

MATERIAUX COMPOSITES

INTRODUCTION

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 *charges* et *renforts*. 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.

On distingue deux types de composites :

a- Grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

b- Hautes performances :

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

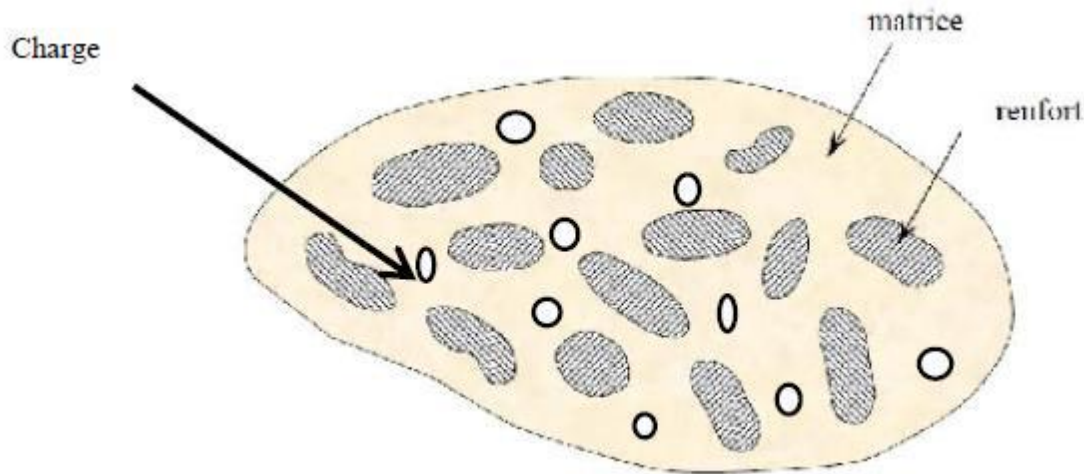
Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.

I- CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES :

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- ☐ La matrice.
- ☐ Le renfort.
- ☐ Les charges et les additifs.



Matériau composite

Le renfort :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

- Linéique (fils, mèches)
- Tissus surfaciques (tissus, mats)
- Multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1[3].

Architecture des renforts :

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

➤ Les unidirectionnels (UD) :

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

On distingue plusieurs natures de fibres :

a) Fibre 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.

Fabrication des fibres de carbone :

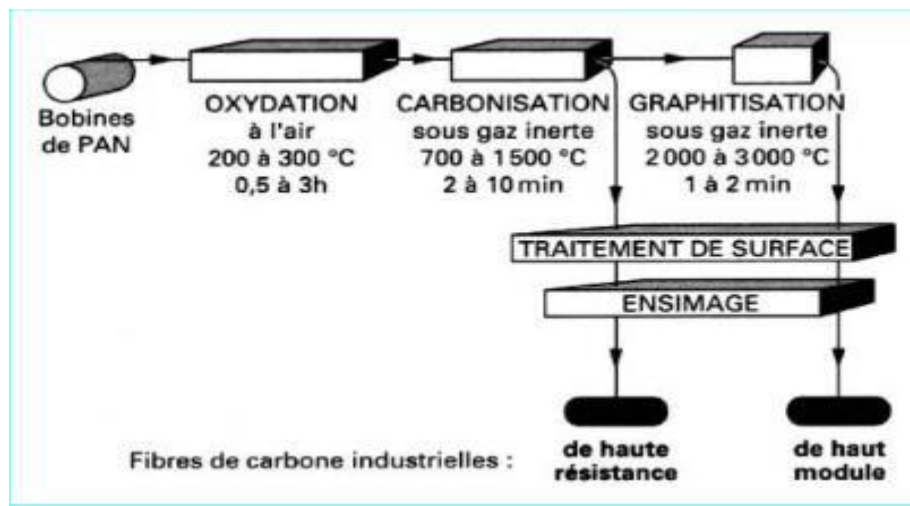


Figure (I-7) : Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone

b) Fibre de verre

Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres [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).

c) Fibre d'aramide

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

- La fibre basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

d) Fibre de bore

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

e) Fibre de silice (ou de quartz)

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

f) Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	?	E	G	?	s _r	A	a
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻⁵
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻⁵
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻⁵
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

La matrice :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (I-4)

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

a) - Résines thermodurcissables

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

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [1].

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- ❖ Masse volumique 1100 à 1500 kg/m³
- ❖ 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
- ❖ Température de fléchissement sous charge 290 °C

b) Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [1].

c) Résines thermostables

Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

Les charges et les additifs :

a) les charges:

❖ Charges renforçantes

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

- Charges sphériques
- Charges non sphériques

❖ Charges non renforçantes :

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

Parmi ces classes on trouve :

