

Matériaux composites

Introduction

Les matériaux de structures sont en général répartis en quatre grandes familles: les métaux, les céramiques, les polymères et les composites. Chacune des grandes classes de matériaux à un certain profil bien typé de propriétés physiques et chimiques. En associant des matériaux appartenant à chacune de ces classes – ou même simplement des matériaux différents bien qu'appartenant à la même classe – il est possible d'obtenir une combinaison de propriétés inédite, ajustable à la demande de l'utilisateur: légèreté et ténacité, transparence et conduction électrique...

Cette association peut se présenter sous des formes diverses :

- Deux matériaux massifs simplement juxtaposés et soudés pour former une même pièce; on parle alors de pièce biomatériau ou de matériau hybride.
- Un matériau déposé à la surface d'un autre, afin de conférer à la pièce qu'ils forment des propriétés différentes en surface et dans la masse: on parle alors de revêtement.
- Deux matériaux combinés à l'état dispersé et formant un matériau homogène à propriétés nouvelles. Un tel matériau est qualifié de matériau composite.

1. Définition et avantages des matériaux composites

Un matériau composite est obtenu par l'association d'au moins deux matériaux non miscibles.

Composite = matrice + renfort

Le renfort: comme son nom l'indique, le renfort assure la tenue mécanique du matériau. Organique ou inorganique, il se présente sous différentes formes (fibres, fibrilles, billes, particules...) selon les propriétés que l'on souhaite apporter au matériau.

La matrice: elle sert à lier les fibres renforts et à répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). C'est un polymère ou une résine organique.

La structure d'un composite sera fonction de:

- la nature et la forme du renfort,
- le taux de renfort,

- la nature de la résine et des charges ou additifs,
- la qualité de l'interface renfort-matrice,
- la géométrie de la pièce à réaliser,
- le procédé de mise en œuvre utilisé.

Les composites sont très anciens:

- Les Égyptiens fabriquaient leurs briques en mélangeant l'argile et la paille
- les murs en torchis (argile + paille)...
- Les composites naturels

Bois : fibres en cellulose (renfort) et de la lignine (matrice)

Os: à base d'une matrice en collagène (protéine souple mais résistante) et de renforts en apatite (substance minérale dure et cassante).

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels à savoir:

- Légèreté
- Grande résistance à la fatigue
- Liberté de formes
- Maintenance réduite
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
- Insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique.

Inconvénients

- ✓ Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température
- ✓ Emission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices
- ✓ Coût parfois élevé.

On distingue deux types de matériaux composites: les composites grande diffusion et les composites haute performance.

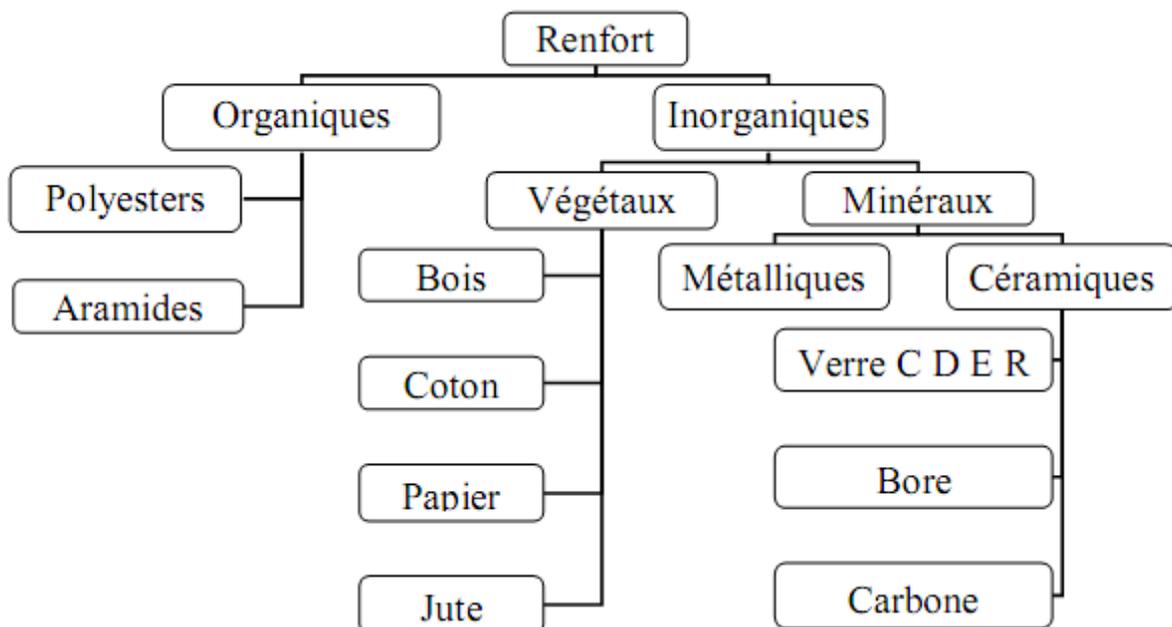
- **Les composites grande diffusion** représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques renforcés par des fibres courtes, le taux de renfort

avoisinant 30%. Dans plus de 95% des cas, ce sont des résines polyesters renforcées par des fibres de verre.

