

Les composites

Les matériaux composites

combinent, par définition,
des matériaux différents

matrice **notée m**

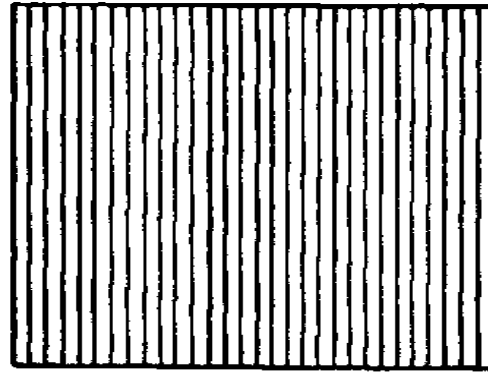
renforts, **notés f**

avec des propriétés physiques et
mécaniques très différentes.

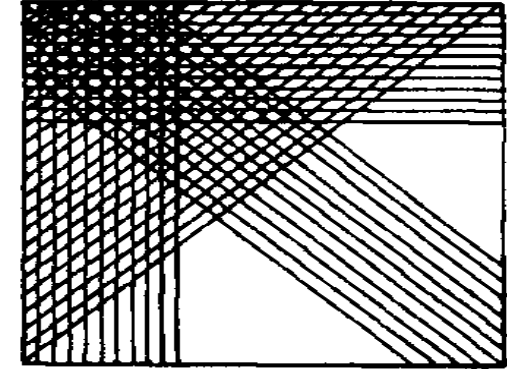
Les composites offrent une infinité
de combinaisons de ces propriétés
selon les besoins.

Ce sont des matériaux "**à la
carte**", obtenus en modifiant la
nature des constituants, leurs
arrangements et leurs quantités
respectives.

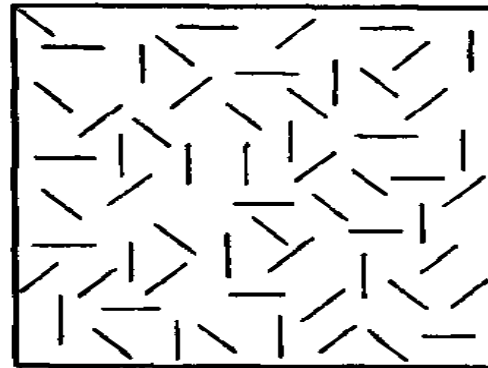
Les aspects géométriques sont
fondamentaux pour comprendre
leurs comportements



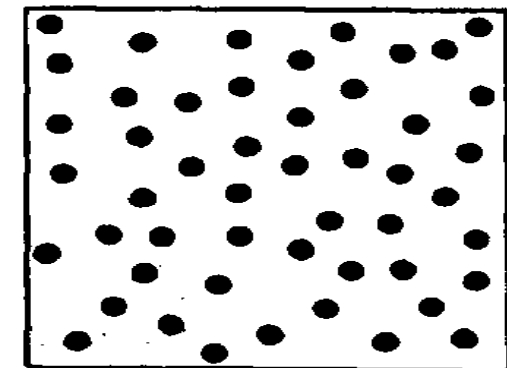
UNIDIRECTIONAL



LAMINATES



CHOPPED-FIBRE



PARTICULATES

Schematic of composites: unidirectional fibrous composite, laminated composite, chopped-fibre composite, and particulate composite.

Mais les propriétés des composites sont aussi très liées ...