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

Les additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

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

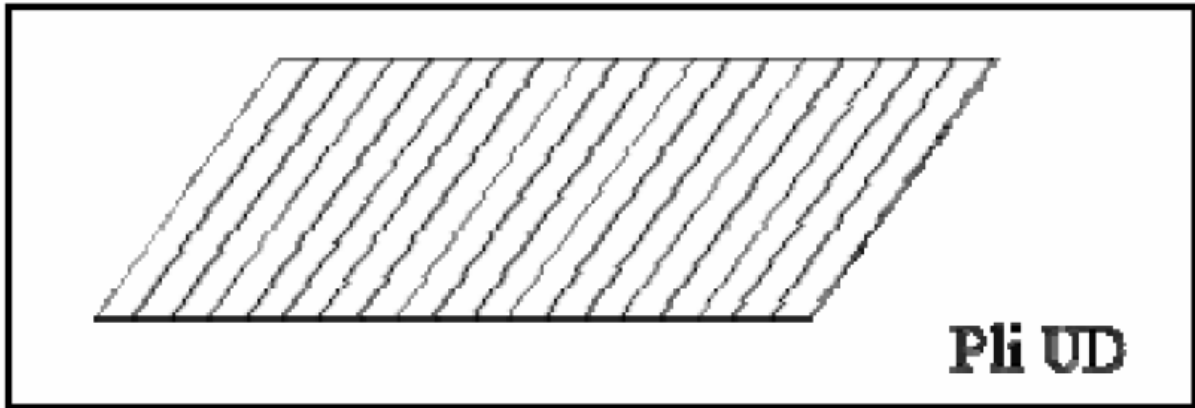
Structure des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

1- Les monocouches

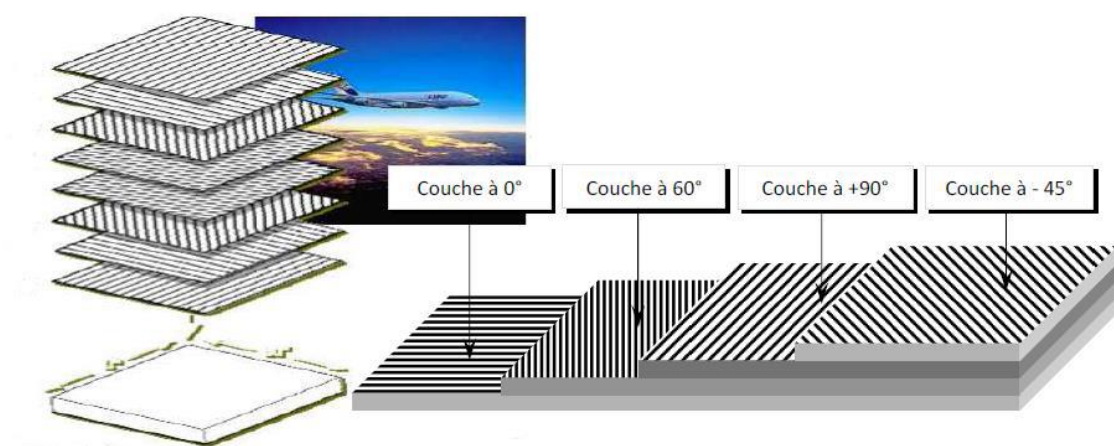
Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans.



Composite monocouche

2- Les Stratifiés

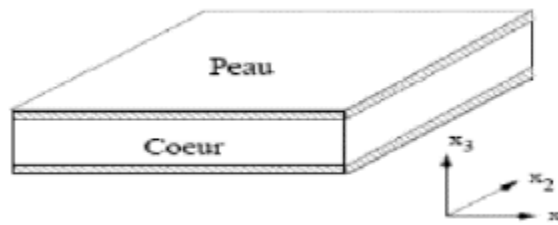
On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux . Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure.



Plaques stratifiées

3- Les sandwich

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées



Composite sandwich

II- PROCÉDES D'ÉLABORATIONS DES MATÉRIAUX COMPOSITES

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort.

1- Moulage au contact :

Principe

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

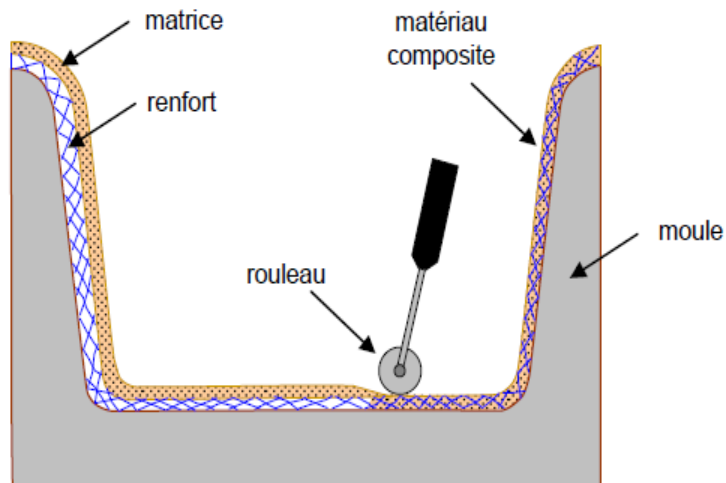


Schéma du moulage au contact.

