

Chapitre 5. LES COMPOSITES

1. Définition et classification :

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison d'au moins deux matériaux différents à l'échelle macroscopique. Le terme « **matériau composite** » désigne un matériau solide et hétérogène, formé de plusieurs composants distincts, dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants considérés ne possède séparément.

La réalisation d'un matériau composite nécessite donc l'association d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser. Pour cela, un agent de liaison, appelé interface, est nécessaire (Figure 1). Des charges et des additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, afin de modifier une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, la résistance au feu...).

Un matériau composite est un arrangement de fibres appelées charge (qui constituent le renfort) enrobées dans une matrice (qui constitue le liant) pour obtenir un compromis des propriétés de l'une et de l'autre.

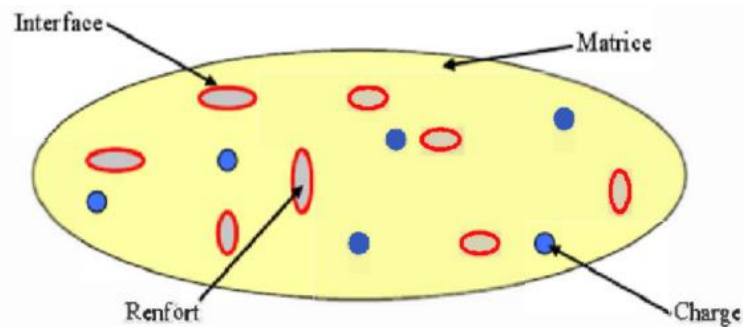


Figure.1: Schéma illustratif d'un matériau composite.

La classification des composites peut être effectuée selon diverses façons. Les composites peuvent être classés suivant:

- La nature des composants
- La forme des composants (nature des renforts)
- Le type de matériau composite.

1.1. Classification suivant la nature des composants:

Les matériaux composites peuvent également être classés par la nature de la matrice comme suit, (figure.2):

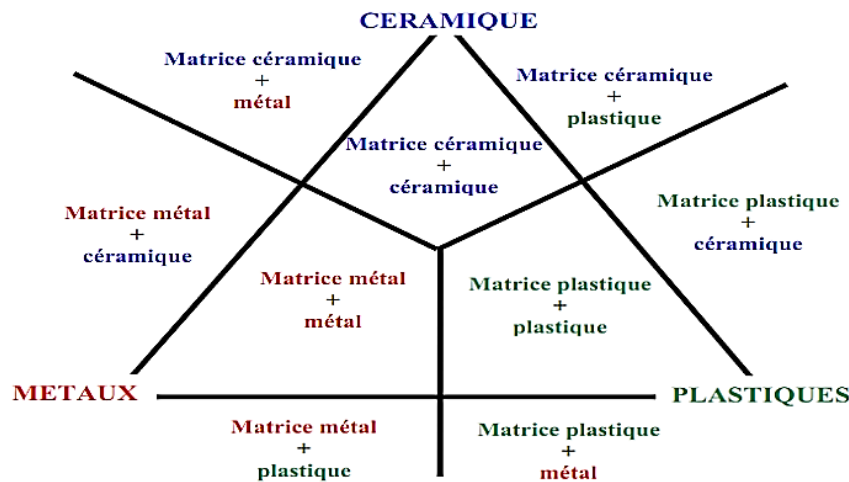


Figure 2. Différents mélanges de matrices possibles entrant dans la formation de matériaux composites.

- **Matrice organique (CMO)** : Constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- **Matrice métallique (CMM)** : pour quelques applications spécialisées ; fonderie des poudres métalliques.
- **Matrice céramique (CMC)** : réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique).

1.2. Classification suivant la forme des composants :

Une manière simple consiste à les classer en fonction de la forme des renforts, les composites peuvent être classés en :

- **Composites à fibres** : le matériau est dit composite à fibres continues (si le renfort se trouve sous forme de fibres longues), discontinues (si le renfort se trouve sous forme de fibres coupées, fibres courtes), tissus (si le renfort se trouve sous forme de drap ou mat).
La proportion des constituants et l'arrangement et l'orientation des fibres, sert à ajuster les propriétés des matériaux composites, de point de vue isotropie et anisotropie ainsi que de point de vue comportement mécanique et propriétés physiques.
- **Composite à particules** : lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. 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.
- **Composites structuraux** : des matériaux assemblés pour constituer des macro-matériaux composites, qui sont de deux types : ...
 - **Stratifiés** : Un stratifié se compose d'au moins deux couches de matériaux. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaques ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres orientées de

façon différente; le comportement mécanique macroscopique doit être conçu; ...

