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique ([33] [4]).

Il existe différents types de résines [4] [10]:

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Suivant le module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes [5] :

- Masse volumique .....1200 Kg/m<sup>3</sup>
- Module d'élasticité en traction..... 2,8 à 3,5 GPa
- Module d'élasticité en flexion..... 3 à 4,5 GPa
- Contrainte à la rupture en traction..... 50 à 80 MPa
- Contrainte à la rupture en flexion..... 90 à 130 MPa
- Allongement à la rupture en traction..... (2 à 5) %
- Allongement à la rupture en flexion ..... (7 à 9) %
- Résistance en compression.....90 à 200 MPa
- Résistance au cisaillement .....10 à 20 MPa

**Tableau.1.1.** Les avantages et les inconvénients des résines polyesters :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé ;</li> <li>• Une bonne stabilité dimensionnelle ;</li> <li>• Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus ;</li> <li>• La facilité de mise en œuvre ;</li> <li>• Une bonne tenue chimique ;</li> <li>• Un faible coût de production ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une tenue médiocre en température : inférieur à 120°C en service continu ;</li> <li>• Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs ;</li> <li>• Un retrait important de l'ordre de 8 à 10 % ;</li> <li>• Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résine polyester d'une couche de « gel-coat » de manière à les rendre étanches ;</li> <li>• Une inflammabilité ;</li> </ul>

#### I.4.2.2.2.les résines de condensations

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques [5].

1. Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

- Masse volumique .....1200 Kg/m<sup>3</sup>
- Module d'élasticité en flexion.....3 GPa
- Contrainte à la rupture en traction..... 40 MPa
- Allongement à la rupture en traction..... 2,5 %
- Contrainte à la rupture en flexion..... 90 MPa
- Résistance en compression..... 250 MPa

**Tableau.1.2.** Les avantages et les inconvénients des résines phénoliques :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une excellente stabilité dimensionnelle ;</li> <li>• Une bonne tenue à la chaleur et au fluage ;</li> <li>• Une bonne résistance aux agents chimiques ;</li> <li>• Un faible retrait ;</li> <li>• De bonnes caractéristiques mécaniques ;</li> <li>• Un faible cout.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une mise en œuvre sous pression, donc à faible cadences ;</li> <li>• Des couleurs foncées des résines ;</li> <li>• Un non adaptation à des utilisations alimentaires.</li> </ul>

2. Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance chimique.
3. Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :
  - a. La possibilité d'utilisations alimentaires,
  - b. La possibilité de colorer les résines.
4. Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyester. Parmi leurs avantages :
  - a. Un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,
  - b. Une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

### I.4.2.2.3.les résines époxydes

Elles sont préférentiellement utilisées pour les composites hautes performances. Elles possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et un bon comportement chimique. Par contre elles sont sensibles à l'humidité ainsi qu'aux rayons UV et ont un coût encore très élevé [5].

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique.....1100 à 1500 Kg/m<sup>3</sup>
- Module d'élasticité en traction.....3 à 5 GPa
- Contrainte à la rupture en traction.....60 à 80 MPa
- Contrainte à la rupture en flexion.....100 à 150 MPa
- Allongement à la rupture..... (2 à 5) %
- Résistance au cisaillement..... 30 à 50 MPa

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100°C).

**Tableau.1.3.** Les avantages et les inconvénients des résines époxydes [5]:

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) ;</li> <li>• Une bonne tenue en température : 150 à 190°C en service continu ;</li> <li>• Une excellente résistance chimique ;</li> <li>• Un faible retrait au moulage (0,5 à 1%).</li> <li>• Une très bonne mouillabilité des renforts ;</li> <li>• Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un temps de polymérisation long ;</li> <li>• Un coût élevé ;</li> <li>• La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre ;</li> <li>• Une sensibilité à la fissuration.</li> </ul>

### I.4.2.3. Les résines thermoplastiques (TP)

Ce sont des résines qu'on appelle communément les plastiques, fréquemment utilisées sans renfort et qui possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement dans un intervalle de température spécifique au polymère étudié.

De plus, elles présentent une aptitude à l'état liquide à se mouler facilement par plasticité. Leur mise en œuvre se fait en général par injection à haute pression pour obtenir des objets moulés, ou par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes des profilés, etc.

Les principales résines thermoplastiques sont à base de polyamide, polyéthylène, polycarbonate et polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène (PP), etc.