2- Moulage par projection simultanée :

Principe

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

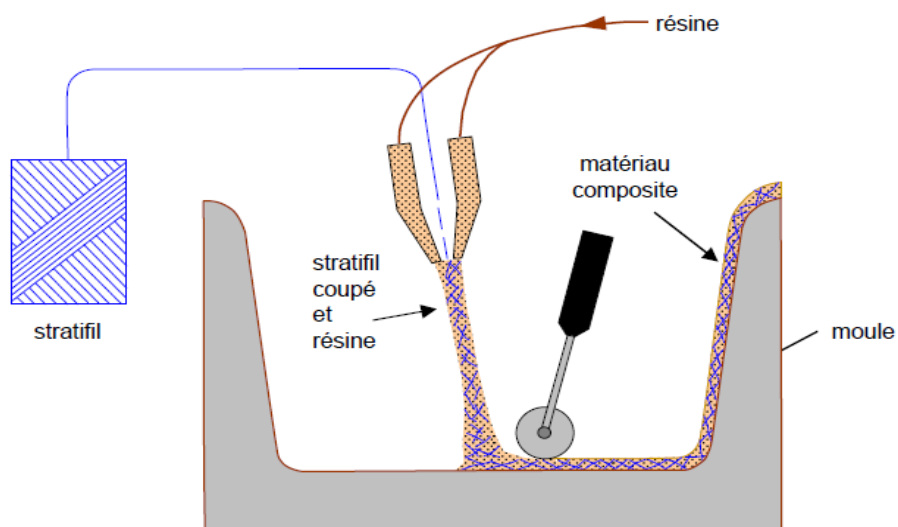


Schéma du moulage par projection simultanée.

3- Moulage sous vide:

Principe

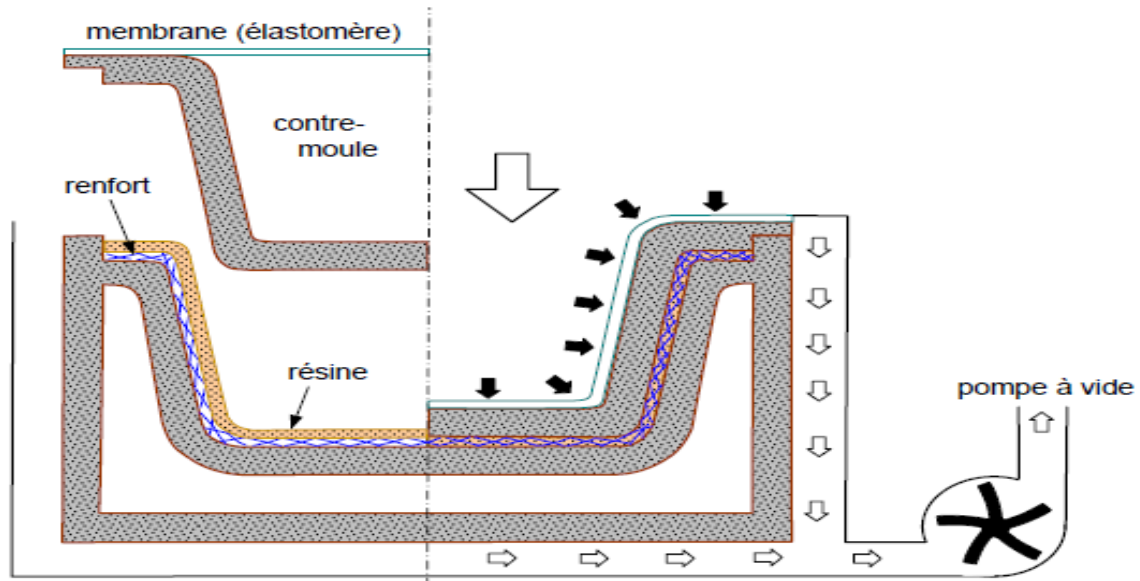
Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients du moulage sous vide :

Avantages	Limites
- Deux faces lisses éventuellement gel-coatés. - Qualité constante - Bonne cadence de production - Nécessite peu de surface - Investissement très modéré (moule, pompes à vide) - Bonnes conditions de travail et d'hygiène.	- Possibilité de forme plus réduite qu'au contact - Mise au point parfois difficile.



4- Moulage par projection de résine :

Principe :

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

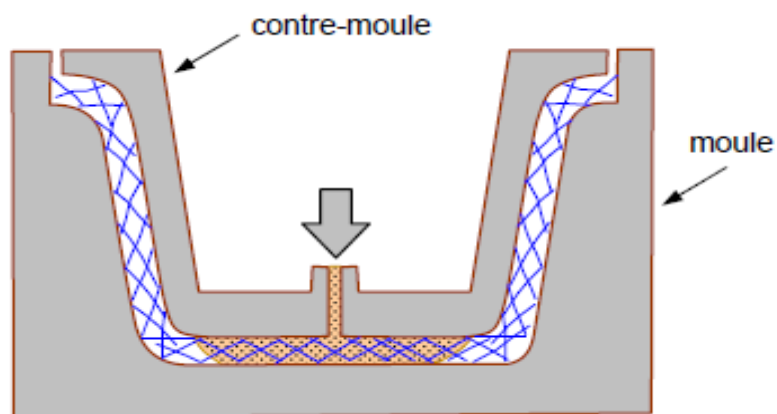


Schéma du moulage par injection de résine.

