
Chap. 4

Comportement des matériaux composites

Contenu :

- ☞ *Technologies de mise en œuvre*
- ☞ *Caractérisation mécanique des composites*

Plan de cours

Objectifs généraux

- ☞ Connaître un matériau composite.

Objectifs spécifiques

- ☞ Connaître les caractéristiques des renforts.
- ☞ Connaître les caractéristiques de la matrice.
- ☞ Définir les caractéristiques du matériau composite à partir de celles des fibres et de matrice dans le cas d'un composite unidirectionnel

Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 3 séances de 1h:30min réparties comme suit :

- ☞ Première séance : Matériaux composites : Technologies de mise en œuvre
- ☞ Deuxième séance : Calcul d'homogénéisation d'un matériau composite
- ☞ Troisième séance : Correction d'une application de synthèse

Pré requis

- ☞ Caractérisation mécaniques via un essai de traction monotone
- ☞ Elaboration des métaux et alliages

Evaluation

Réussir plus de 70% des applications et des TD proposés

Sommaire

Introduction	72
1. Technologies de mise en œuvre	72
1.1. Moulage au contact	72
1.2. Moulage par projection simultanée	72
1.3. Moulage par injection basse pression de résine - RTM	73
1.4. Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression	73
2. Calcul d'homogénéisation des composites	74
2.1. Fraction volumique	74
2.2. Fraction massique	75
2.3. Relation entre fraction volumique et massique	75
2.4. Evaluation des constants élastiques d'un composite unidirectionnelle	75
2.4.1. Module d'Young longitudinal : forces parallèles à la direction de la charge	76
2.4.2. Module d'Young transversal : forces perpendiculaire la direction des fibres	76
2.4.3. Coefficient de poisson longitudinal	77
3. Application de synthèse 1	78
4. Application de synthèse 2	79

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 à structure composite.

Les matériaux composites obtenus généralement par moulage sont très hétérogènes et anisotropes. Il faut différencier entre les concepts charges et renforts dans la classification des fibres. Les charges, sous forme d'éléments fragmentés, 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,...). Les renforts, sous forme de fibres longs, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

1. Technologies de mise en œuvre

1.1. Moulage au contact

Est un procédé manuel (élaboration à façon) pour la réalisation de structures à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule approprié et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée puis détournée.

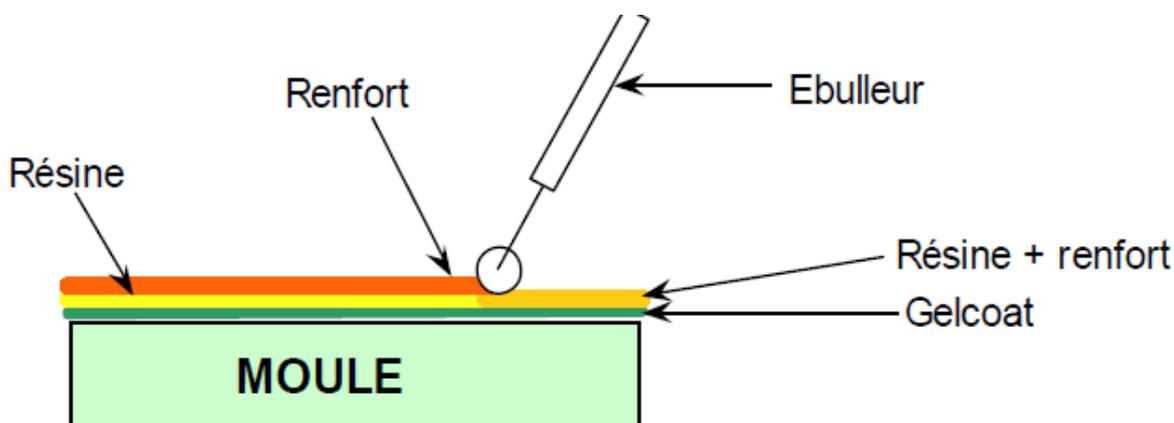


Fig.4.1. Moulage au contact

1.2. Moulage par projection simultanée

Est également un procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines, encore à l'état liquide, thermodurcissables et à température ambiante 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
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface préparée du moule puis compactés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine injectée pré-accélérée est catalysée en continu lors de sa projection