- **Sandwich:** panneaux utilisés pour des usages en flexion; généralement le comportement macroscopique est isotrope dans le

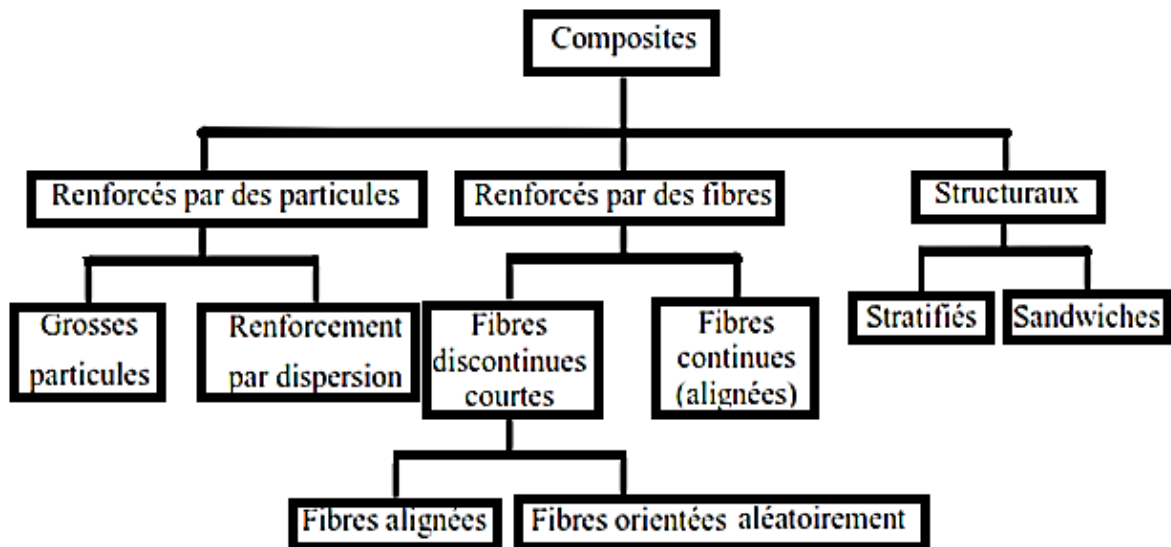


Figure. 3. Matériaux composites classées selon la forme des constituants.

2. La Matrice:

Elle assure plusieurs rôles, lie les fibres et procure une résistance du matériau dans le sens transverse du renfort, garantis une protection physico-chimique des fibres contre les agents nocifs de l'environnement, de plus elle conditionne directement la tenue thermique, et la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire. La matrice est constituée de résines mélangée, à une charge qui améliore ses caractéristiques, facilite aussi la mise en œuvre et diminue le coût de la production. Le mélange est considéré mécaniquement comme une phase homogène. On distingue différents types de matrices :

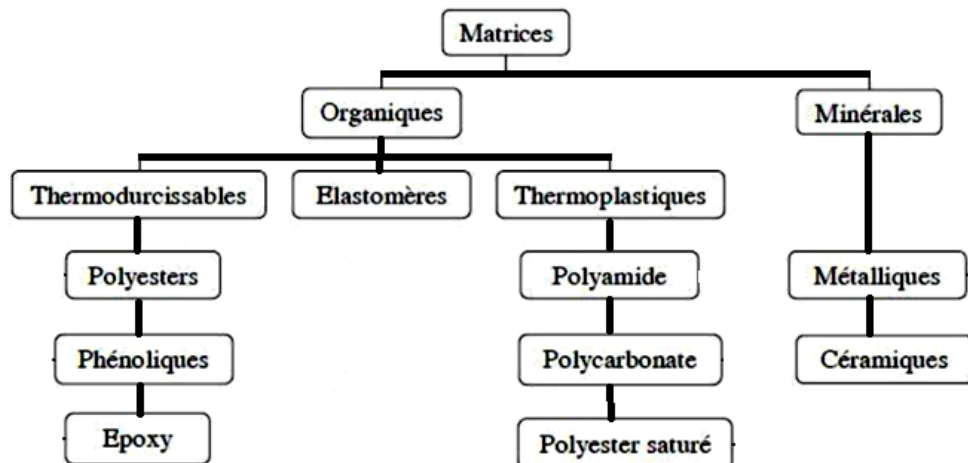


Figure. 4. Types de matrices.