**Tableau.1.4.** Caractéristiques des résines polypropylènes et polyamides [5]:

Caractéristiques physicomécaniques	Polypropylène	Polyamide
• Masse volumique (Kg /m <sup>3</sup> )	900	1140
• Contrainte à la rupture (MPa)	20 à 35	60 à 85
• Module d'élasticité (GPa)	1,1 à 1,4	1,2 à 2,5

### I.4.3.les charges et additifs

#### I.4.3.1.Introduction

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre.

#### I.4.3.2.Les charges

##### a) Charges renforçantes :

L'objectif de l'incorporation des charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométriques en :

- Charges sphériques ;
- Charges non sphériques.

##### b) Charges non renforçantes :

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

### c) Les additifs :

Les additifs sont ajoutés en faible quantité (quelques % et moins) et intervient comme :

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

#### **I.4.4. Les renforts (fibres et tissus)**

Le renfort a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [6].

Il se présente sous forme fibreuse ou particulaire selon les utilisations. La recherche de renforts performants s'oriente dans le cas des renforts fibreux, à quelques exceptions près, vers les verres, carbone, etc., du fait de leurs hautes performances mécaniques et de la relative maîtrise quand à leur élaboration.

D'autres fibres sont également commercialisées mais restent peu utilisées du fait de leur mise en œuvre plus complexe et de leur coût plus élevé : fibres multibrins de carbure de silicium, d'alumine et de silice,....

Les fibres de renforcements des matériaux composites proviennent de deux origines :

- les fibres minérales : fibre de verre, de carbone, céramiques,
- les fibres organiques.

Les qualités importantes recherchées lors de l'introduction de fibres dans une matrice sont en premier lieu un module de Young élevé, une résistance à la rupture élevée et tous deux reliés à la légèreté du matériau.

Les renforts constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 à 0,7. Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts [6], [7], [8] :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.) ;
- Sous forme de tissu surfacique (tissus simples, mats, etc.) ;

- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

**a) La forme linéique :**

Une fibre (diamètre environ de 10  $\mu\text{m}$ ) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de masse linéique est le tex (1 tex = 1 g/km). Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère.

**b) Les formes surfaciques :**

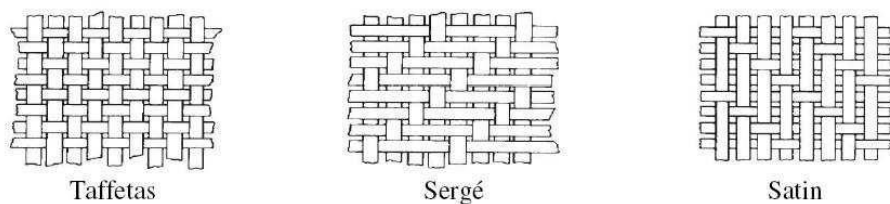
Des ensembles linéaires décrits précédemment on peut réaliser les formes surfaciques suivantes :

- Les mats :

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle, et maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

- Les tissus et ruban :

Ensemble de fils, stratifils ou mèches réalisé sur un métier à tisser, composé d'une chaîne et d'une trame.



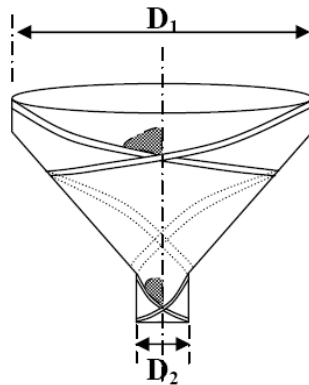
**Fig.1.6.** Les différentes formes de présentation de la fibre.

**c) Les formes multidirectionnelles :**

- Tresses et préformes :

Tissage cylindrique ou conique avec des entrecroisements réguliers des fils qui a la particularité d'être modulable en diamètre. Les fils s'entrecroisent en hélice.

Le diamètre de la tresse est lié au pas de l'hélice, par conséquent à l'angle que font les fils entre eux. Ce tissage nous permet des fibres de révolution très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe.