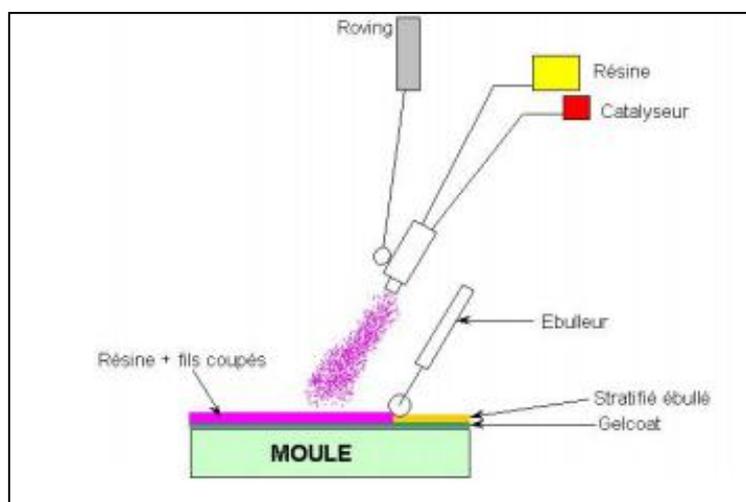


Fig.4.2. Moulage par projection simultanée

1.3. Moulage par injection basse pression de résine - RTM

Le procédé de moulage par injection de résine liquide RTM (*Resin Transfer Moulding*) s'effectue entre moule et contre-moule, les deux rigides. Le renfort (mats, préforme, ou parfois tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, sous injectée sous faible pression (1.5 à 4.5 bars) et ce, à travers le renfort jusqu'à un remplissage complet de l'empreinte adéquat. Par la suite, le durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce devrait démoulée.

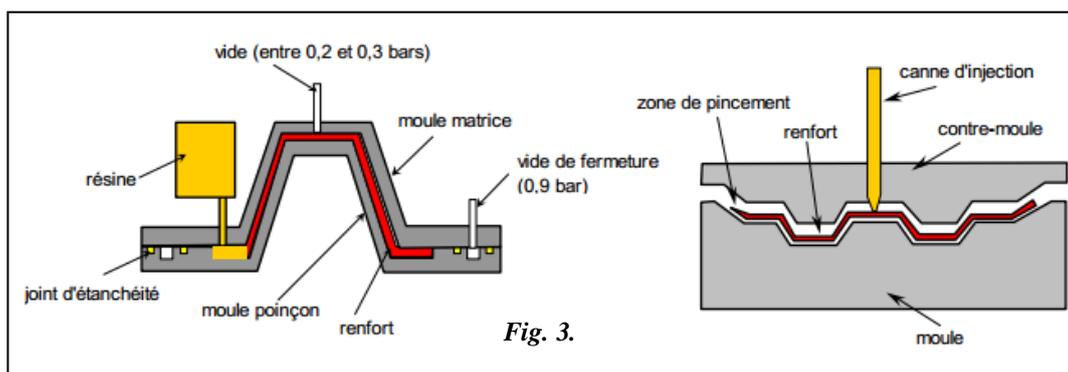


Fig.4.3. Moulage par injection basse pression de résine

1.4. Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression

C'est un procédé de moulage à l'aide d'une presse à compression entre moule et contre-moule rigides en composite, initialement sans apport thermique extérieur. Moule ouvert, le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule et la résine, dotée d'un système catalytique très réactif, est versée en vrac sur le renfort.

La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule due à l'exotherme de la réaction, ce qui permet un démoulage rapide.