- **Les composites haute performance**, beaucoup plus chers, sont principalement utilisés dans l'aéronautique. Les renforts sont alors plutôt des fibres longues et le taux de renfort est supérieur à 50%. Leurs propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, d'où leur intérêt.

2. Principaux renforts

Le renfort doit être compatibles avec la matrice du composite sur le plan chimique, c'est-à-dire assurer une adhérence interfaciale (renfort-matrice) suffisante et stable dans le temps. Les principaux types de renforts se distinguent par leur géométrie (particules, billes, fibres courtes, fibres longues), par leur disposition, notamment pour les fibres (aléatoire 3D, nappes unidirectionnelles, tissages 2D, tissages 3D) ou par leur nature.

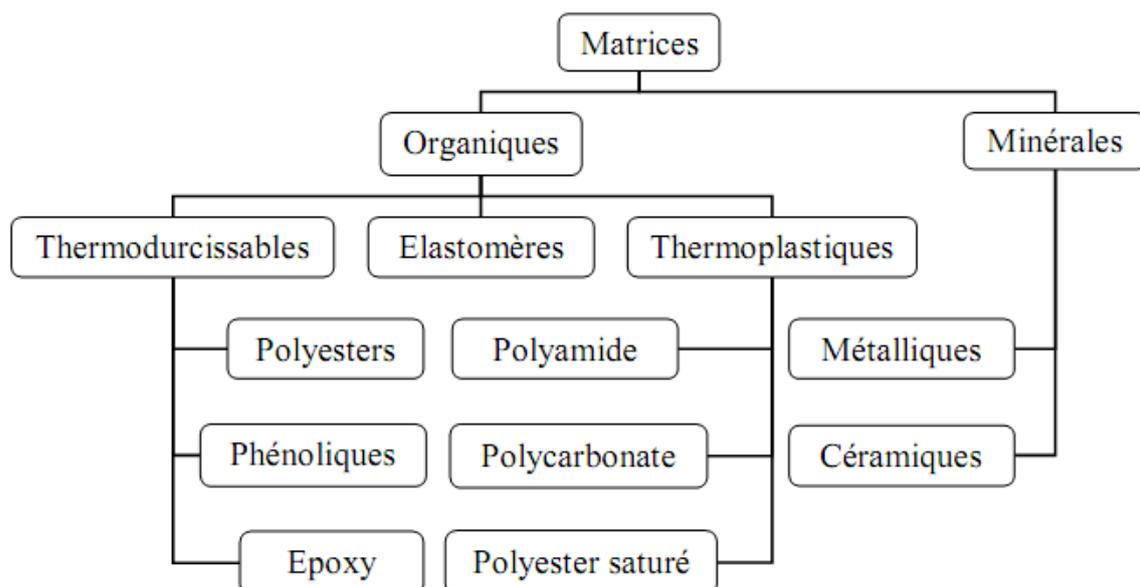


Différents types de renforts

| Type de composite | Constituants | Domaines d'application |
|---|---|--|
| 1. Composites à matrice organique Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés | Résine/charges/fibres cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères | Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples |
| 2. Composites à matrice minérale Béton Composite carbone-carbone Composite céramique | Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques | Génie civil Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc. Pièces thermo-mécaniques |
| 3. Composites à matrice métallique | Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone | Espace |
| 4. Sandwiches Peaux Ames | Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc. | Domaines multiples |

Tableau 1 : Exemples de MC artificiels

3. Différentes familles de matrice polymère



Thermodurcissable

Matières plastiques qui sous l'action de la chaleur, se durcissent progressivement pour atteindre un état solide irréversible. Ces matières ne peuvent être recyclées. Exemples: PolyURéthane (PUR), silicone, Polyesters insaturés (UP) pour les coques de bateaux,

Un élastomère est dérivé de «polymère élastique», fréquemment remplacé par le terme «caoutchouc».

Thermoplastique

Matières plastiques qui se ramollissent sous l'action de la chaleur et se durcissent en se refroidissant de manière réversible. La plupart des plastiques utilisés dans l'emballage sont des thermoplastiques, ce qui permet de les recycler. Principaux thermoplastiques: Polyéthylène (PE), Polyéthylène haute densité (PEhd), Polychlorure de vinyle (PVC), Polyéthylène terephthalate (PET), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polyamide (PA).

Comparaison des matrices thermoplastiques et thermodurcissables:

| | Thermoplastiques | Thermodurcissables |
|-----------------------------|--|--|
| Etat de base | Polymérisé et sous forme solide | Non polymérisé et sous forme de liquide visqueux |
| Stockage matière de base | Temps illimité | Temps réduit |
| Mouillabilité des renforts | Difficile | Aisée |
| Moulage | Chauffage (fusion-ramollissement puis refroidissement de fixation) | Chauffage continu |
| Cycle de fabrication | Court | Plus long (polymérisation) |
| Tenue aux chocs | Assez bonne | Limitée |
| Tenue thermique | Réduite | Meilleure |
| Chutes et déchets | Recyclables | Non recyclables |
| Conditions de mise en œuvre | Bonnes, propreté | Emanations pour méthodes humide (allergies) |