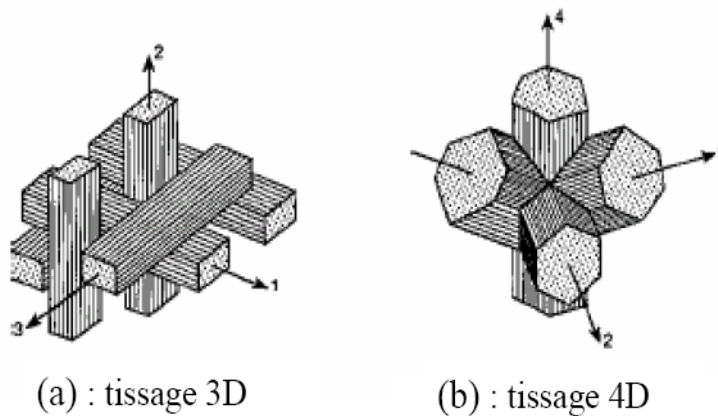


**Fig.1.7.**Tissage cylindro-conique [8].

- Tissus multidirectionnels :

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple, il est utilisé par exemple pour la réalisation de tuyère.

Des tissages 3D et 4D sont montrés respectivement par les figures 1.10a et 1.10b.



(a) : tissage 3D

(b) : tissage 4D

**Fig.1.8.**Tissu multidirectionnels [8].



**Tableau.1.5.** Caractéristiques moyennes des fibres et renforts :

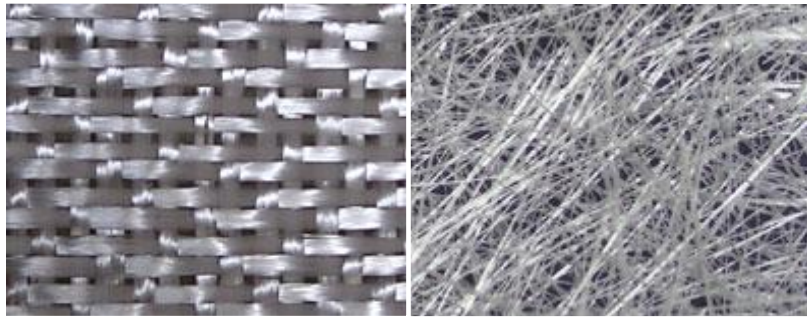
Type de renfort	Verre E	Verre R	Carbone HM	Carbone HR	Kevlar 49	Polyéthylène
<b>Diamètre du filament</b> ( $\mu\text{m}$ ) « d »	16	10	6.5	7	12	-
<b>Masse volumique</b> ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) « $M_V$ »	2600	2500	1800	1750	1450	960
<b>Module d'élasticité longitudinal (MPa)</b> « E »	74000	86000	390000	230000	130000	100000
<b>Module de cisaillement (MPa)</b> « G »	30000	-	20000	50000	120000	-
<b>Coefficient de poisson</b>	0.25	0.2	0.35	0.3	0.4	-
<b>Contrainte de rupture en traction (MPa)</b> « K »	2500	3200	2500	3200	2900	3000
<b>Allongement à la rupture (%)</b> « A »	3.5	4	0.6	1.3	2.3	-

#### I.4.4.1. Les fibres de verres

Les fibres les plus employées sont les fibres de verre. Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres de verre [4]:

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



**Fig.1.9.**Fibre de verre tissé. **Fig.1.10.**Fibre de verre mat.

#### **I.4.4.2. Les fibres de carbone**

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- 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.



**Fig.1.11.** Fibre de carbone.

#### **I.4.4.3. Les fibres d'aramides**

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 :

- Les fibres de bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles [4] ;
- Les fibres de haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

#### **I.4.5. Interface fibre-matrice**

Les propriétés d'un matériau composite résultent des propriétés de ses constituants. Les bonnes qualités des constituants ne suffisent pas pour obtenir un composite, cependant une bonne interface qui assure la compatibilité renfort matrice est indispensable.

En effet la résine doit transmettre régulièrement et presque intégralement aux fibres les efforts supportés par le matériau, ce qui nécessite une bonne mouillabilité de la fibre dans la résine.

La mouillabilité caractérise la relation physique d'un liquide en contact avec un solide, elle dépend d'une adhésion fibre résine.

Il y a deux types principaux d'adhésion :

- L'adhésion physico-chimique : qui est un assemblage par liaisons intermoléculaires entre des éléments de la résine et de la fibre telle que cette adhésion peut être expliquée par la diffusion mutuelle des molécules des plans superficiels de la fibre et de la résine, ou bien par la création des liaisons de type électrostatique par polarité des groupements négatifs et positifs de part et d'autre des constituants.
- L'adhésion mécanique : elle est définie par un accrochage de la résine dans les aspérités existant, ou créées spécialement à la surface de la fibre. Dans le cas d'un mauvais mouillage de la fibre, la résine n'imprègne pas toutes les aspérités et crée à certains endroits des défauts par rétention d'air après sa polymérisation.