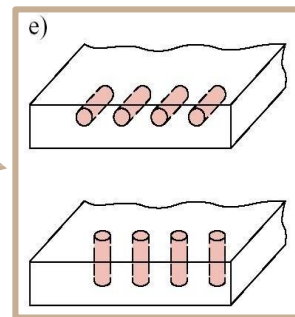
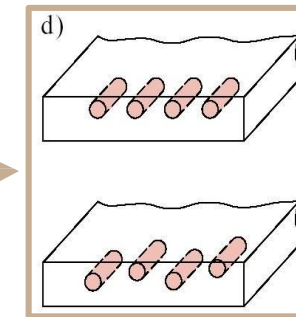
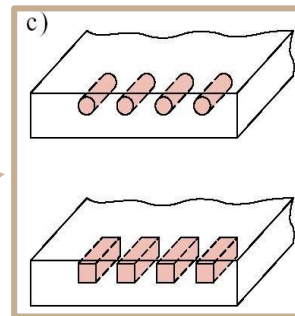
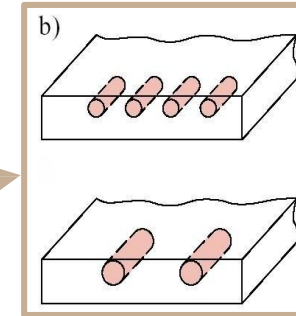
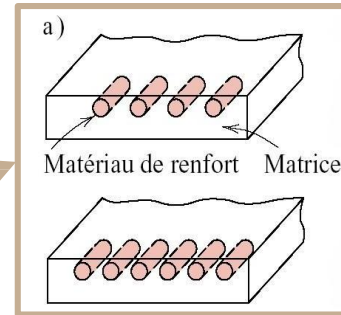
◆ à la **quantité relative** de renforts

◆ à leurs **dimensions**

◆ à leurs **formes**

◆ à leur **répartition**

◆ à leurs **orientations**



La micromécanique

Pour chaque matériau constitutif
on définit :

◆ v_i : volume du constituant i
volume total du composite

$$v_c = \sum v_i$$

◆ V_i : fraction volumique du constituant i

$$V_i = v_i / v_c$$

◆ m_i : poids du constituant i
poids total du composite

$$m_c = \sum m_i$$

◆ M_i : fraction massique du constituant i

$$M_i = m_i / m_c$$

◆ ρ_i : masse volumique du constituant i
masse volumique du composite

$$\rho_i = m_i / v_i$$

$$\rho_c = m_c / v_c$$

⇒ La relation entre V_f , V_m et V_v peut être exprimée par:

$$V_f + V_m + V_v = 1$$

Dans le cas de 2 constituants
f (renfort) et m (matrice)
on peut simplifier les équations
en écrivant :

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

si $V_v = 0$ (ou négligeable) → $V_m = 1 - V_f$

donc

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

V_v est généralement de l'ordre de quelques pour cents, cependant son effet ne sera pas pris en considération dans cette étude ($V_v \cong 0$).
La relation devient:

$$V_f + V_m = 1$$

⇒ Il faut noter que les composites utilisés dans le secteur industriel ont une fraction de fibres en volume (V_f) variable entre 40% et 60%.

Relation entre le pourcentage massique ($M_f\%$) et volumique ($V_f\%$) de fibre :

Il est relativement facile de connaître le pourcentage massique de fibre par une pyrolyse d'un échantillon de composite :

Dans la démonstration qui suit, nous supposons que la totalité du volume est occupée par le renfort et la matrice.

Si :

$M_f\%$ = le pourcentage massique (fraction massique ou fraction en masse) de fibre

$V_f\%$ = le pourcentage volumique (fraction volumique ou fraction en volume) de fibre

ρ_f = la masse volumique de fibre

ρ_m = la masse volumique de matrice

$$V_f (\%) = [v_f / (v_f + v_m)] \cdot 100$$

et

$$M_f (\%) = [m_f / (m_f + m_m)] \cdot 100$$

où v désigne le volume, m la masse, et les indices f et m sont relatifs à la fibre et à la matrice.

La fraction volumique de la fibre :

où v désigne le volume, m la masse, et les indices f et m sont relatifs à la fibre et à la matrice.

$$V_f = v_f / v_c$$

$$V_m = v_m / v_c$$

$$V_c = V_f + V_m = 1$$

$$V_f = 1 - V_m$$

$$\text{Puisque : } v_c = v_f + v_m$$

La fraction massique de la fibre :