4. Mise en œuvre des matériaux composites

Le choix d'un procédé de moulage dépend de certains facteurs tel que:

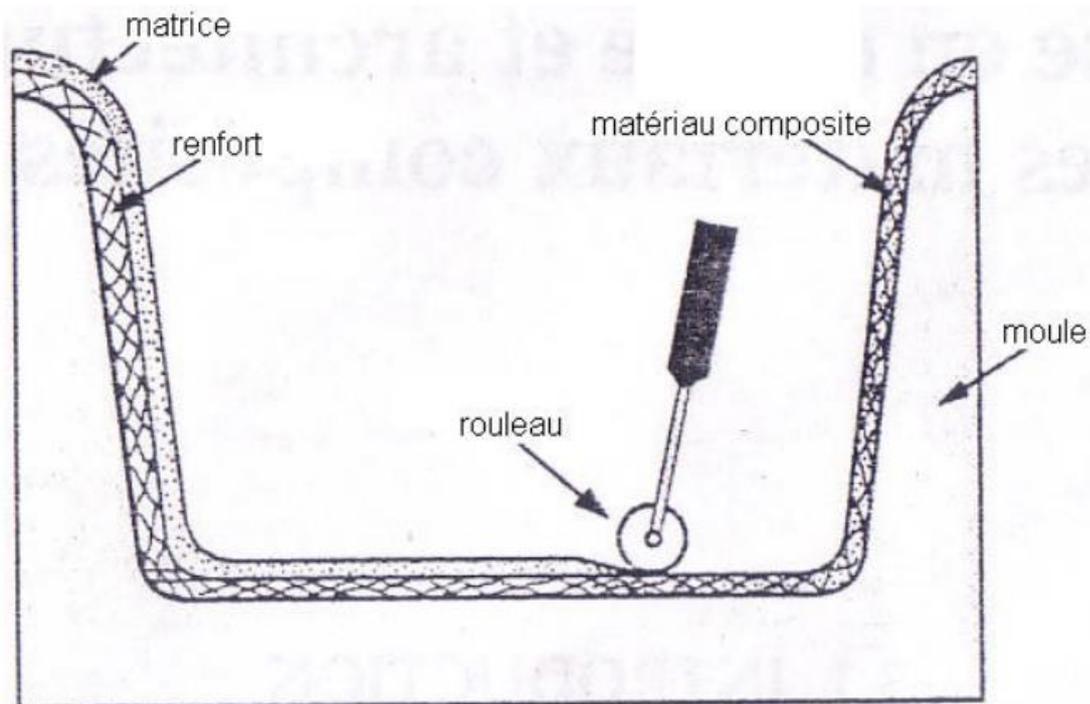
- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système:
 - Soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables
 - Soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les principaux procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont:

- Moulage au contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Moulage par Pultrusion
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

4.1. Moulage au contact

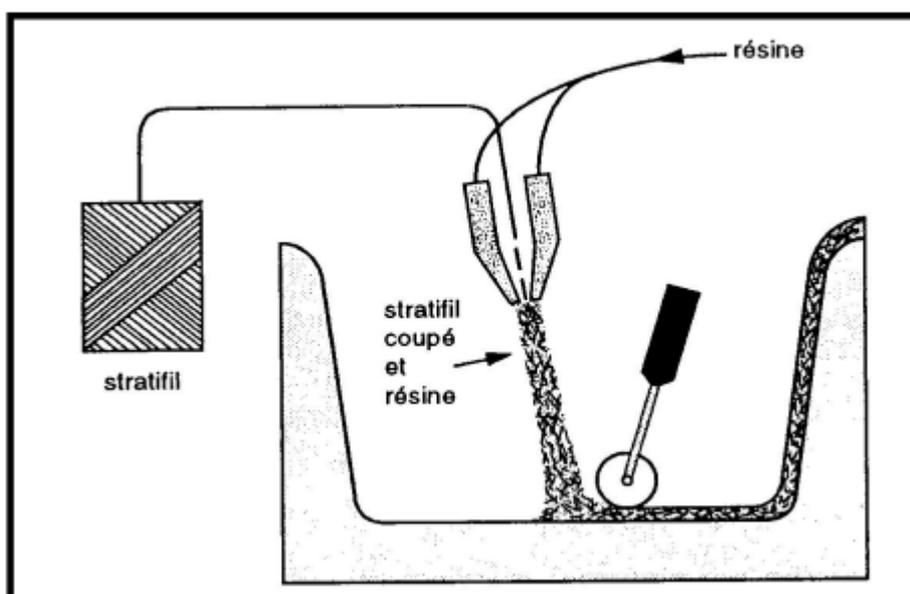
Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais à cadence très faible. Cette technologie est plus réservée à la réalisation de pièces prototypes ou de simulation