5- Moulage par centrifugation :

Principe :

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

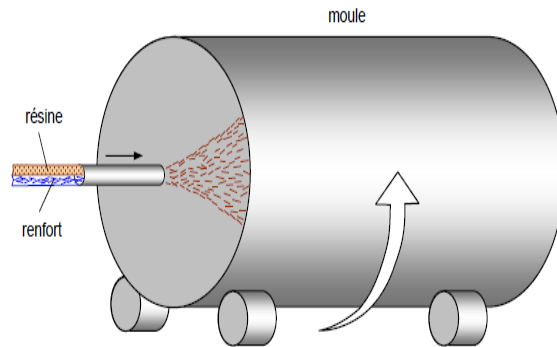
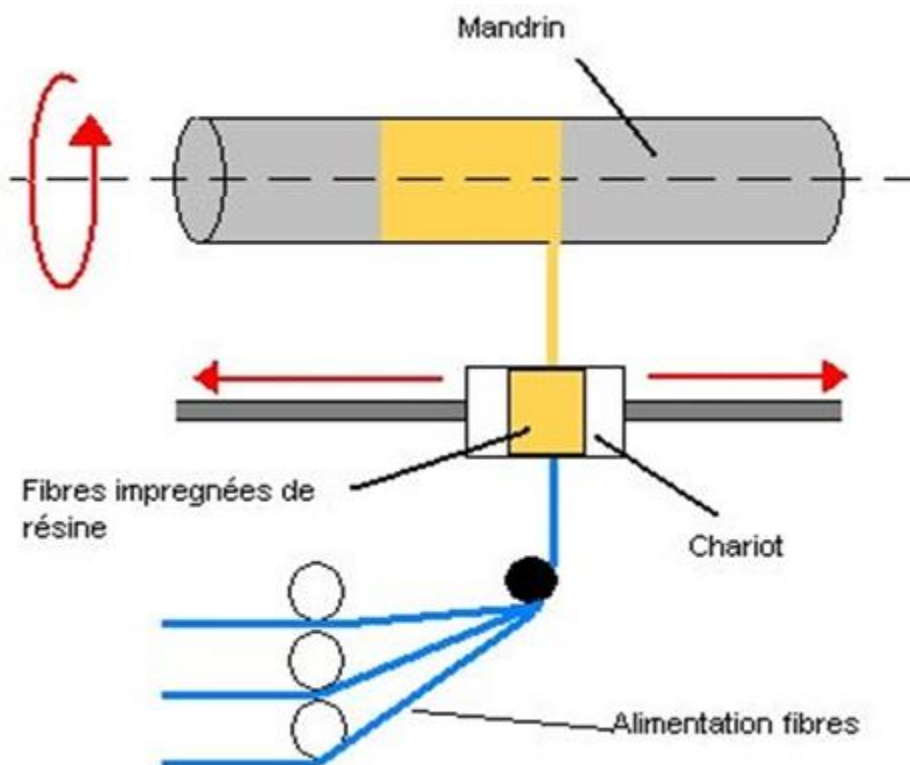


Schéma du moulage par centrifugation.

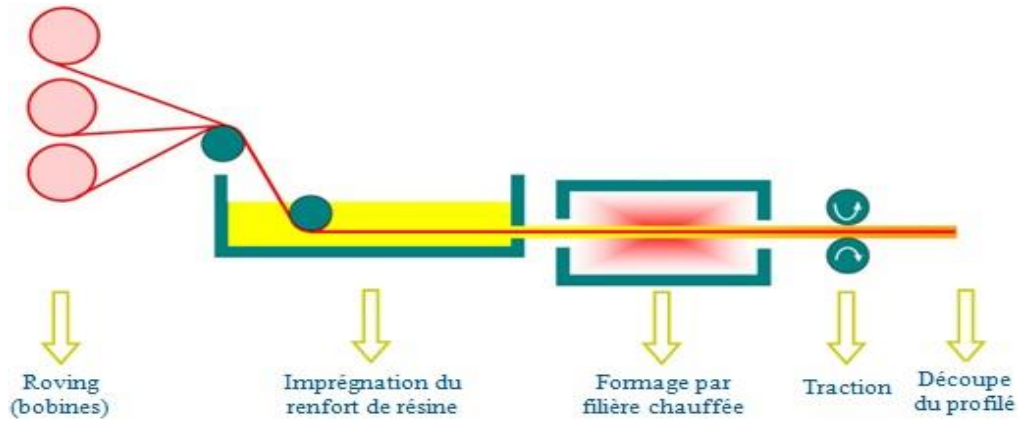
6- Moulage par enroulement filamentaire

Procédé automatisé pour forme de révolution seulement, l'enroulement filamentaire permet d'obtenir des pièces à très haute résistance (taux de fibres jusqu'à 80%, orientées avec précision).