### **I.5.Procédés de mise en œuvre**

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit final.

De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépend surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit, et l'importance des séries [17] [4].

#### **I.5.1. Technologies manuelles de transformation**

Les procédés manuels sont utilisés pour la fabrication de pièces de grandes dimensions destinées principalement aux industries :

- De l'aéronautique (voilure, empennage, mobilier) ;
- Du ferroviaire (panneaux et aménagement de voitures)
- De la construction nautique (coques).

Les technologies manuelles de transformation des composites utilisent des moules ouverts ; ce sont principalement :

### I.5.1.1. Le moulage au contact

Le moulage au contact est utilisé pour les composites « grandes diffusions » ; le procédé consiste à déposer sur la forme à mouler une succession de couches ou plis composites. L'ensemble de ces plis forme un empilement dont la séquence est préalablement définie. La première couche a pour fonction de protéger la pièce à l'aide d'un « gel-coat ». Ensuite, les plis sont stratifiés par imprégnation des renforts (mats ou tissus) à l'aide d'une résine (polyester dans notre cas d'étude) accompagnée de son système catalytique.

Pour chaque pli, un compactage manuel au rouleau est nécessaire afin de chasser l'excédant d'air et garantir une bonne imprégnation des renforts.

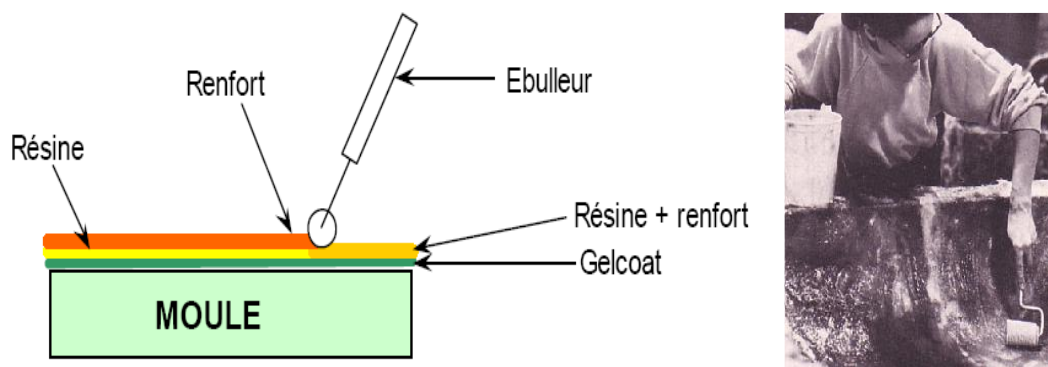


Fig.1.12. Schéma de procédé de moulage au contact.

### I.5.1.2. La projection simultanée

La projection simultanée, qui est une variante du moulage au contact, permet de déposer simultanément sur le moule la résine catalysée et les fibres de renforts coupées. Cette opération s'effectue au moyen d'un pistolet et peut être automatisée.

La matière projetée (résine et fibres) aboutit à un renforcement de type mat qui nécessite souvent un compactage au rouleau comme pour le moulage au contact.

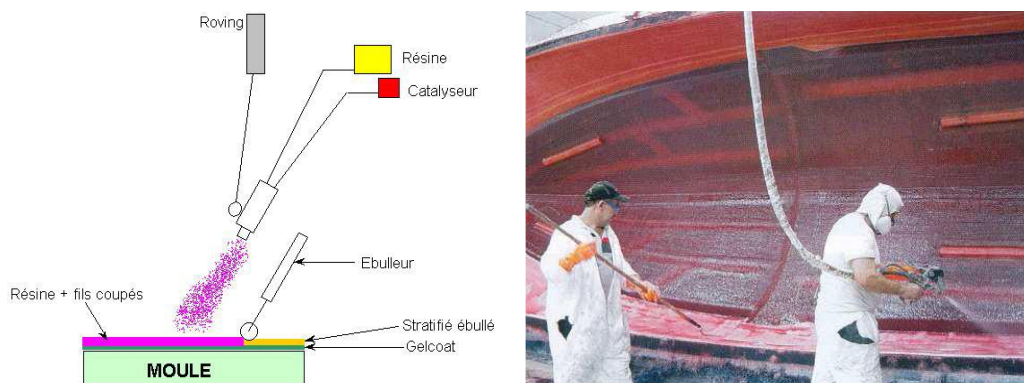


Fig.1.13. Moulage par projection simultanée.