$$M_f = m_f / m_c$$

$$M_m = m_m / m_c$$

$$M_c = M_f + M_m = 1$$

$$M_m = 1 - M_f$$

Puisque : $m_c = m_f + m_m$

• Relation entre teneur en volume et teneur en masse

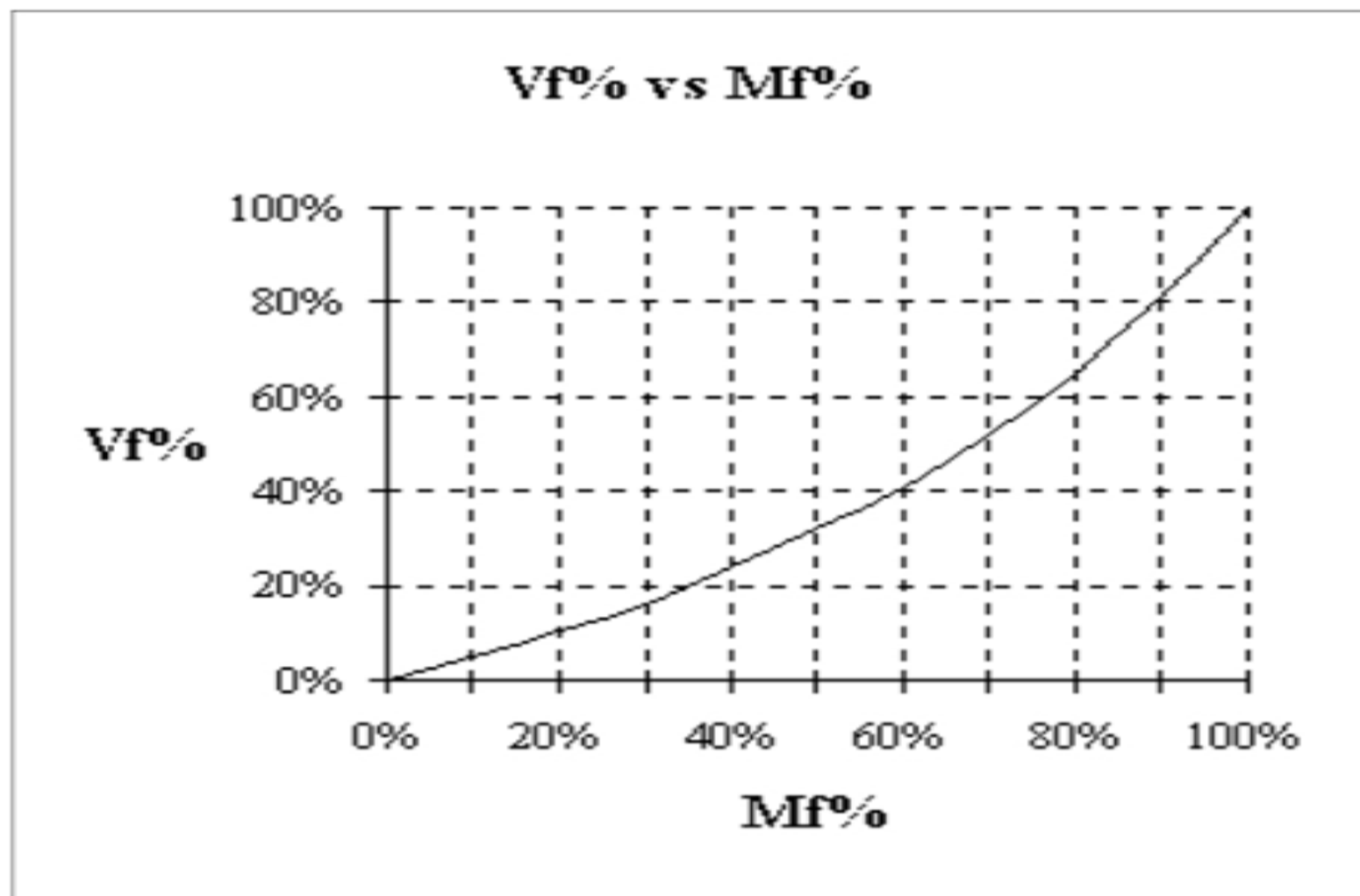
⇒ La relation entre (V_f) et (M_f) est donnée par l'expression:

$$V_f = \frac{M_f}{M_f + \left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right) \times (1 - M_f)}$$