Moulage au contact

4.2. Moulage par projection simultanée

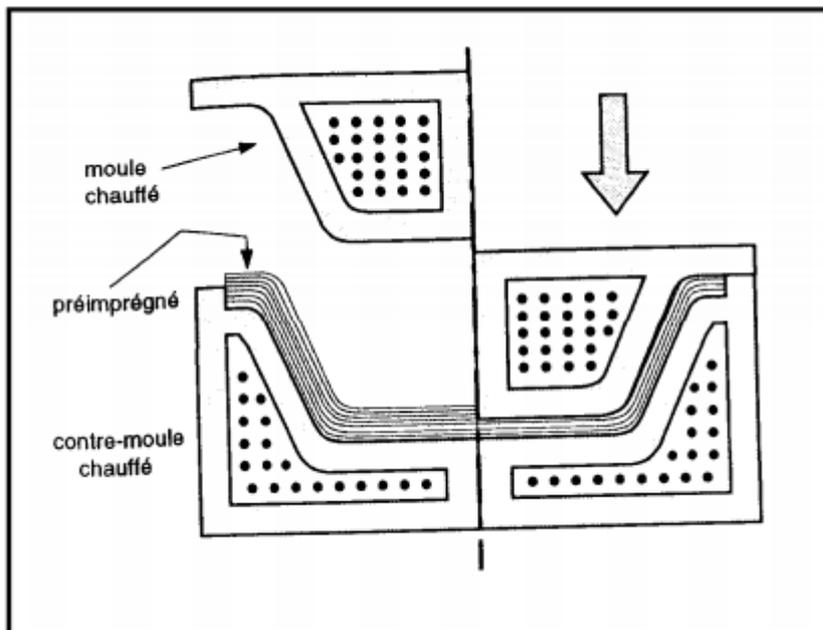
C'est une technologie similaire à la précédente mais les fibres coupées sont projetées au pistolet.



Moulage par projection simultanée

4.3. Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound)

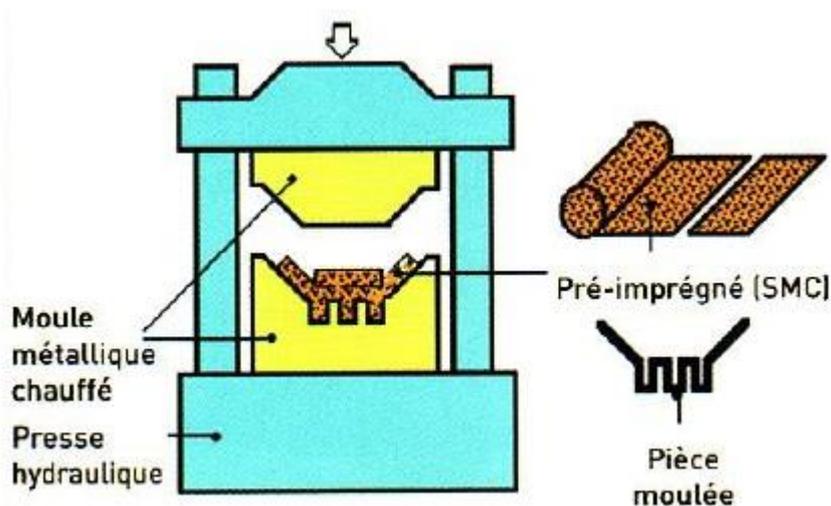
Ce moulage est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars. BMC utilise une résine sous forme de granules.



Injection thermodurcissable BMC

4.4. Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound)

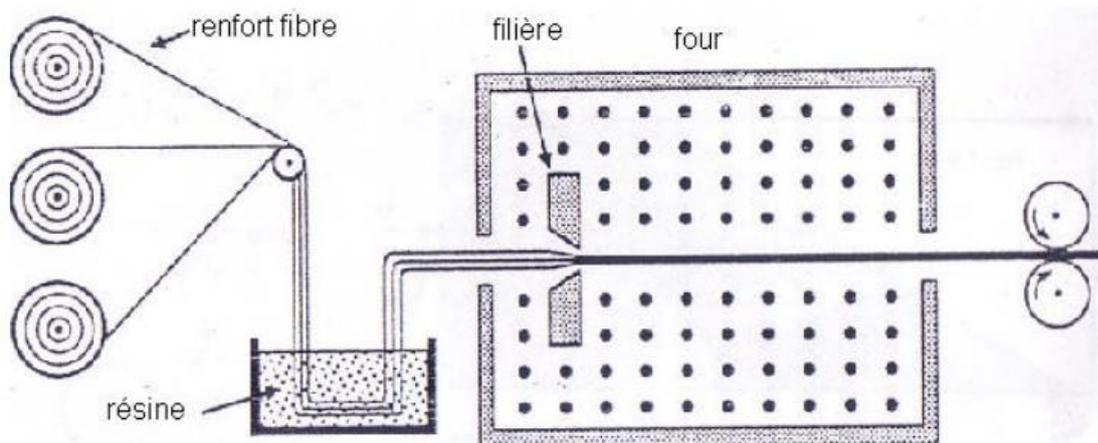
Le principe consiste à déposer des feuilles de préimprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. SMC utilise une résine sous forme de feuilles