Les principaux avantages de ces procédés en moule ouvert sont le faible coût de l'outillage, la facilité de mise en œuvre et la possibilité d'effectuer des structures de grandes dimensions. Les pièces obtenues sont de bonne qualité mais les opérateurs de stratification doivent être bien formés. Les futures performances mécaniques des pièces dépendent effectivement beaucoup de la qualité d'imprégnation et de compactage des renforts.

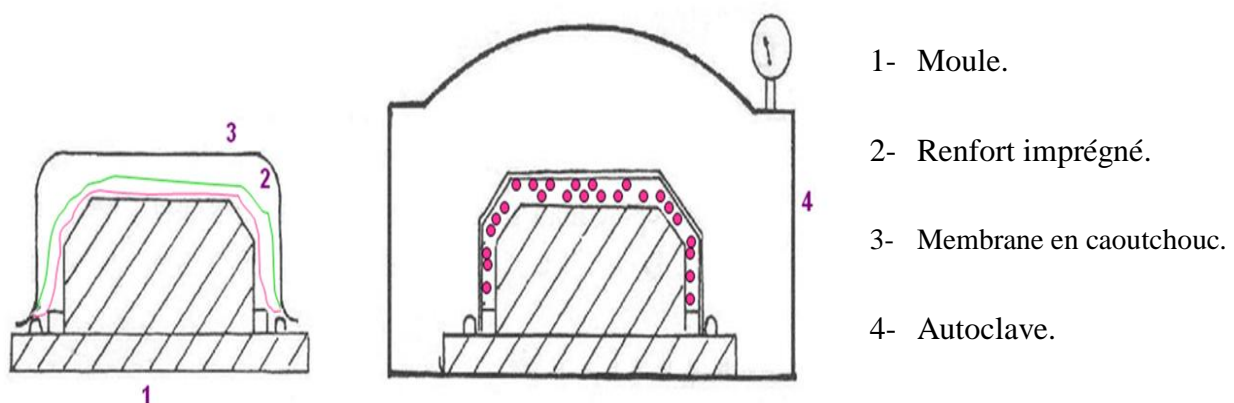
Les procédés de moulage au contact comportent cependant un certain nombre d'inconvénients comme des cadences faibles, l'obtention d'un taux de renforcement modeste, une répartition irrégulière des épaisseurs, une mauvaise imprégnation des fibres et l'inclusion de bulles d'air (mauvais compactage). Ces techniques de transformation en moule ouvert conduisent aussi à des émissions importantes de styrène dans les ateliers.

### I.5.1.3. Le drapage autoclave

Réservé aux composites « hautes performances », est devenu très industrialisé (en particulier en aéronautique) grâce au développement de machine à draper ; les étapes de la fabrication sont les suivantes :

- Déposer des tissus ou nappes pré-imprégnés préalablement découpés à la forme voulue, par plis successifs (phase de dragage) ;
- Couverture de l'ensemble par une membrane souple et étanche et mise sous vide pour éliminer les solvants parasites ;

L'ensemble est porté en autoclave à haute température ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) et haute pression (15 bars) pour la polymérisation (phase d'autoclavage).



**Fig.1.14.** Schéma du moulage par drapage autoclave.

### I.5.1.4. Moulage au sac sous vide

Les techniques de moulage sous vide permettent d'avoir un bon aspect des deux cotés de la pièce et un débullage soigné ; conditions non satisfaites par les procédés de moulage au contact ou en projection. Le stratifié est confectionné au contact ou en projection sur un moule, après un débullage succinct, on applique sur le stratifié une feuille simple auto-démoulante et on aspire le vide avec un appareil à dépression et enfin on laisse la pièce se polymériser à température ambiante.