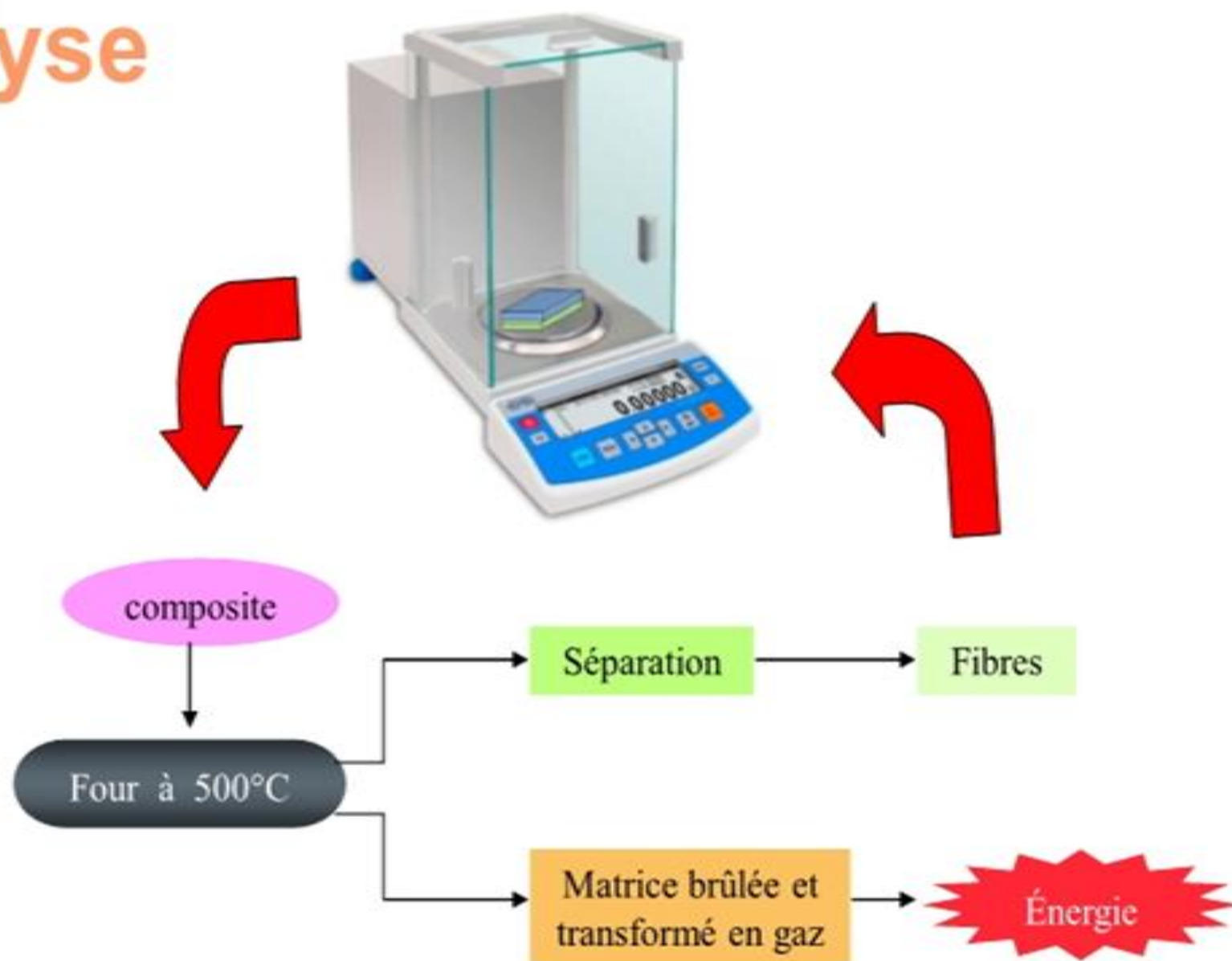
ou

$$M_f = \frac{V_f}{V_f + \left(\frac{\rho_m}{\rho_f}\right) \times (1 - V_f)}$$

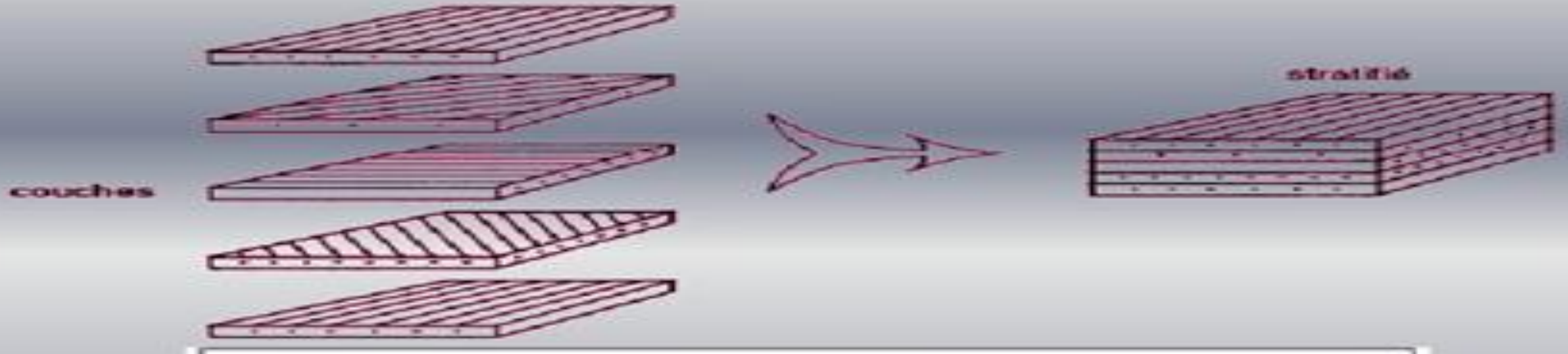
⇒ La figure suivante montre l'évolution de (V_f) en fonction de (M_f) avec des densités de 2.6 pour les fibres et 1.2 pour la résine.