Compression thermodurcissable SMC

4.5. Moulage par pultrusion

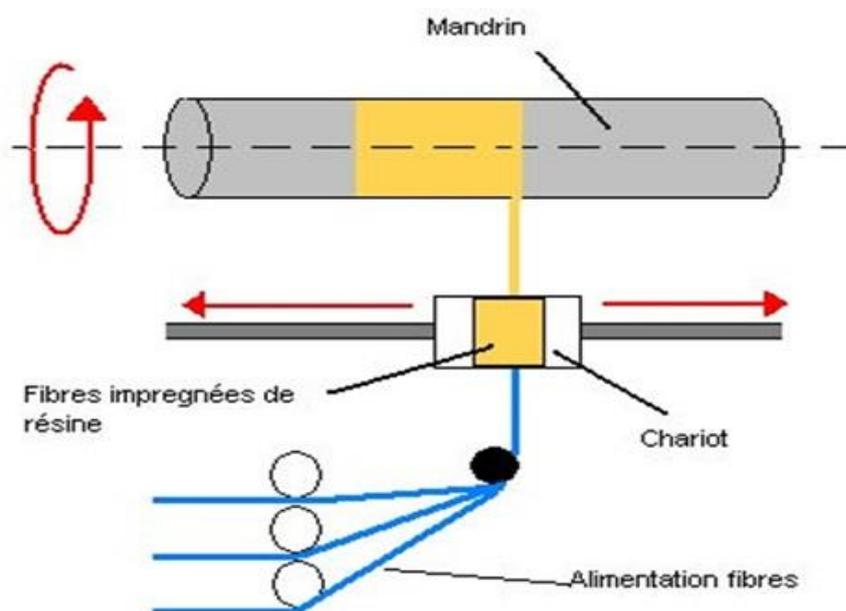
Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est: tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé.



Moulage par pultrusion

4.6. Enroulement filamentaire (ou bobinage)

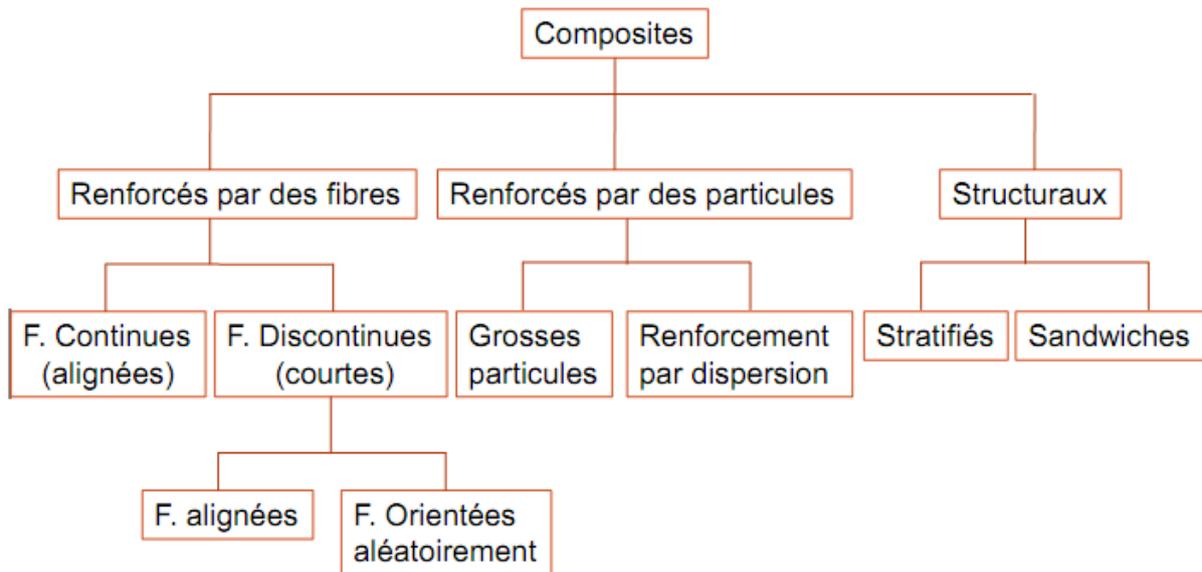
Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.



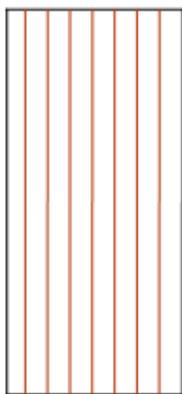
Enroulement filamentaire (ou bobinage)

5. Classification des Matériaux Composites

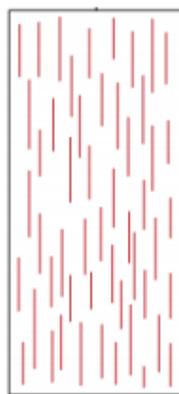
5.1. Classification suivant la forme des constituants