2.1. Les matrices organiques :

Les matrices thermodurcissables : Les résines thermodurcissables présentent et possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à un état solide. Elles ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. On distingue donc trois types de matrices thermodurcissables : Les résines polyesters, Les résines de condensation et Les résines époxydes.

Tableau. 1. Caractéristiques des matrices thermodurcissables

Matrice TD	Epoxyde	Phénolique	Polyester	Polyester	Polycarbonate	Vinylester	Silicone
Masse volumique (Kg /m3)	1200	1300	1200	1200	1200	1150	1100
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	4500	3000	4000	2400	3300	2200	
Module de cisaillement (MPa)	1600	1100	1400	/	/	/	
Coefficient de Poisson	0.4	0.4	0.4	0.35	/	0.5	
Contrainte de rupture (Traction) MPa	130	70	80	60	75	35	
Allongement à rupture %	2	2.5	2.5	/	4	/	
Coefficient de dilatation thermique °C⁻¹	11*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	8*10 ⁻⁵	6*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁵	/	

Les matrices thermoplastiques : Les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux. Peuvent être divisées en deux classes selon leurs structures moléculaires : la structure semi-cristalline et la structure amorphe. Ces matrices sont caractérisées par la capacité d'être alternativement ramollies par chauffage au-dessus de la température de fusion ou de ramollissement et durcies par refroidissement. Ces résines possèdent des avantages sur les résines thermodurcissables telles qu'une ténacité améliorée, une déformation à rupture élevée, et une faible absorption d'humidité. De plus, elles ont une durée de stockage illimitée. On cite les exemples suivants :

- Polypropylène (PP).
- Polysulfure de phénylène (PPS)
- Polycarbonate polyamide (PA).
- Polyéther-sulfone (PES)
- polyéther-imide (PEI)
- Polyéther-éther-cétone (PEEK)

Tableau. 2. Caractéristiques des matrices thermoplastiques

Matrice Tp Caractéristiques	PP	PPS	PA	PES	PEI	PEEK
Masse volumiques (Kg /m3)	900	1300	1100	1350	1150	1300
Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	1200	4000	2000	3000	3300	4000
Coefficient de Poisson	0.4	/	0.35	/	/	/
Coefficient de dilation thermique (C-1)*105	9	5	8	6	6	5
Contrainte de ruptures en traction (Mpa)	30	65	70	85	105	90
Allongement à la rupture (%)	20 à 400	100	200	60	60	50

Résines	Caractéristiques
1. La résine polyimide (PA)	1. tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures;
2. Polytéraphthalate éthylénique et butylénique (PET, PBT)	2. bonne rigidité, bonne ténacité;
3. Polycarbonate (PC)	3. tenue au choc;
4. Polysulfure de phénylène (PPS)	4. résistance à l'hydrolyse;
5. Polyoxyméthylène (POM)	5. bonne tenue à la fatigue;
6. Polysulfurés (PSU et PPS)	6. bonne stabilité chimique et l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud;
7. Polypropylène (PP)	7. peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

Les résines thermostables : Les résines thermostables se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques, puisque dans ces résines nous retrouvons les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les résines

thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, nous citons les résines polyimides.

2.2. Les matrices minérales :

Les matrices minérales se caractérisent par une rupture de type fragile. Malgré une bonne tenue à la compression, ces matrices doivent être renforcées afin de pallier le faible comportement en traction ainsi que la ténacité

Les matrices métalliques : Les matériaux composites à matrice métalliques ont sensiblement évolué depuis leur apparition dans les années 1960. Leur prix relativement élevé imposait des applications essentiellement orientées vers l'aérospatiale. C'est seulement à partir des années 1980 avec l'apparition de renforts commercialement intéressants et de meilleures qualités que d'autres domaines d'application ont été envisagés. De nos jours, les CMM intéressent les concepteurs des industries automobiles, électronique et de loisir pour leur capacité à répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

Les matrices céramiques : Les matrices céramiques sont composées d'un ou plusieurs métaux combinés à un élément dont le courant est l'oxygène. Dans les céramiques on distingue :

- Les oxydes.
- Les carbures.
- Les nitrures.

3. Les renforts :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire de diverses origines (fibres organiques ou inorganiques). Comme illustré sur la figure. 5.