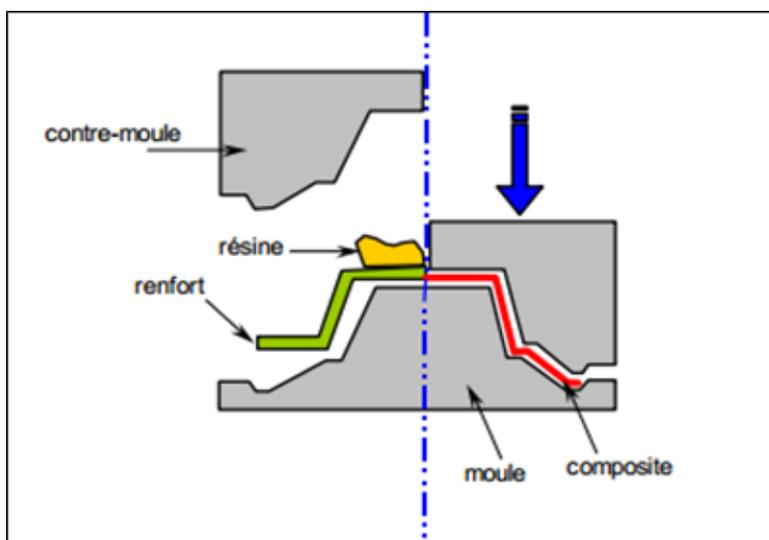


Fig.4.4. Moulage à la presse à froid à basse pression

Les performances du procédé peuvent être considérablement améliorées par l'usage de moules métalloplastiques, voire métalliques, et d'un système de régulation thermique basse température.

2. 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 unidirectionnelle suivant :

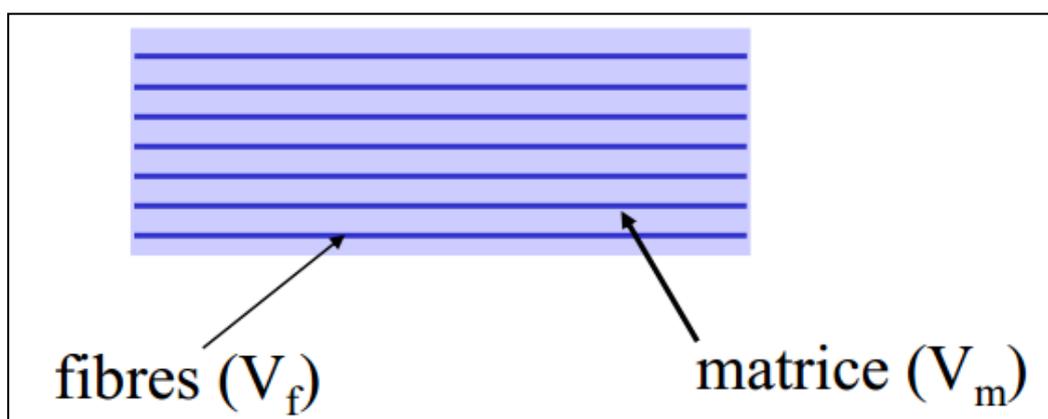


Fig. 4.5. Structure d'un matériau composite

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 unidirectionnelle est supposé se comporte 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.

2.1. Fraction volumique

Considérons un volume v_c du matériau composite, composé d'un volume v_f du fibre et d'un volume V_m de la matrice. 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 :

- $V_m = 1 - V_f$
- $v_c = v_f + v_m$

2.2. Fraction massique

Considérons la masse W_c du matériau composite, composé d'une masse W_f la fibre et une masse W_m de la matrice. Les fractions massiques des fibres et de la matrice sont :

- $P_f = \frac{W_f}{W_c}$
- $P_m = \frac{W_m}{W_c}$

Avec:

- $P_f + P_m = 1$
- $W_c = W_m + W_f$

2.3. Relation entre fraction volumique et massique

$$W_c = \rho_c v_c$$

$$W_f = \rho_f v_f$$

$$W_m = \rho_m v_m$$

$$\text{Or } W_m + W_f = W_c \implies \begin{cases} \rho_f v_f + \rho_m v_m = \rho_c v_c \\ \rho_f \frac{v_f}{v_c} + \rho_m \frac{v_m}{v_c} = \rho_c \end{cases}$$

$$\implies \rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

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

De plus : $v_c = v_f + v_m$

$$\begin{aligned}\frac{W_c}{\rho_c} &= \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \\ &= \frac{W_f \rho_m + W_m \rho_f}{\rho_m \rho_f} \\ \frac{\rho_c}{W_c} &= \frac{\rho_m \rho_f}{W_f \rho_m + W_m \rho_f}\end{aligned}$$

Ce qui donne : $\rho_c = \frac{\rho_m \rho_f W_c}{W_f \rho_m + W_m \rho_f} = \frac{1}{\frac{W_f \rho_m}{W_c \rho_f \rho_m} + \frac{W_m \rho_f}{W_c \rho_f \rho_m}}$

Finalement : $\rho_c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P}{\rho_m}}$