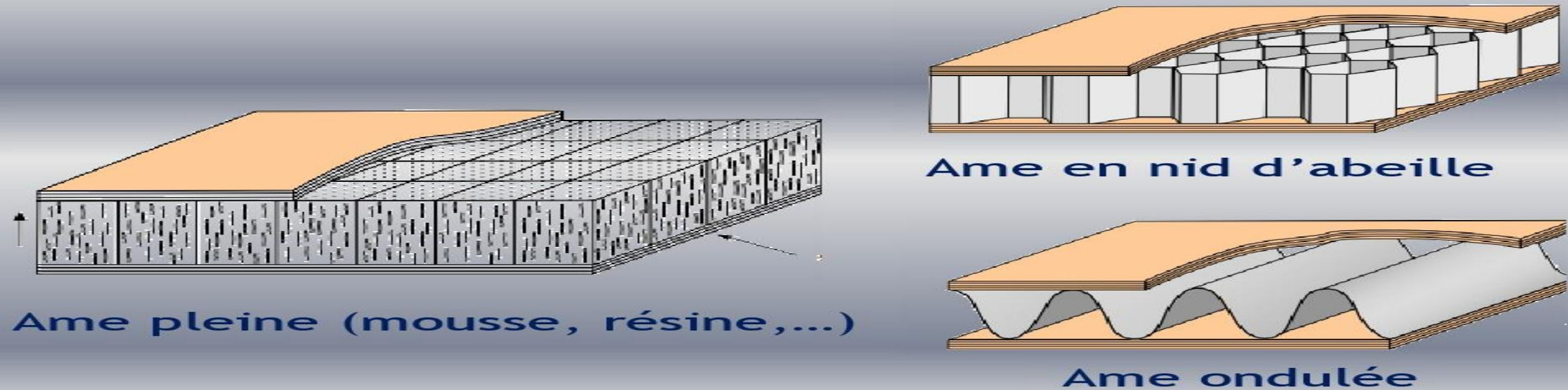
• Pyrolyse



Stratifié



Sandwich

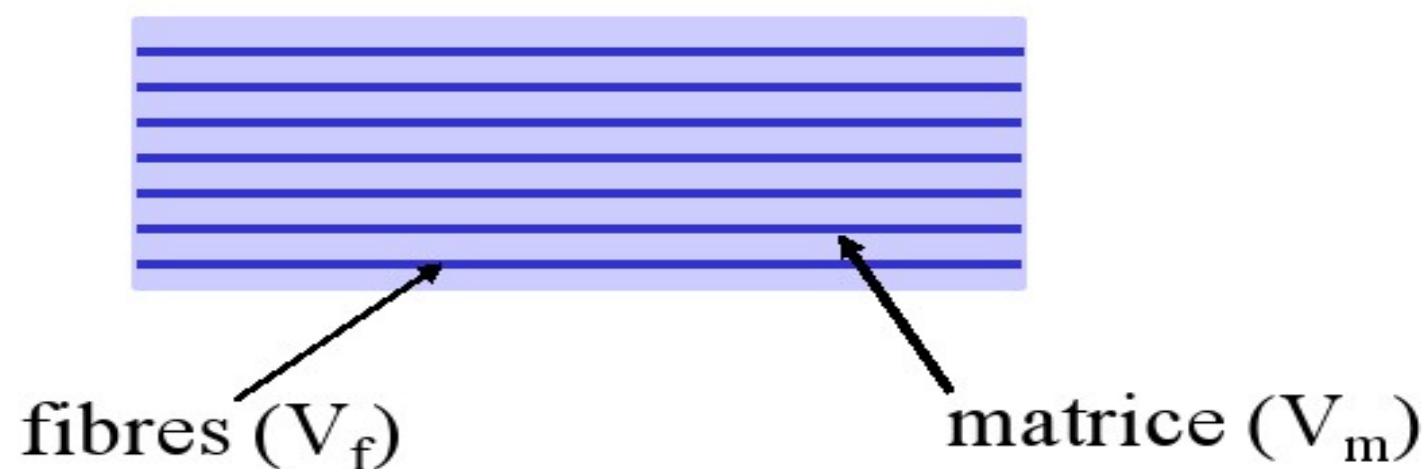


Quelques rappels de mécanique

- **Théories d'homogénéisation:** permettent de calculer les caractéristiques mécaniques du matériaux homogénéisé à partir des caractéristiques des phases et de la fraction volumique V_f
- Théorie classique (lois des mélanges)