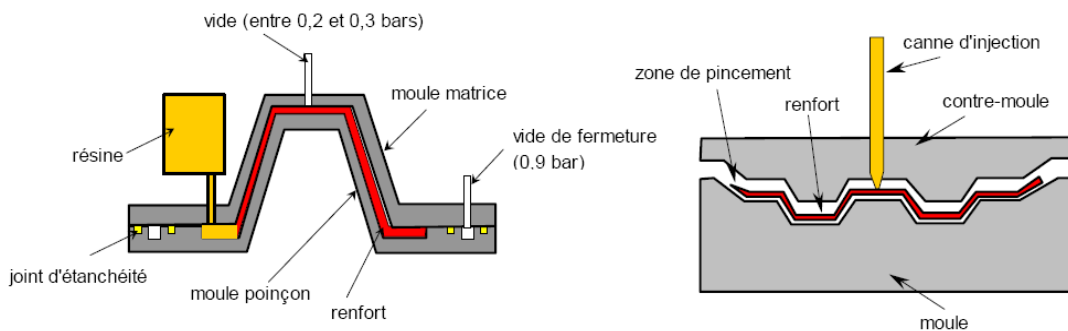


**Fig.1.15.** Moulage au sac sous vide.

## I.5.2. Procédés de transformation par moulage

### I.5.2.1. Le procédé RTM

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.



**Fig.1.16.** Schéma de procédé RTM.

### I.5.2.2. Moulage par compression de mat préimprégné « SMC »

Le mat préimprégné SMC (Sheet Molding Compound) est constitué d'une nappe de fils coupés ou continus, imprégnée par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat préimprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier usiné.

La pression (50 à 100 bars) entraîne le fluage de la matière et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court (en fonction de l'épaisseur) permet un démoulage rapide.

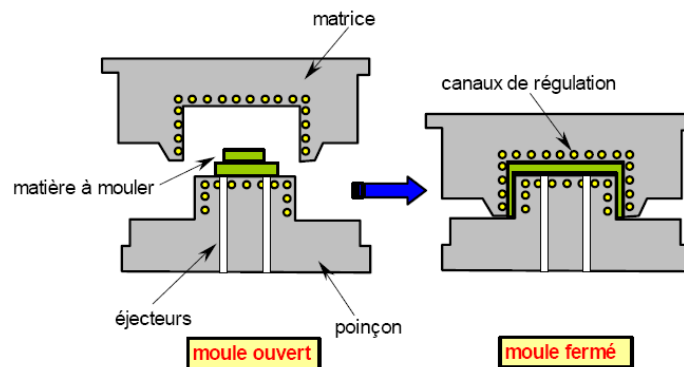


Fig.1.17. Schéma de procédé SMC.

### I.5.2.3. Le procédé d'estampage TRE

Le procédé d'estampage des semi-produits TRE constitue, pour la fabrication des composites TP, un compromis entre des caractéristiques mécaniques moyennes et des cadences élevées.

Le semi-produit TRE (GMT – Glass Mat Thermoplastiques) se présente sous forme de plaques ; il est ramolli à 200°C et pressé dans un ensemble poinçon matrice sous une pression de 200 bars. Le cycle de fabrication est d'une durée de l'ordre d'une minute. Le procédé permet de produire des pièces épaisses :

- Avec des cadences élevées, grâce à un temps de cycle de l'ordre de 5 minutes ;
- Sans qu'il soit nécessaire de respecter les conditions particulières de stockage des semi-produits ;
- Avec un gain pondéral de 30% sur les semi-produits SMC transformés.

Les principales applications de l'estampage TRE concernent le secteur automobile, poutres de pare-chocs, faces avant de caisses, dossiers de sièges, carters.

#### I.5.2.4. L'injection des thermoplastiques renforcés TPR

L'injection des thermoplastiques renforcés est utilisée pour la production des composites thermoplastiques, le produit obtenu a des propriétés mécaniques limitées.

Le procédé consiste à introduire des plastiques sous forme de granulés vers un moule métallique en deux parties :

- À haute température (entre 200 et 300°C),
- Sous haute pression (entre 300 et 1.000 bars).

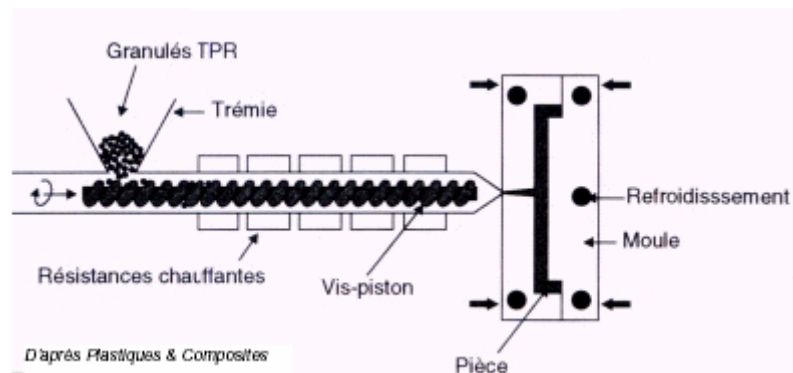


Fig.1.18. Le procédé TPR.