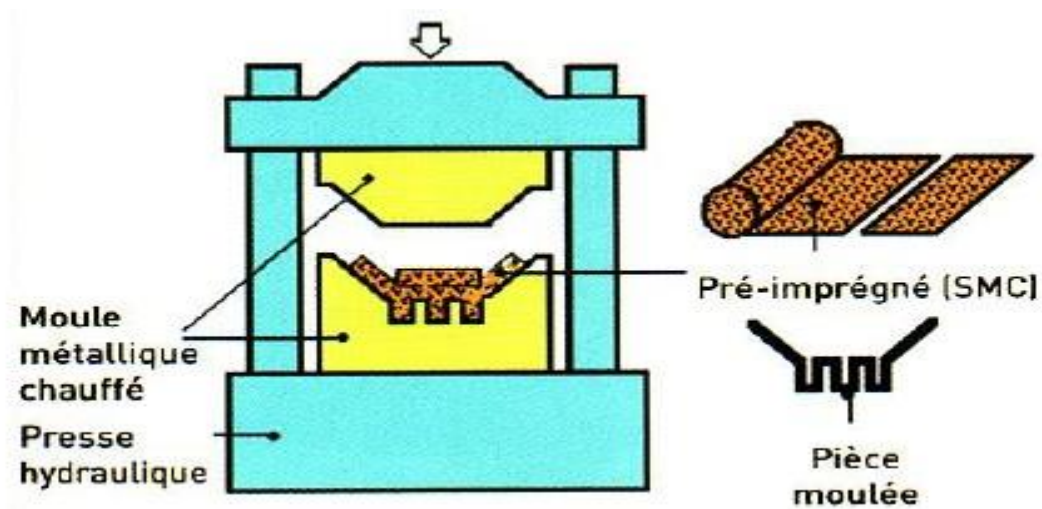
7- Pultrusion

La pultrusion est destinée à la réalisation en continu de profilés de sections constantes.

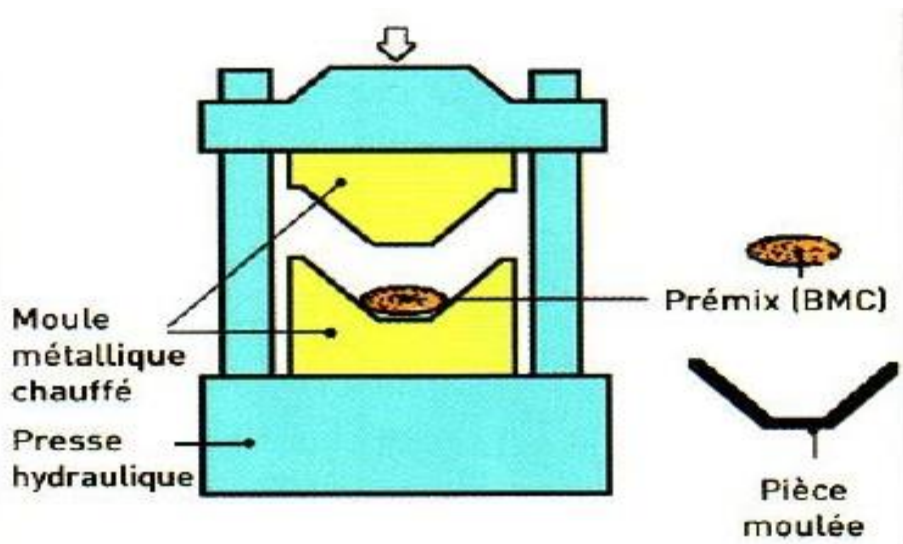


8- SMC : Sheet Molding Compound

Feuille de pré-imprégné (résine thermodurcissable + fibre) servant pour le moulage à chaud sous pression dans un moule fermé.



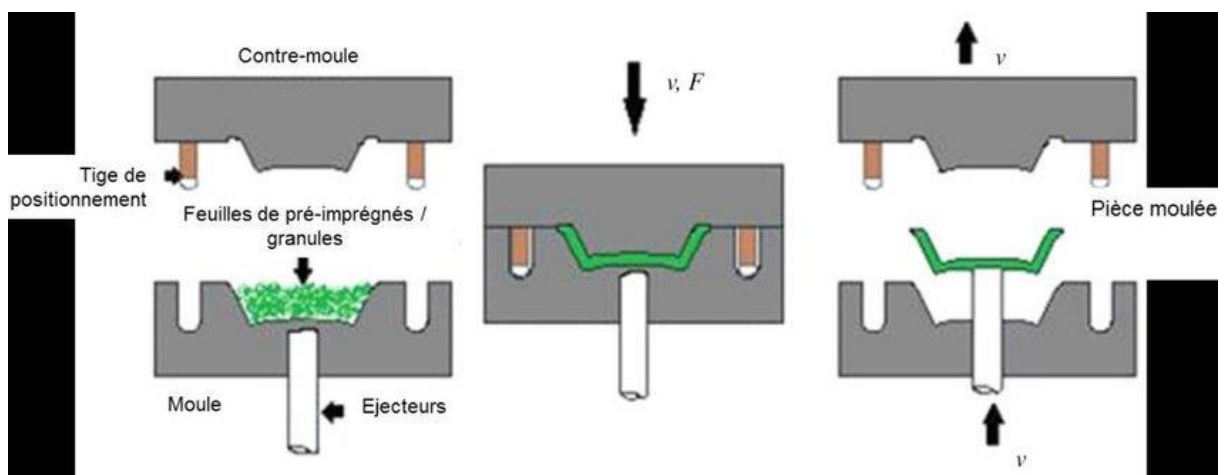
9- BMC : Bulk Molding Compounds



Mélange de résine thermodurcissable additionnée de renfort pour le moulage par injection généralement, et parfois par compression.