Composites à fibres



Fibres continues et alignées



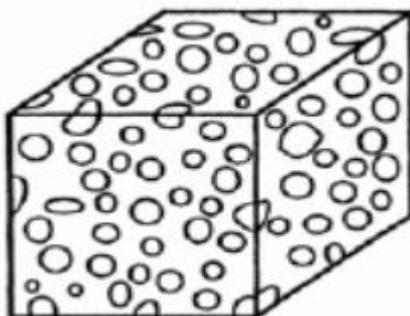
Fibres discontinues et alignées



Fibres discontinues et orientées aléatoirement



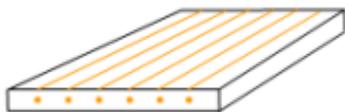
Composites à particules



Composites stratifiés

- **Monocouches**

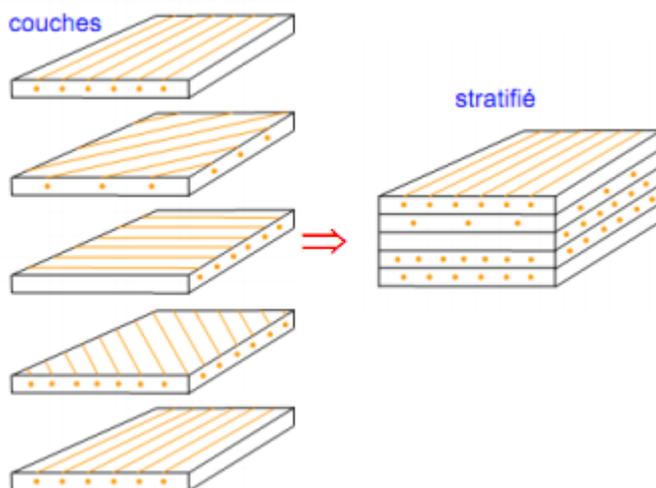
Les monocouches sont caractérisés par la forme du renfort: à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.



Couche (pli) UD

- **Stratifiés**

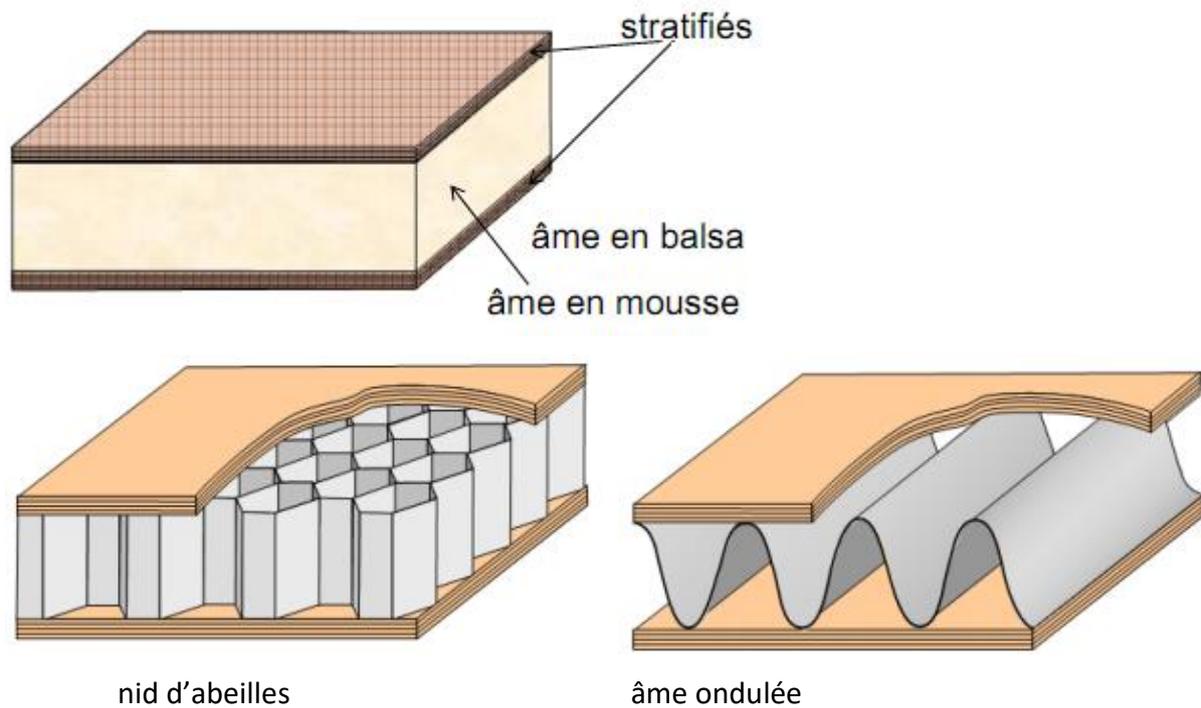
Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.



Constitution d'un stratifié

- **Composites sandwichs**

Un panneau sandwich est constitué de deux couches (peaux) d'un matériau très résistant entre lesquels on intercale une âme (ou cœur) constituée d'un matériau moins dense et possédant de bonnes propriétés en compression. L'objectif est d'obtenir une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.



Le balsa est un bois très léger, provenant de l'Amérique du Sud et de l'Amérique centrale. L'utilisation d'une âme en balsa dans les matériaux composites est courante en raison de sa légèreté, de sa résistance et de sa facilité d'utilisation. Elle est également résistante aux chocs, aux vibrations et à l'humidité, ce qui en fait un choix populaire pour les applications marines et aéronautiques.

6. Propriétés générales des matériaux composites à fibres

6.1. Loi des mélanges

Soient les deux fractions volumique des renforts (ϕ_r) et de la matrice (ϕ_m), définies comme suit:

$$\phi_r = \frac{\text{volume des renforts}}{\text{volume total}} \quad \phi_m = \frac{\text{volume de la matrice}}{\text{volume total}}$$

La masse volumique du composite, notée ρ_c , s'écrit:

$$\rho_c = \rho_r \cdot \phi_r + \rho_m \cdot \phi_m$$

ρ_c et ρ_m sont, respectivement, les masses volumiques des renforts et de la matrice.