#### I.5.2.5. Le procédé d'injection par réaction

Les procédés d'injection par réaction (RIM) permettent la réalisation rapide d'objets de formes complexes. Le procédé permet de réaliser simultanément le matériau composite et le produit fini. Le procédé RIM originel utilise des résines polyuréthane (PU - thermodurcissable) ; il consiste à injecter dans un moule métallique les produits réactifs formant la base du polyuréthane (polyols, poly-isocyanates), l'expansion due à la réaction remplit alors l'empreinte. Le cycle de fabrication est d'une durée d'environ 2 minutes.

Les applications du RIM se situent essentiellement dans l'automobile pour la fabrication d'éléments de carrosserie (pare-chocs, bas de caisse, capotage de motos).

### I.5.3. Procédé de transformation en continu

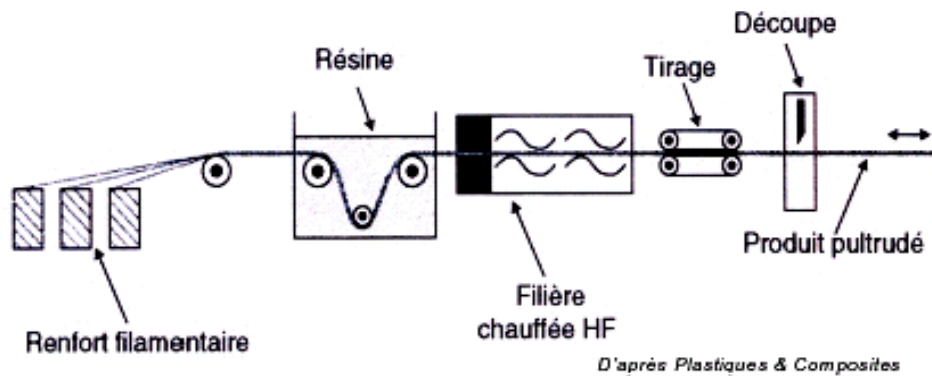
#### I.5.3.1. La pultrusion

Le procédé est destiné à la réalisation en continu de profilés de sections constantes. Des renforts continus, rovings divers, mats et tissus en bandes de largeurs appropriées, tirés par un banc de traction situé en fin de ligne de production, sont successivement prédisposés de façon précise, imprégnés de résine et mis à la forme désirée par passage à travers une filière chauffée dans laquelle s'effectue le durcissement de la résine.



Les principales applications des matériaux composites réalisés par la pultrusion concernent des profilés destinés à :

- La construction électrique : isolant électrique ;
- La construction civile et industrielle : plates-formes de ponts, signalisation ;
- Les sports et loisirs : cannes, clubs, perches.



**Fig.1.19.**Moulage par pultrusion.

### I.5.3.2. L'imprégnation en continu

Le procédé permet de produire simultanément et d'une manière continue le matériau composite et les produits finis sous formes de plaques ; le cycle de fabrication est de l'ordre de 6 à 12 mètres/minute. Les étapes de mise en œuvre du procédé sont les suivantes :

- Les renforts (mats de fibres de verre coupées) et la résine polyester sont mélangés par absorption et pression mécanique sur un rouleau transfert ;
- La polymérisation a lieu dans une étuve entre 60°C et 80°C.

Les principales applications concernent essentiellement la construction civile et industrielle avec des plaques ondulées, des bacs de couverture (toiture) industrielle, des couvertures d'étanchéité d'habitation et des chemins de câbles.