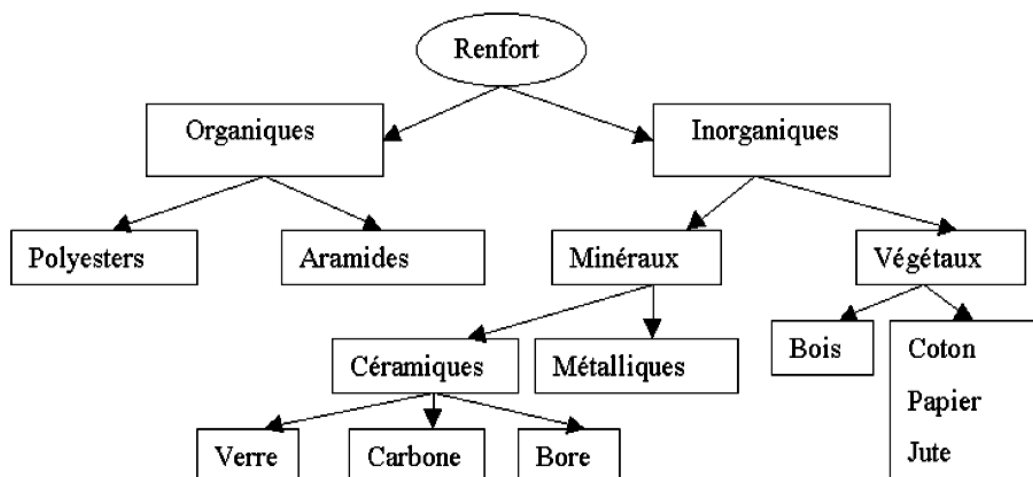


Figure. 5. Les principaux matériaux de renforts.

4. Propriétés des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites résultent:

- Des propriétés des constituants,
- De la distribution géométrique des constituants,
- De l'interaction des constituants.

Selon les types de matrice et de renfort utilisés, un matériau composite peut acquérir différentes propriétés. (Tableau. 3.)

Tableau. 3. propriétés des composites selon le type de matrice ou de renfort

Partie du matériau composite	Type de matériau utilisé	Propriétés recherchées dans le matériau composite
Matrice	Plastiques	Durabilité, légèreté, résilience, faible coût
Matrice	Métalliques	Ductilité, conductibilité thermique et électrique, rigidité
Matrice	Céramiques	Durabilité, résistance à la chaleur
Renfort	Fibres de verre	Rigidité, résistance à la corrosion
Renfort	Fibres aramides (Kevlar)	Faible masse volumique, résilience
Renfort	Fibres de carbone	Rigidité, faible masse volumique, conductibilité électrique

5. Fabrication des composites

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée **stratification**, conduisant à l'élaboration de stratifiés, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites.

5.1. Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. La qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée.

5.2. Moulage au contact :

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée « gel coat ». Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

- Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
- Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
- Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
- Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
- La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80°C).
- Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce: ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

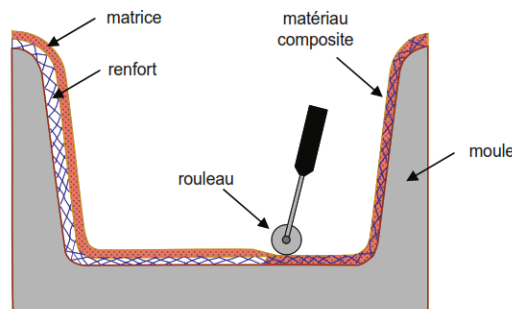


Figure. 6. Principe du moulage au contact.

5.2.1. Moulage par projection simultanée :

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques.

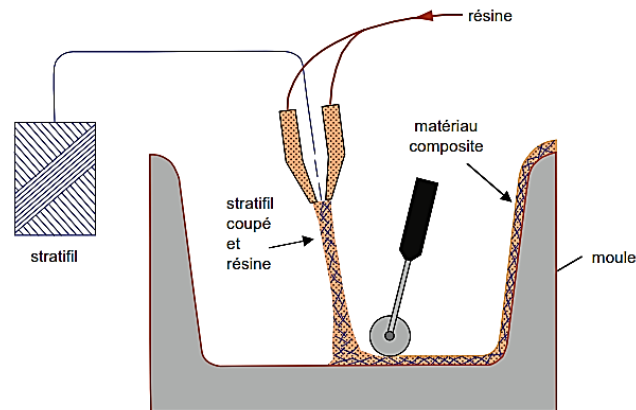


Figure. 7. Principe du moulage par projection simultanée.