Polymérisation grâce à la pression dans le moule et à la température du moule.

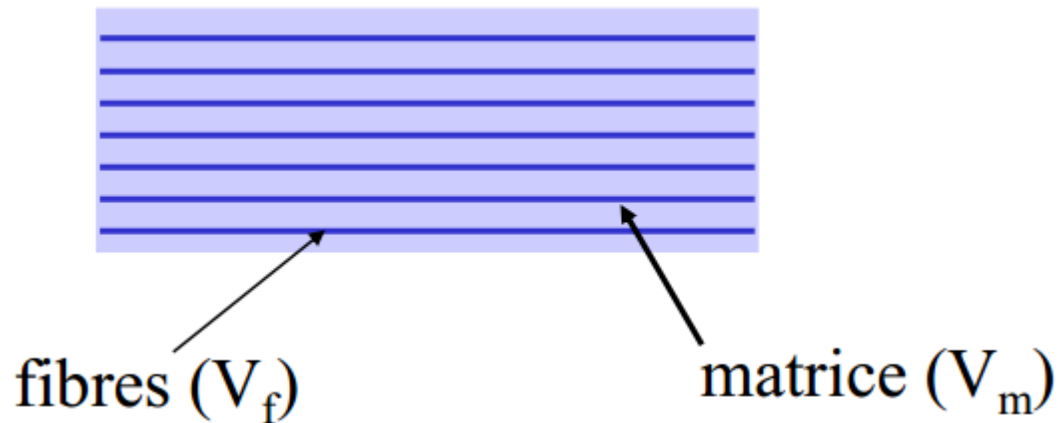
10- Moulage par compression



III- COMPORTEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES

Calcul d'homogénéisation des composites

Les composites sont composés de l'ensemble « matrice + renfort ». L'ajout du renfort augmente les propriétés mécaniques de la matrice renforcée. Considérons le composite unidirectionnel suivant :



Ce matériau est non homogène et ses diverses propriétés dépendent de celles des fibres et de la matrice qui les constituent. Cependant, ce dernier, peut être supposé comme homogène en considérant ses propriétés moyennes vis-à-vis des charges externes appliquées. Le composite unidirectionnel est supposé se comporter comme un matériau dont les propriétés mécaniques varient d'une direction à une autre mais semblable le long de ce matériau. Des expressions simplifiées et pratiques de ces composites peuvent être obtenus en adoptant une approche très simple du comportement mécanique d'un élément de volume de ce matériau. Nous décrivons ces expressions dans ce qui suit.

1- Fraction volumique

Considérons un volume du matériau composite, composé d'un volume de fibre v_f et d'un volume de la matrice v_m . On définit :

- La fraction volumique des fibres $V_f = \frac{v_f}{v_c}$
- La fraction volumique de la matrice $V_m = \frac{v_m}{v_c}$

Sachant que : $V_m = 1 - V_f$ et $v_c = v_m + v_f$ (v_c étant le volume du composite)

2- Fraction massique

Considérons la masse M_c du matériau composite, composé d'une masse m_f la fibre et une masse m_m de la matrice. Les fractions massiques des fibres et de la matrice sont :

- La fraction massique des fibres : $P_f = \frac{mf}{mc}$

- La fraction massique de la matrice : $P_m = \frac{mm}{mc}$

Avec $P_f + P_m = 1$ et $mm + mf = mc$ (mc étant la masse du composite).

3- RELATION ENTRE FRACTION VOLUMIQUE ET FRACTION MASSIQUE

$$mc = \rho_c .vc \quad mf = \rho_f .vf \quad \text{et} \quad mm = \rho_m .vm$$

$$\text{Or } mm + mf = mc \Rightarrow \begin{cases} \rho_f .vf + \rho_m .vm = \rho_c .vc \\ \frac{\rho_f .vf}{vc} + \frac{\rho_m .vm}{vc} = \rho_c \end{cases}$$

$$\Rightarrow \rho_c = \rho_f .V_f + \rho_m .V_m$$

$$\Rightarrow \rho_c = \rho_f .V_f + \rho_m .(1 - V_f)$$

De plus $vc = vm + vf$

D'où $\frac{mc}{\rho_c} = \frac{mf}{\rho_f} + \frac{mm}{\rho_m} = \frac{mf.\rho_m + mm.\rho_f}{\rho_m.\rho_f}$

L'inverse est valable

Donc $\frac{\rho_c}{mc} = \frac{\rho_m .\rho_f}{mf\rho_m + mm\rho_f}$

Ce qui donne $\rho_c = \frac{1}{\frac{mf.\rho_m}{mc.\rho_f.\rho_m} + \frac{mm.\rho_f}{mc.\rho_f.\rho_m}}$

Finalement $\rho c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho f} + \frac{P_m}{\rho m}}$

Sachant que $P_f = \frac{mf}{mc} = \frac{\rho f \cdot v_f}{\rho c \cdot v_c} = \frac{\rho f}{\rho c} V_f$