$$\begin{aligned} E_1 &= V_f E_f + (1 - V_f) E_m \\ \nu_{12} &= V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m \\ E_2 &= \frac{E_f E_m}{V_f E_m + (1 - V_f) E_f} \\ G_{12} &= \frac{G_f G_m}{V_f G_m + (1 - V_f) G_f} \end{aligned}$$

Calcul des caractéristiques des matériaux composites : fibres continues unidirectionnelles



V_f est la fraction volumique de fibres dans le composite

$$V_c = V_f + V_m = 1$$

$$V_m = 1 - V_f$$

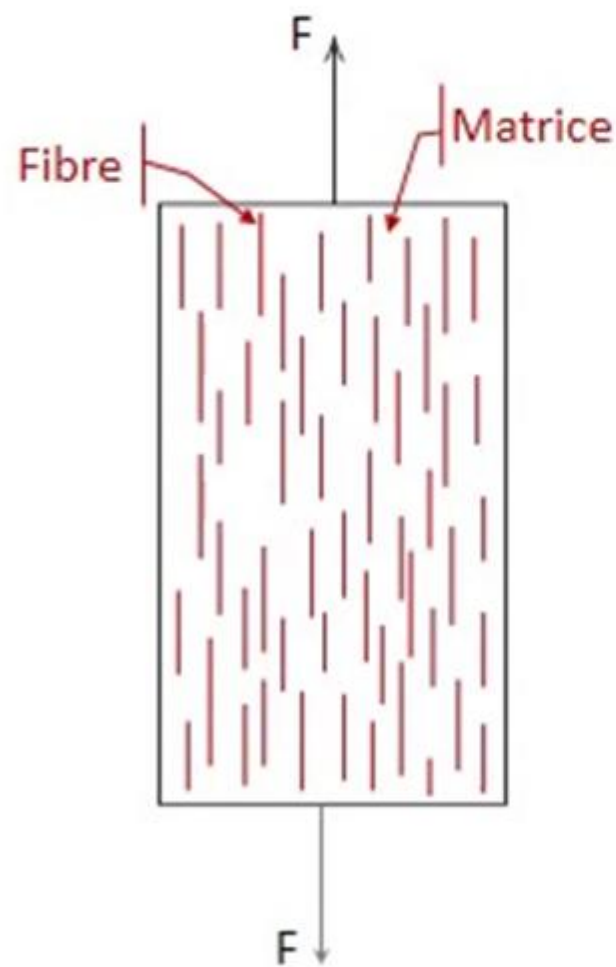
Masse volumique du composite :