5.2.2. Moulage sous vide contre- moule

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et dé bulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes.

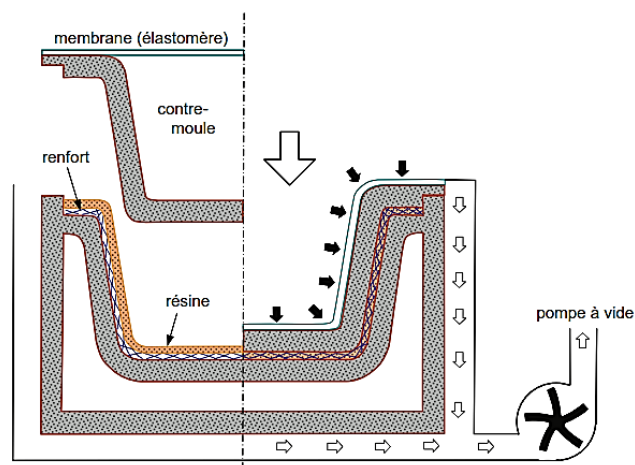


Figure. 8. Moulage sous vide.

5.3. Moulage par compression :

5.3.1. Moulage par injection de résine :

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

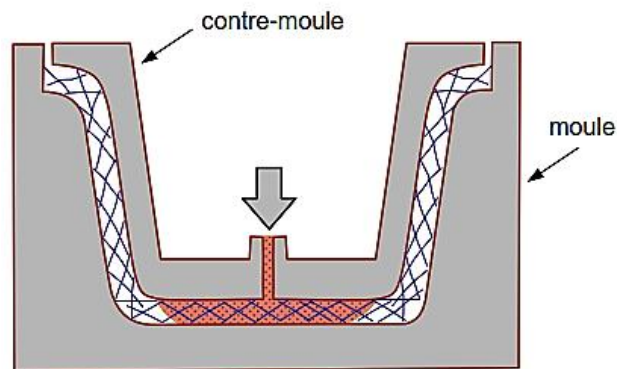


Figure. 9. Moulage par injection de résine.

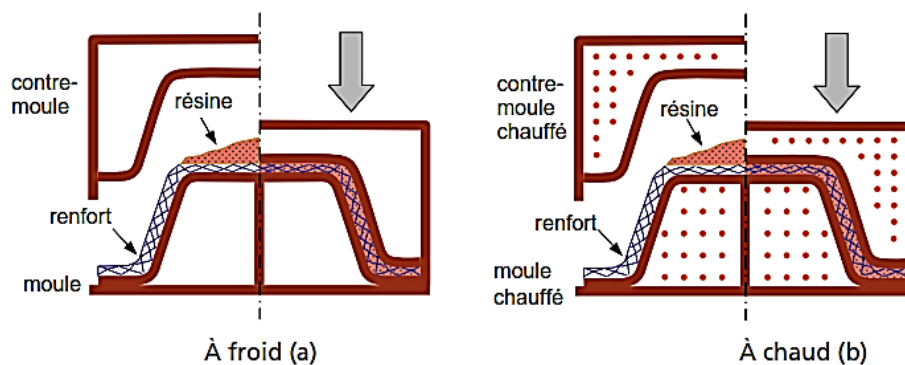


Figure. 10. Principe du moulage par compression.

5.3.2. Moulage par compression à froid :

Le moulage est effectué à basse pression ($< 5\text{bars}$) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70°C, en fonctionnement permanent. Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces/heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être

réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.

5.3.3. Moulage par compression à chaud :

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.

Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée. Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150°C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces/heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule.

5.3.4. Moulage par injection

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.). Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation. Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé « plastiques renforcés » que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries.

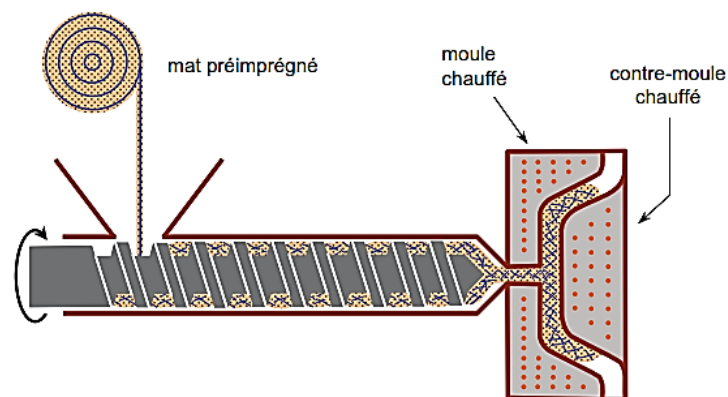


Figure. 11. Moulage par injection.