$\Rightarrow P_f = \frac{\rho f}{\rho c} V_f$ et $P_m = \frac{\rho m}{\rho c} V_m$

Donc $V_f = \frac{\rho c}{\rho f} P_f$ et $V_m = \frac{\rho c}{\rho m} P_m$

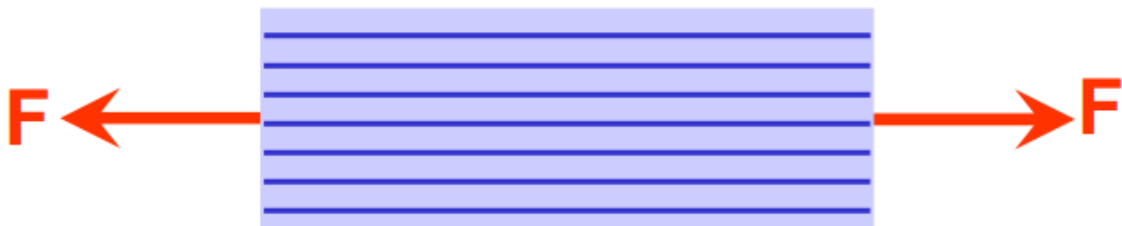
4- EVALUATION DES CONSTANTES ELASTIQUES D'UN COMPOSITE UNIDIRECTIONNELLE

Module d'Young longitudinal : forces parallèles à la direction de la charge

Par essai de traction, le composite s'allonge d'une quantité ΔL , donc on définit une déformation $\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$. L'identité de la déformation dans la fibre et dans la matrice impose

$$\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_L$$

ϵ_f , ϵ_m et ϵ_L (les déformations des fibres, de la matrice et du composite suivant la direction longitudinale).



De plus, on a : $\sigma_f = E_f \cdot \epsilon_f = E_f \cdot \epsilon_L$ et $\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_m = E_m \cdot \epsilon_L$

σ_f et σ_m : les contraintes de déformation des fibres et de la matrice respectivement.

E_f et E_m : leurs modules d'élasticité (leur modules d'Young).

Donc, les forces $F_f = \sigma_f \cdot S_f$ et $F_m = \sigma_m \cdot S_m$

S_f et S_m représentent les aires des sections droites de la fibre et de la matrice.

Sachant que : $F_c = F_f + F_m$ ce qui donne $F_c = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m$

F_c , F_f et F_m représentent respectivement les forces exercées sur le composite, les fibres et la matrice.

Soit S_c l'aire de la section droite du composite, donc : $\sigma_c = \frac{F_c}{S_c}$

σ_c étant la contrainte de déformation du composite.

Et par conséquent l'équation nous auront : $\frac{F_c}{S_c} = \sigma_f \cdot \frac{S_f}{S_c} + \sigma_m \cdot \frac{S_m}{S_c}$

Ainsi : $\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$ ou encore $\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m (1 - V_f)$

Sachant que : $\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_c$ et que $\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_L$ donc :

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

ou E_c étant le module d'Young du composite suivant la direction longitudinale.

Cette expression est connue sous le nom de « **Loi des mélanges** » pour le module d'Young dans la direction des fibres.

5- APPLICATION

Exercice 1

Pour une application donnée, vous avez le choix de réaliser une pièce en composite ayant une matrice d'époxy pouvant être renforcée par des fibres continue alignées soit :

☐ Verre

☐ Carbone

On présente le tableau suivant :

Composant	E (GPa)	Re(MPa)	Rm(MPa)	A%
Epoxy	3	60	90	4
Verre	75	-	1800	-
Carbone	200	-	3000	-

Si on prend (Epoxy-verre), pour $V_f = 20 \%$, on obtient une bonne rigidité mais le prix est élevé.

Donc, on a décidé de réaliser la pièce en (Epoxy-verre).

On demande de :

1. Calculer le module d'Young pour le composite.
2. Calculer $V_f (\%)$ de la fibre de verre pour obtenir la rigidité du (Epoxy-Carbone).
3. Lequel de ces composites (Verre-Epoxy) ou (Carbone-Epoxy) se comporte d'une façon élastique jusqu'à sa rupture.
4. Qu'elle est sa résistance à la traction R_{mc} en MPa

Solution :

1. $E_c = E_f.V_f + E_m(1-V_f) = (0,2 \cdot 100) + (0,8 \cdot 3) = 42,2 \text{ GPa}$

2. Fraction volumique requise des fibres de verre :

$$E_c = E_{fv}.V_{fv} + E_m(1-V_{fv})$$

Ce qui donne : $V_{fv} = \frac{E_c - E_m}{E_{fv} - E_m} = \frac{42,2 - 3}{75 - 3} = 0,547 \Rightarrow 54,7 \%$

3. Composite ayant un comportement purement élastique :
- Allongement à la rupture des fibres :

$$A_{fc} = \frac{R_{mf}}{E_f} = \frac{3}{200} = 1,5 \%$$

$$A_{fv} = \frac{R_{mf}}{E_f} = \frac{1,8}{75} = 2,4 \%$$

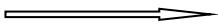
- Allongement à la rupture de la matrice :

$$A_{cm} = \frac{R_{mm}}{E_m} = \frac{0,06}{3} = 2 \%$$

On constate que pour (Verre-Epoxy), la matrice entre en déformation plastique avant que les fibres ne soient rompues.