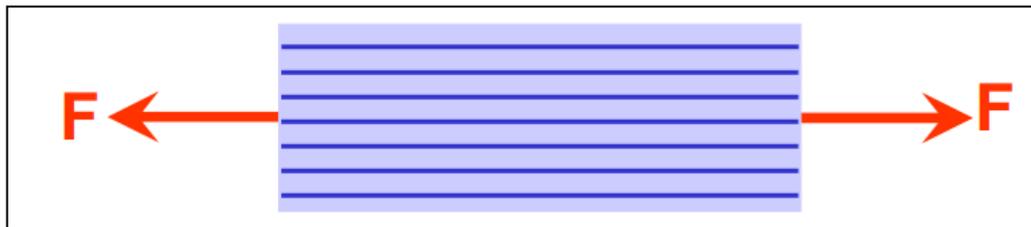
Sachant que : $P_f = \frac{W_f}{W_c} = \frac{\rho_f v_f}{\rho_c v_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot V_f$

$\implies P_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot V_f$ Et $P_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} \cdot V_m$ Donc : $V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} P_f$ et $V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} P_m$

2.4. Evaluation des constantes élastiques d'un composite unidirectionnelle

2.4.1. 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 $\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$. L'identité de la déformation dans la fibre et dans la matrice impose $\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_L$



De plus, on a : $\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = E_f \cdot \varepsilon_L$ et $\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m = E_m \cdot \varepsilon_L$

Donc, la force : $F_f = \sigma_f \cdot S_f = E_f \cdot \varepsilon_L \cdot S_f$ et $F_m = \sigma_m \cdot S_m = E_m \cdot \varepsilon_L \cdot S_m$

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

Sachant que : $F_1 = F_f + F_m$ ce qui donne $F_1 = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m$

Soit S l'aire de la section droite du composite, donc : $\sigma_1 = \frac{F_1}{S}$

Et par conséquent l'équation (A) nous donne :

$$\frac{F_1}{S} = \sigma_f \cdot \frac{S_f}{S} + \sigma_m \cdot \frac{S_m}{S}$$

Ainsi, $\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$ ou encore $\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$

(b)

Sachant que : $\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1$

$$(b) \implies E_1 \cdot \varepsilon_1 = E_f V_f \varepsilon_1 + E_m \varepsilon_1 (1 - V_f)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

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

2.4.2. Module d'Young transversal : forces perpendiculaire la direction des fibres

Le module d'Young transversal est déterminé dans un essai de traction transversal où le composite est chargé suivant la direction normal de la fibre. On définit :

$$V_f = \frac{h_f}{h_m + h_f} \text{ et } V_m = 1 - V_f = \frac{h_m}{h_f + h_m}$$

Dans ce cas on a : $\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_f$

$$\text{Donc, } \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_2}{E_f}$$

$$\text{Et : } \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_2}{E_m}$$

Sachant que l'allongement du composite est défini par : $\Delta l_2 = \Delta l_f + \Delta l_m$ ce qui donne :

$$\Delta l_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \text{ et la déformation du composite est donné par : } \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{h_t}$$

$$\text{Ainsi : } \frac{\Delta l_2}{h_t} = \frac{\Delta l_2}{h_f + h_m} = \frac{\varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m}{h_f + h_m}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f \frac{h_f}{h_f + h_m} + \varepsilon_m \frac{h_m}{h_f + h_m}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) \quad c$$

$$\text{Si : } \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \implies \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m}; \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \text{ ainsi : } \frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\sigma_2}{E_f} V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} (1 - V_f)$$

Et finalement on obtient : $\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m}$

2.4.3. Coefficient de poisson longitudinal

Par essai de traction, l'allongement du composite sera Δl et sa déformation sera : $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{L}$ avec : $\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1$, Pour la déformation dans la direction 2 on a :

- Pour la fibre : $\varepsilon_{2f} = -\gamma_f \varepsilon_1$
- Pour la matrice : $\varepsilon_{2m} = -\gamma_m \varepsilon_1$

L'allongement transversal du composite est : $\Delta h = \Delta h_f + \Delta h_m$

$$\begin{aligned}\Delta h &= \varepsilon_{2f} h_f + \varepsilon_{2m} h_m \\ &= -\gamma_f \varepsilon_1 h_f - \gamma_m \varepsilon_1 h_m\end{aligned}$$

Et la déformation totale du composite:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta h}{h_m + h_f}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_2 = \frac{-\gamma_f \varepsilon_1 h_f - \gamma_m \varepsilon_1 h_m}{h_m + h_f} = \left(\frac{-\gamma_f h_f}{h_m + h_f} - \frac{\gamma_m h_m}{h_m + h_f} \right) \varepsilon_1$$

$$\frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f)$$

3. Application de synthèse 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)	R _e (Mpa)	R _m (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 E_c .
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} (Mpa).