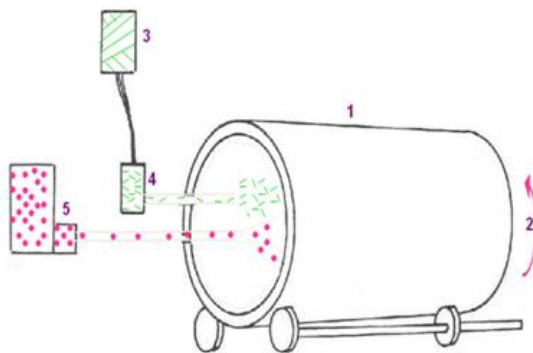
## I.5.4. Procédés de fabrication des formes de révolution

### I.5.4.1. La transformation par centrifugation

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. A l'intérieur d'un moule cylindrique en rotation à basse vitesse, on dépose des fils coupés à partir de roving (ou du mat), de la résine catalysée et éventuellement des charges granulaires. Puis, on augmente la vitesse de rotation du moule pour densifier et débuller la matière.

Après durcissement de la résine, éventuellement accélérée par un apport thermique, on peut extraire très facilement la pièce du moule. Leurs principales utilisations sont les suivantes :

- Production de tuyau (écoulement gravitaire et basses pression)
- Production de grandes viroles (moulage par rotation : centrifugation basse vitesse).



- 1- Mandrin en rotation.
- 2- Entraînement de la rotation.
- 3- Fibres de verre.
- 4- Dispositif de coupe et de projection des fibres de verre.
- 5- Résine catalysée.

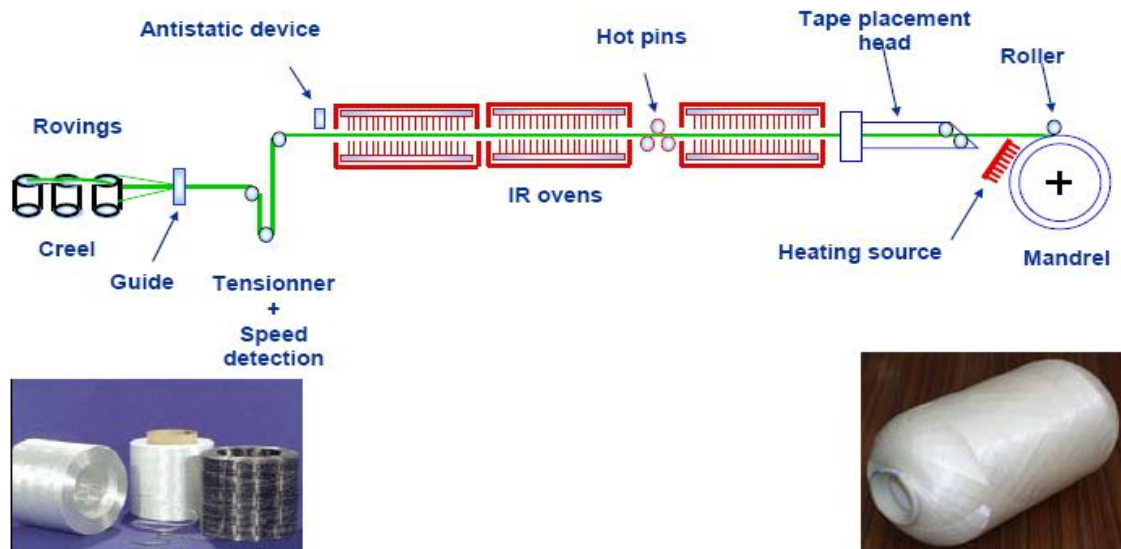
**Fig.1.20.**Moulage par centrifugation.

### I.5.4.2. L'enroulement filamentaire

Procédé de moulage limité aux formes de révolution. Initialement, destiné à la réalisation d'enveloppes de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques par enroulement progressif sur un mandrin, selon un angle déterminé de fils de verre imprégnés de résine.

Par la suite, le procédé a été étendu à des structures moins performantes en associant aux rovings bobinés d'autres types de renfort (fils coupés, mat, tissu) appliqués de façon adaptée. Les principales applications de ce procédé sont les suivantes :

- Toutes pièces de révolution à produire en série ;
- Pièces nécessitant une résistance élevée.



**Fig.1.21.** Procédé de moulage par enroulement filamentaire.

## I.6. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, et connaissent actuellement un essor important dans tous les domaines d'application, particulièrement dans la construction navale, vu leurs performances mécaniques très élevées. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent :

- Des propriétés intrinsèques des constituants de base ;
- Des distributions géométriques des constituants ;
- De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix des constituants de base ainsi que les techniques et le procédé de mise en œuvre ont une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau composite.