5.4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes (figure.12), panneaux, sandwiches, de panneaux ondulés pour toitures (figure.13), plaques nervurées, etc. Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

- Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).
- Une phase de mise en forme.
- Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150°C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).
- Une phase de refroidissement et découpage.
- Dans le cas de la fabrication de plaques planes, la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.
- Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation, par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel

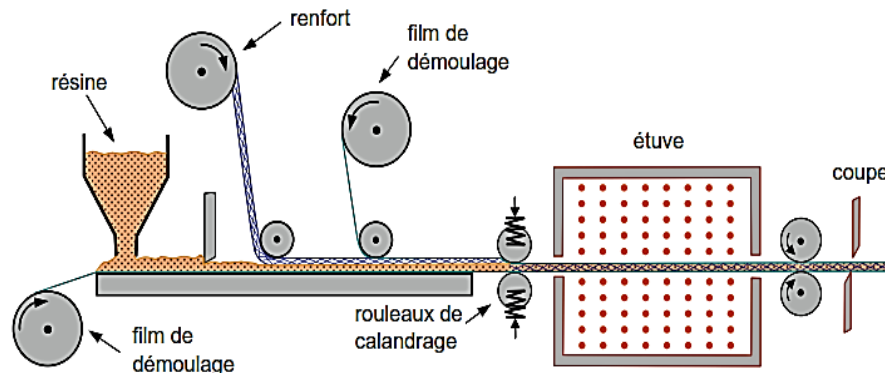


Figure. 12. Moulage en continu de plaques.

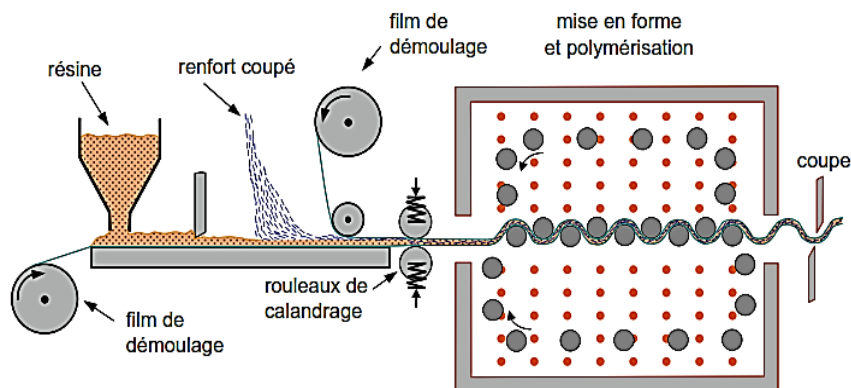


Figure. 13. Moulage en continu de panneaux ondulés.

5.5. Moulage par pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale. Dans cette technique, les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine.

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80% en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20m/h). Il nécessite un investissement important de matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.

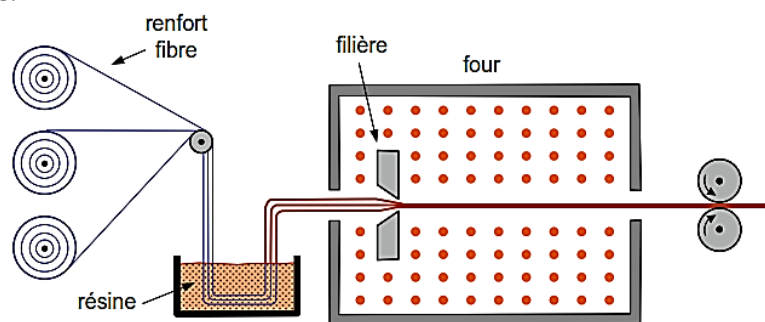


Figure. 14. Moulage par pultrusion.

5.6. Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé. Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à ~ 2000 trs/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

- Le renfort : fibres coupées ou stratifil coupé ;
- La résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve. Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation. Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.