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

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

Relations orientations des fibres / propriétés

- Chargement // aux fibres (*Comportement longitudinal*)



$$F_c = F_m + F_f$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

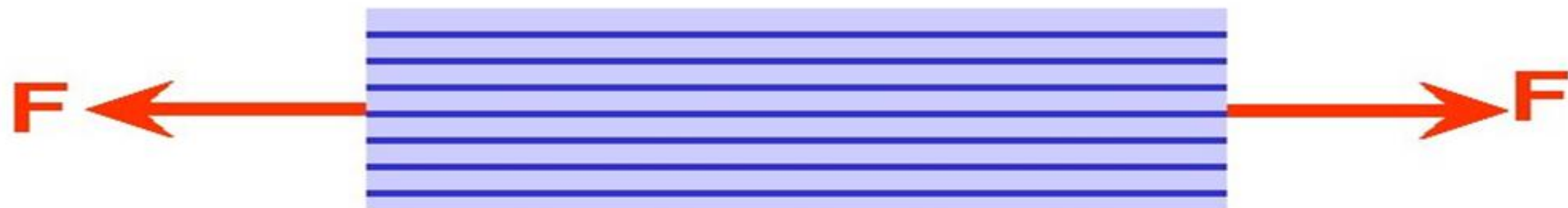
$$\varepsilon_c E_{cl} = \varepsilon_m E_m V_m + \varepsilon_f E_f V_f, \text{ or } \varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$E_{cl} = V_m E_m + V_f E_f = (1 - V_f) E_m + V_f E_f$$

avec :

$$\frac{A_f}{A_c} = V_f, \quad \frac{A_m}{A_c} = V_m$$

Force appliquée // fibres



déformation identique dans la fibre et la matrice

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{//} = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

avec :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$V_m = 1 - V_f$$

$$\sigma_c = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m$$

$$\sigma_c = V_f \varepsilon_f E_f + (1 - V_f) \varepsilon_m E_m$$

$$E = \sigma_n / \varepsilon_{//} \quad \text{donc}$$

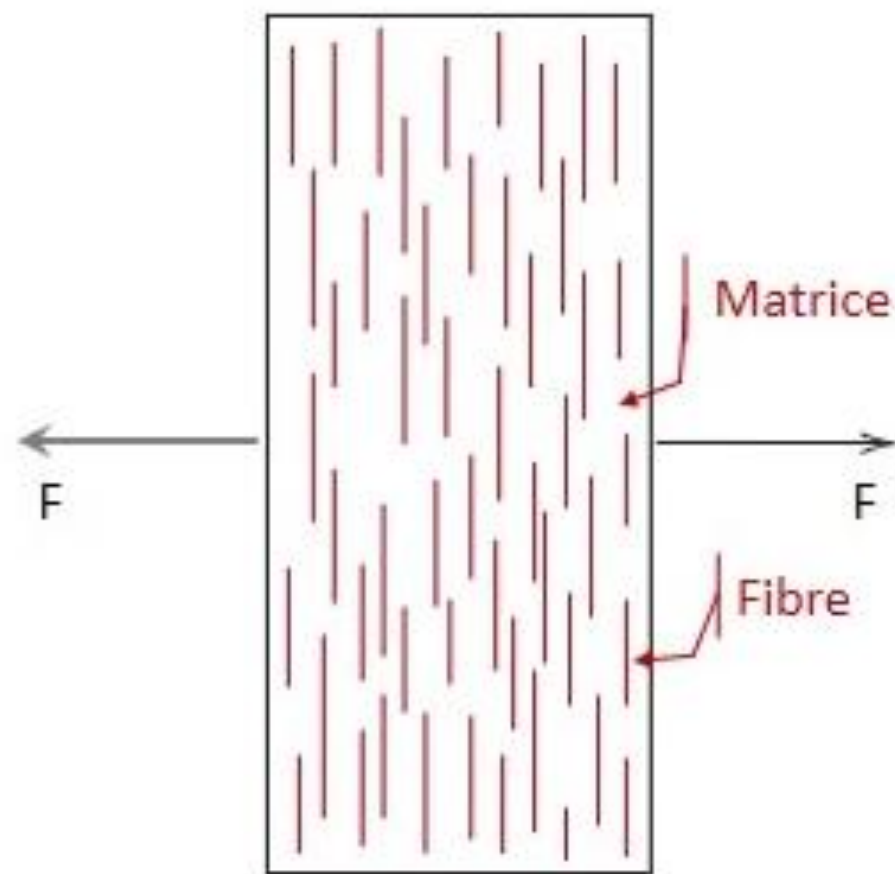
$$E_{c//} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