Solution :

- $E_c = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$
 $= (0.2 \times 200) + (0.8 \times 3) = 42.4 \text{ GPa}$
- Fraction volumique requise des fibres de verre :

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

Ce qui donne:

$$V_{fv} = \frac{(E_c - E_m)}{(E_{fv} - E_m)} = \frac{42.2 - 3}{75 - 3} = 0.547 = 54.7\%$$

- Composite ayant un comportement purement élastique :

- Allongement à la rupture des fibres :

$$\checkmark A_{fc} = \frac{R_{mf}}{E_f} = \frac{3}{200} = 1.5\%$$

$$\checkmark A_{fv} = \frac{R_{mf}}{E_f} = \frac{1.8}{75} = 2.4\%$$

- 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) : $A_{cm} > A_{fc}$

⇒ Comportement purement élastique jusqu'à sa rupture.

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

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

$$R_{mc} = V_{fc} R_{mf} + (1 - V_{fc}) \sigma_m = (0.2 \times 3000) + (0.8 \times 45) = 636 \text{ Mpa}$$

4. Application de synthèse 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 ($E_f = 70 \text{ GPa}$).

- 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 :

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

$$E_c = 30,04 \text{ GPa}$$

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 :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m \text{ d'où } \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

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 à :

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

Ce qui, dans le cas présent, donne la valeur suivante : $F_f/F_m = 13,73$ (1)

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 :

$$F_t = \sigma \cdot S = F_m + F_f$$

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

$$F_t = 18 \text{ kN} = F_m + 13,73 F_m = 14,73 F_m, \text{ soit } F_m = 1,22 \text{ kN}$$

$$\text{Et donc } F_t = 16,78 \text{ kN}$$

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:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f = \sigma/E_c = (60 \text{ MPa}/30 \text{ GPa}) = 2 \times 10^{-3} = 0,2 \%$$

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 :

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

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

$$\text{Donc : } R_{mc} = (0,6 \times 70) + (0,4 \times 1\,442) \text{ MPa} = 618,8 \text{ MPa} \approx 619 \text{ MPa}$$

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

Annexe : Caractéristiques des composites usuelles

Les renforts : Caractéristiques moyennes des fibres usuels

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C_r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-5}$
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-5}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

Fibres	Polyamides aromatiques : aramides (Kevlar®)		Poly-esters saturés	Polyéthylène à haut module (PEHM)
	Kevlar 29®	Kevlar 49®		
Caractéristiques principales	Résistance en traction, au choc et à la fatigue	Résistance en traction, au choc et à la fatigue, haut module	Faible coût	Résistance en traction et au choc, rigidité
Masse volumique (Mg/m^3)	1,44	1,45	1,3	0,97
Résistance à la traction R_m (MPa)	3 000	3 600	1 200	3 000
Module de Young E (GPa)	60	134	14	100
Allongement à la rupture A (%)	7	3,5	12	5
Température maximale d'utilisation ($^{\circ}\text{C}$)	200	200	100	100
Applications	Câbles, pneumatiques	Composites à hautes performances, voiles.		Blindages, casques coques de bateaux

Les matrices : Cannes des matrices usuelles

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"

Principales différences entre matrices TP et TD

Matrices TD	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
	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 ⁻⁵
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 ⁻⁵
Polyester	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 ⁻⁵
Polycarbonate	1 200	2 400		0,35	60		6*10 ⁻⁵
Vinylester	1 150	3 300			75	4	5*10 ⁻⁵
silicone	1 100	2 200		0,5	35		
Uréthanne	1 100	700 à 7 000			30	100	
Polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	8*10 ⁻⁵

Matrices TP	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
	Mv	E	G	k	C _r	A	α
PP	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 ⁻⁵
PPS	1 300	4 000			65	100	5*10 ⁻⁵
PA	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 ⁻⁵
PES	1 350	3 000			85	60	6*10 ⁻⁵
PEI	1 150	3 300			105	60	6*10 ⁻⁵
PEEK	1 300	4 000			90	50	5*10 ⁻⁵