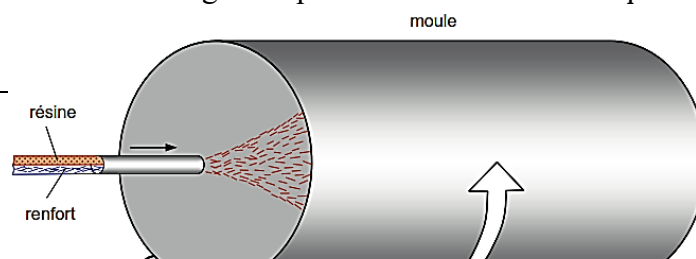


Figure. 15. Moulage par centrifugation.

5.7. Moulage par enroulement filamentaire

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80% en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important. Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire.

5.7.1. Enroulement circonférentiel

Le bobinage est effectué à 90° par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin. Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.

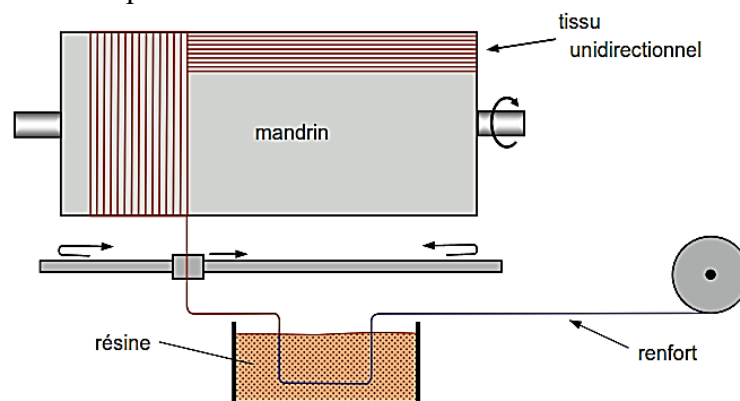


Figure. 16. Principe de l'enroulement circonférentiel.

5.7.2. Enroulement hélicoïdal

1. **Enroulement discontinu :** La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fil par rapport à la rotation du mandrin. La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la

surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

2. Enroulement continu : L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

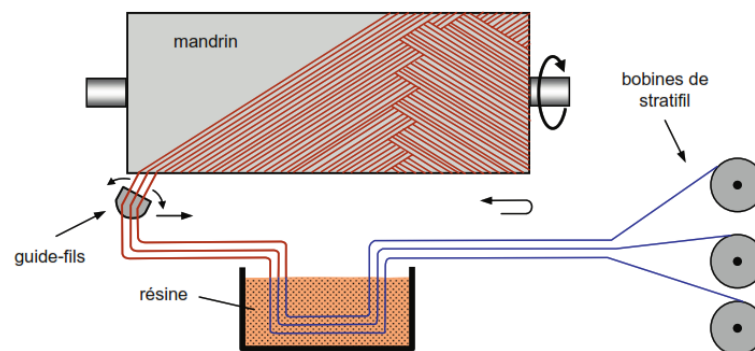


Figure. 17. Principe de l'enroulement hélicoïdal.

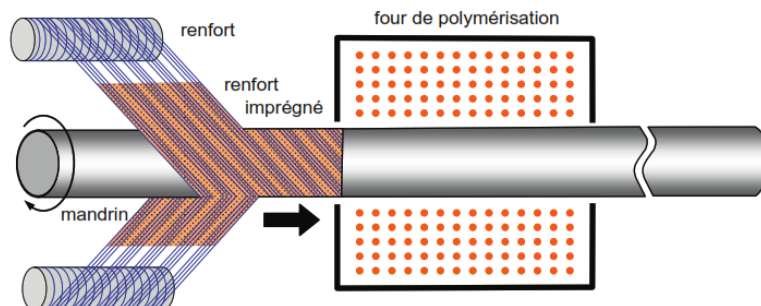


Figure.18. Enroulement hélicoïdal continu.

5.7.3. Enroulement polaire :

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement. Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non. Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.

Les Mandrins : Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage. Ils peuvent être :

- en métal, en bois, etc., monobloc ou en plusieurs éléments démontables ;
- en matériau à bas point de fusion ;
- en matériau soluble : par exemple grains de sable agglomérés dans un liant soluble dans l'eau ;

- en élastomère gonflable.



Figure.19 : Enroulement polaire.