$$E_{c//} = V_f E_f + V_m E_m$$

Relations orientations des fibres / propriétés

- Chargement $\perp$ aux fibres (*Comportement transversal*)

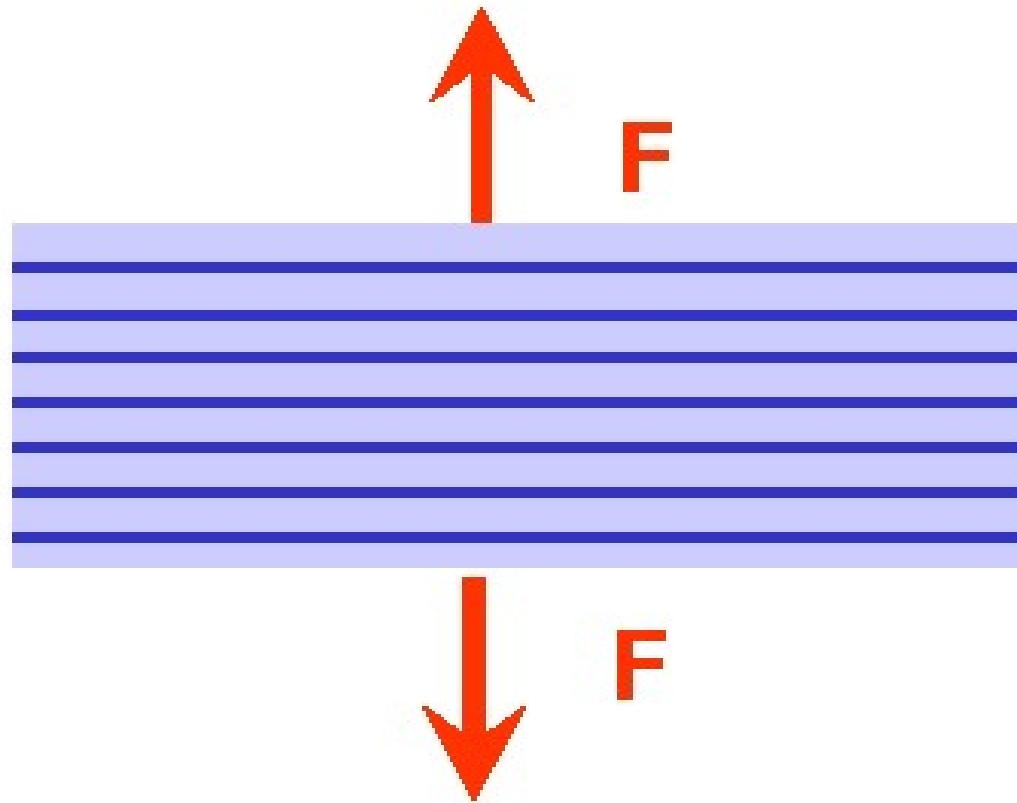
$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f, \varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$



$$\frac{\sigma_c}{E_{ct}} = \frac{\sigma_m}{E_m} V_m + \frac{\sigma_f}{E_f} V_f$$

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

Force appliquée $\perp$ fibres



contrainte identique dans la fibre
et la matrice

$$\sigma_c = \sigma_{\text{normal}} = \sigma_f = \sigma_m$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f + \varepsilon_m$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_c &= V_f \varepsilon_f + (1 - V_f) \varepsilon_m \\ &= V_f \sigma_f / E_f + (1 - V_f) \sigma_m / E_m\end{aligned}$$

$$E = \sigma_n / \varepsilon_n \quad \text{donc}$$

$$E_c^{\perp} = \frac{1}{V_f / E_f + (1 - V_f) / E_m}$$