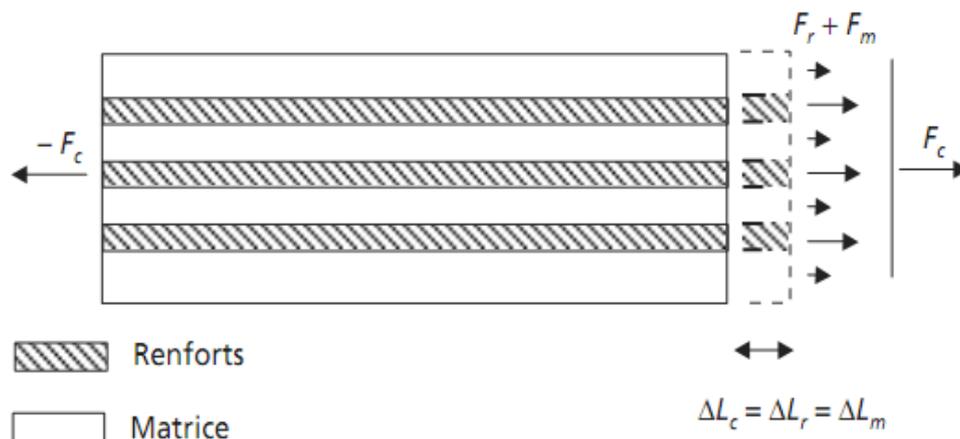
Cette loi des mélanges s'applique également à d'autres caractéristiques, comme le module de Young longitudinal d'un composite à fibres longues. Si un barreau d'un tel composite est

soumis à une force F_c parallèlement aux fibres (figure ci-dessous), renfort et matrice se partagent la force en parallèle:

$$F_c = \sigma_c \cdot S_c = F_r + F_m = \sigma_r \cdot S_r + \sigma_m \cdot S_m$$

Leurs allongements relatifs sont les mêmes:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L_c}{L_0} = \varepsilon_r = \frac{\Delta L_r}{L_0} = \varepsilon_m = \frac{\Delta L_m}{L_0}$$



Barreau en composite à fibres longues sollicité dans la direction longitudinale.

Le module de Young longitudinal du composite E_{CL} ($\frac{\sigma}{\varepsilon}$) s'écrit (en utilisant les deux expressions précédentes):

$$E_{CL} = E_r \cdot \phi_r + E_m \cdot \phi_m$$

où E_r et E_m représente, respectivement, le module de Young longitudinal des renforts et de la matrice.

De manière analogue, pour une sollicitation perpendiculaire au plan des renforts, les déformations s'additionnent alors que les contraintes sont identiques. Ce sont dans ce cas les inverses de modules de Young qui suivent la loi des mélanges:

$$\frac{1}{E_{CL}} = \frac{1}{E_r} \cdot \phi_r + \frac{1}{E_m} \cdot \phi_m$$

De même, pour le coefficient de Poisson ($\frac{\text{rétrécissement transversal relatif}}{\text{allongement longitudinal relatif}}$) transversal en traction longitudinale:

$$\nu_{CLT} = \nu_r \cdot \phi_r + \nu_m \cdot \phi_m$$

Limite d'élasticité dans la direction des fibres:

$$R_{ec} = R_{er} \cdot \phi_r + R_{em} \cdot \phi_m$$

Résistance à la traction dans la direction des fibres:

$$R_{mc} = R_{mr} \cdot \phi_r + R_{mm} \cdot \phi_m$$

6.2. Cas des fibres courtes

En traction parallèle aux fibres, la valeur maximale de contrainte de traction σ_f appliquée à une fibre de diamètre d est donnée par;

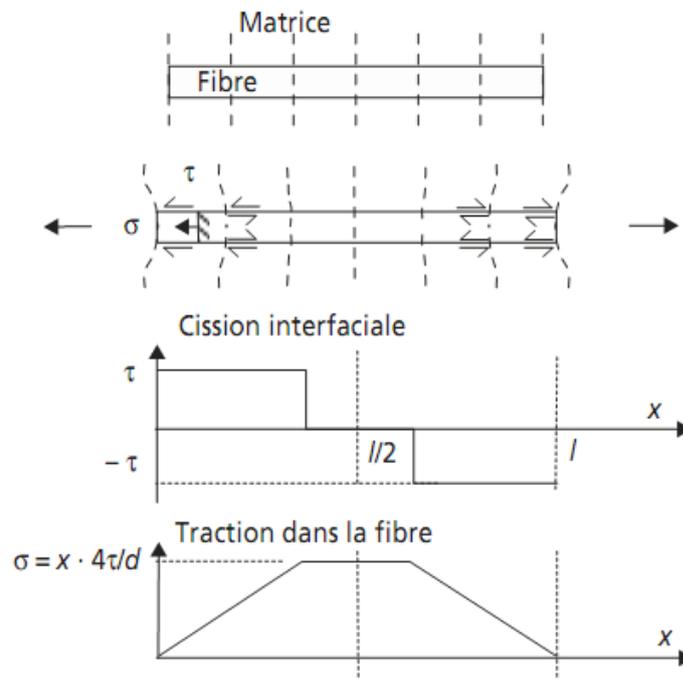
$$\sigma_f = x \cdot \frac{\tau_{em}\pi d}{\frac{\pi d^2}{4}} = x \cdot \frac{4\tau_{em}}{d}$$