Applications : Les applications de l'enroulement filamentaire ont été dégagées dans les paragraphes précédents. D'une manière générale, ce processus de mise en œuvre est utilisé pour fabriquer des pièces ayant une symétrie de révolution : tuyaux, tubes, réservoirs, bouteilles de gaz, enveloppes cylindriques, etc. Des pièces de grandes dimensions peuvent être réalisées : conteneurs, silos, etc. Les dimensions des pièces sont limitées par le type de machine utilisée. L'intérêt de l'enroulement filamentaire réside également dans la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

Le procédé d'enroulement filamentaire est également applicable à des pièces sans symétrie de révolution : pales d'hélicoptères et de turbines, réservoirs à sections rectangulaires, etc.

6. Les demi-produits :

La mise en œuvre de demi-produits (préimprégnés, compounds) fait appel aux mêmes techniques que le moulage à partir de fils ou tissus, dont l'imprégnation par la résine est effectuée au moment de la mise en œuvre. Nous en avons séparé la présentation, compte tenu du caractère propre de ces demi-produits: facilité de manipulation, possibilité d'automatisation avancée des procédés de mise en œuvre à partir de ces produits, etc.

6.1. Les Pré imprégnés :

Les pré-imprégnés (en anglais : les « prepregs » de pre-impregnated) sont des produits vendus sous forme de stratifils, rubans, tissus, etc., imprégnés de résine généralement dissoute dans un solvant. Les résines peuvent être phénoliques, des polyesters, des résines époxydes, des polyimides, etc. Le pourcentage en volume de fibres est élevé (50 à 80%) de manière à obtenir des composites à hautes performances mécaniques.

Le stratifil imprégné ou « stratipreg » (désignation de Vetrotex-Saint Gobain dans le cas de fibres de verre) est principalement destiné à l'enroulement filamentaire. Les tissus imprégnés sont généralement minces (de l'ordre de 1/10mm), et par conséquent de faible masse surfacique : 100 à 300 g/m². Toutefois, pour les besoins de la construction navale, certains préimprégnés épais ont été mis au point pour simplifier la mise en œuvre.

6.1.1. Élaboration des Pré imprégnés :

La fabrication des pré imprégnés se fait sur une machine verticale ou horizontale. Le fil ou tissu est déroulé à vitesse lente (1 à 10m/min), et passe dans un bac contenant une

résine d'imprégnation diluée dans un solvant. À la sortie, des racleurs et des rouleaux essoreurs éliminent l'excès de résine. Le fil ou tissu imprégné passe ensuite dans un four, où la plus grande partie du solvant s'évapore, et où s'amorce un début de polymérisation. À la sortie du four, le pré imprégné est refroidi par ventilation, de manière à stopper la polymérisation qui doit rester inachevée. Le tissu est ensuite :

- soit enroulé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en rouleau ;
- soit coupé et empilé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en plaques.

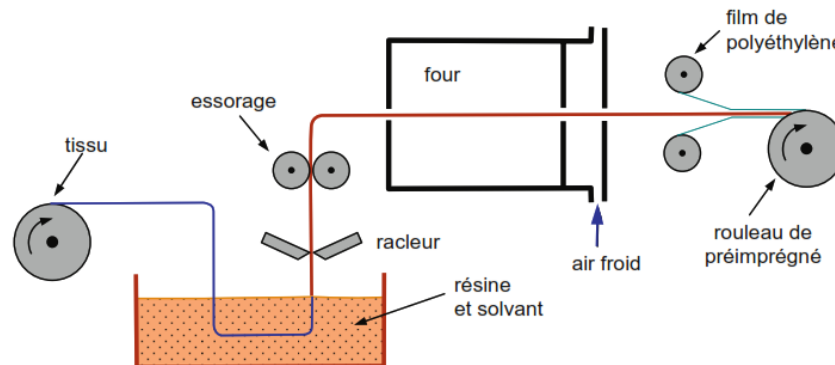


Figure. 20 : Schéma de principe de l'élaboration d'un pré imprégné.

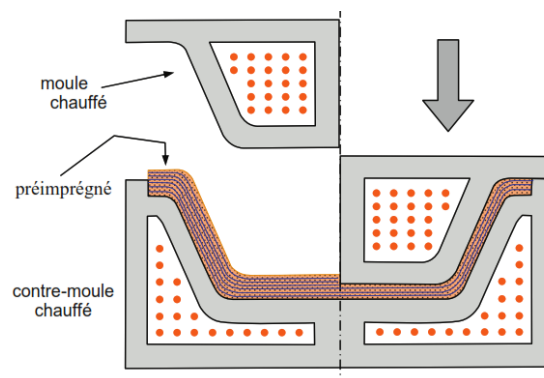


Figure. 21. Moulage par compression à partir d'un pré imprégné