Il y'a dans ce cas une partie élastique et une partie de déformation plastique.

Pour le composite (Epoxy-Carbone) : $A_{fv} < A_{cm}$

 Comportement purement élastique jusqu'à sa rupture.

$$4. \quad \sigma_m = E_m \cdot A_{fc} = E_m \cdot \frac{R_{mf}}{E_f} = \frac{3 \times 3}{200} = 45 \text{ MPa}$$

On applique la règle des mélanges aux contraintes s'exerçant dans les composants à l'instant de la rupture des fibres de carbone.

$$R_{mc} = E_{fv} \cdot R_{mf} + (1 - V_{fv}) \sigma_m = (0,2 \times 3000) + (0,8 \times 45) = 636 \text{ MPa}$$

Exercice 2

Un composite est fait d'une matrice de polyester ($E_m = 3,4 \text{ GPa}$) qui est renforcée de 40 % volumique de fibres de verre continues alignées ($E_f = 70 \text{ GPa}$).

1. Calculez le module d'Young longitudinal E_c (en GPa) de ce composite
2. Si l'on applique une contrainte longitudinale de 60 MPa sur une section 300 mm² de ce composite, quelles sont les forces F_m et F_f (en KN) qui s'exercent respectivement sur la matrice et sur les fibres.
3. Quelle déformation ϵ (en %) subit la matrice et les fibres pour cette contrainte de 60 MPa?
4. Si la résistance à la traction des fibres et celle de la matrice sont respectivement égales à 3 GPa et 70 MPa, quelle est la résistance à la traction R_{mc} (en MPa) du composite.

Solution

1. Module d'Young du composite

En utilisant l'équation de la loi des mélanges, on obtient cette grandeur :

$$E_c = [(0,4 \times 70) + (0,6 \times 3,4)] = 30,04 \text{ GPa} \quad \quad \quad E_c = \mathbf{30.04 GPa}$$

2. Forces sur la matrice et sur les fibres pour une contrainte de 60 MPa

En utilisant les équations déduites de l'hypothèse d'une même déformation dans les fibres comme dans les matrices :

$$\epsilon_f = \epsilon_m \quad \text{d'où} \quad \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

Nous pouvons démontrer aisément que le rapport de la force F_f appliquée sur les fibres à celle F_m s'exerçant sur la matrice est égal

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{V_f \times E_f}{V_m \times E_m}$$

Ce qui, dans le cas présent, donne la valeur suivante :

$$\mathbf{F_f/F_m=13.73}$$

Sur la section supportant les charges, la force totale F_t ou force composite F_c qui s'y exerce est égale à la somme de la force F_m s'exerçant sur la matrice et de celle F_f s'exerçant sur les fibres :

$$F_t = \sigma_c \cdot S_c = F_m + F_f$$

En tenant compte du résultat obtenu en (1) et des données du problème, nous écrivons :

$$F_t = 18 \text{ KN} = F_m + 13.73 F_m = 14.73 F_m \quad \text{soit } F_m = 1.22 \text{ KN}$$

$$\text{Et donc } F_t = 16.78 \text{ KN}$$

3. Déformation de la matrice et des fibres pour une contrainte de 60 MPa

Dans un composite à fibres continues alignées soumis à une force longitudinale, la déformation ϵ_f des fibres, celle ϵ_m de la matrice et celle ϵ_c du composite sont toutes égales.

Il suffit donc de calculer, grâce à la loi de Hooke, la déformation ϵ_c du composite pour la contrainte considérée :

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f = \frac{\sigma_c}{E_c} = (60 \text{ MPa} / 30 \text{ GPa}) = 2 \times 10^{-3} = 0,2 \%$$

4. Résistance à traction du composite

Il faut tout d'abord vérifier lequel parmi le renfort ou la matrice qui se rompt en premier en calculant leur allongement respectif à la rupture, soient A_f et A_m :

$$A_f = (3 \text{ GPa} / 70 \text{ GPa}) = 4,29 \times 10^{-2} = 4,29 \%$$

$$A_m = (70 \text{ MPa} / 3,4 \text{ GPa}) = 2,06 \times 10^{-2} = 2,06 \%$$

Par conséquent, c'est la matrice qui se rompt en premier lieu car $A_m < A_f$. En utilisant la règle des mélanges qu'on applique aux contraintes, on en déduit la résistance à la traction du composite :

$$R_{mc} = (1 - V_f) R_{mm} + V_f \times \sigma_f$$

$$\text{Avec : } \sigma_f = E_f \times A_m = E_f (R_{mm} / E_m) = 70 \text{ GPa} \times 2,06 \times 10^{-2} = 1,442 \text{ GPa}$$

$$\text{Donc : } R_{mc} = (0,6 \times 70) + (0,4 \times 1442) \text{ MPa} = 618,8 \text{ MPa} \approx 619 \text{ MPa}$$

$$R_{mc} = 619 \text{ MPa}$$