τ_{em} et x représentent, respectivement, la valeur maximale possible des scissions et la distance à l'extrémité

L'efficacité maximale du renfort est obtenue lorsque, la fibre possède une longueur critique de transfert ℓ_c , tel que:

$$\ell_c = \frac{dR_{mf}}{2\tau_{em}}$$

R_{mf} est la résistance à la traction.



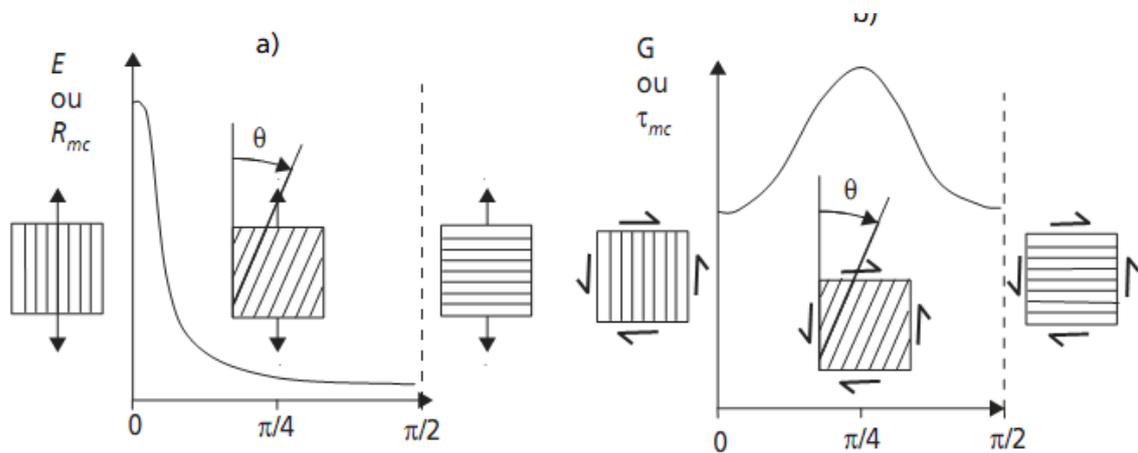
Transfert de charge depuis la matrice vers une fibre courte par les cissions interfaciales.

6.3. Effets de l'orientation des fibres

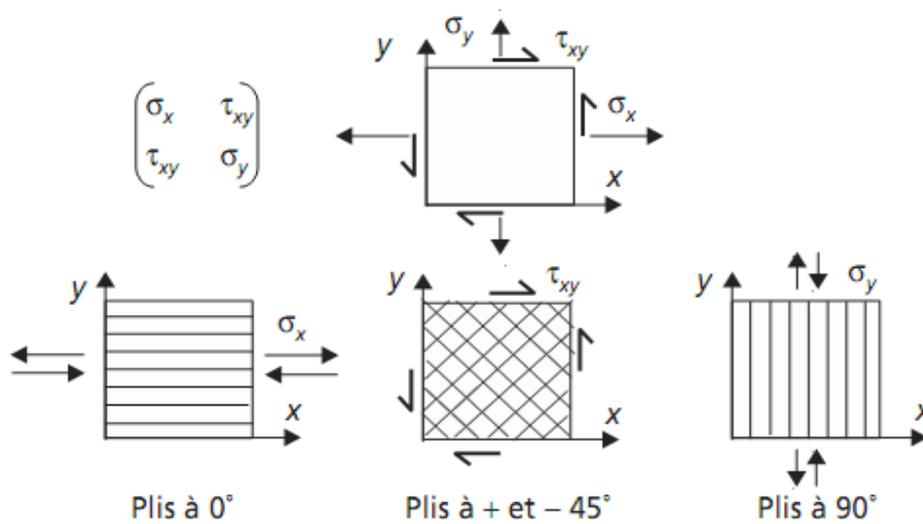
L'effet de renforcement (tant en résistance à la rupture qu'en rigidité élastique) chute très vite dès que la contrainte normale maximale (en traction ou compression) s'écarte de la direction des fibres de plus de quelques degrés.

En compression longitudinale, la résistance du composite est légèrement moins bonne qu'en traction, en raison de la possibilité de flambement des fibres.

En traction perpendiculaire aux fibres (ou en cisaillement parallèle aux fibres), la résistance du composite ne dépasse pas celle de la matrice R_{mm}



Évolutions schématiques des résistances et rigidités d'un composite à renfort fibreux unidirectionnel avec l'angle θ entre la direction des fibres et la direction de sollicitation a) traction(ou compression) b) cission.



Orientations recommandées des fibres d'un panneau de composite pour résister de manière optimale aux diverses composantes d'un tenseur de contraintes planes.