

Introduction

De très nombreux produits sont actuellement fabriqués en matériaux composites dans des domaines divers tels que l'espace, les transports, le sport, l'électrotechnique, l'électronique, l'électroménager, la propulsion, le nautique, le génie civil, etc.

En associant des renforts à caractéristiques mécaniques et/ou thermomécaniques très élevées avec un liant appelé « matrice » ayant des propriétés généralement plus modestes, on obtient les performances souhaitées. C'est ce principe que nos ancêtres ont également utilisé en construisant des murs en pisé (argile avec renfort en paille), puis en staff (plâtre renforcé par de la filasse). C'est en partant de la même idée que les Mésopotamiens fabriquaient, il y a 4 000 ans, des couffas en toile enduite de bitume pour naviguer sur le Tigre.

En 1880, Thomas Edison savait réaliser des petits filaments en carbone pour les lampes à incandescence mais, pour obtenir des fibres de renforts de plusieurs dizaines de mètres, il a fallu de grands progrès technologiques. Citons quelques dates clés :

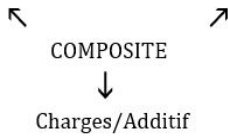
- 1836, invention de la fibre de verre, brevet d'Ignace Dubus-Bonnel (France) ;
- 1860, invention de la fibre de carbone par Joseph Swan, chimiste britannique ;
- 1960, invention de la fibre d'aramide Kevlar par Stephanie Kwolek, chimiste américaine.

Il existe de nombreux types de matériaux composites qui dépendent de :

- la morphologie des constituants élémentaires (trichites, fibres, filaments, sphères) ;

- leur nature respective (organique, alliage métallique, verre, céramique) ;
- leur disposition relative (fibres alignées, croisées, tissées, distribution aléatoire) ;
- la nature des propriétés globales recherchées (mécaniques, magnétiques, optiques, etc.).

Matrices/liants		Éléments renforçants	
Organiques	Phénoliques	Fibres	Cellulose
	Polyesters		Verre ESRCD
	Époxydes		Carbone/graphite
	Polyamides		Aramide
	PSP		Bore
Minérales	Carbone		
Métalliques	Aluminium		



Charges	Additifs
Craie	Catalyseur
Silice – Kaolin	Accélérateur
Oxyde de titane	Agent de démoulage
Verres, billes	Ignifugeant
Fibres courtes	Anti-UV
Poudres métalliques	Fongicide
Quartz	
Mica	

Tableau I.1. Principaux éléments des composites

Fibres	Masse spécifique Kg/m ³	Module E Élastique Traction MPa	Rupture Traction Rm MPa
Polyamide	1 170	6 300	1 300
Polyester	1 400	8 000	550
Nomex	1 200	18 000	≈ 0
Sisal	1 450	45 000	850
Aramide (K29)	1 450	60 000	2 000
Verre E	2 560	75 000	2 000
Verre R	2 500	85 000	3 000
Carbone BM	1 700	180 000	1 800
Aramide (K49)	1 450	140 000	3 000
Amiante	2 200	180 000	2 000
Carbone HR	1 850	220 000	3 000
Acier	7 800	210 000	500 à 2 000
Tungstène	19 200	350 000	2 500
Carbone HM	1 900	400 000	2 200
Bore	2 500	450 000	3 500
SiC	3 200	450 000	2 000
Carbone THM	1 950	650 000	2 000

Tableau I.2. Principaux types de renforts (Geier 1985)

REMARQUE. On utilise également des renforts constitués par des billes de verre creuses, des charges filamenteuses courtes, des tissus volumiques dits « 3D » ou « trois directions », des préformes coniques ou tronconiques réalisées sur métier Jacquard ou des tissus « spirales ».

Caractéristiques	Variétés			
	E	R	S	Silice
Composition chimique (%)				
SiO ₂	54	60	65	> 99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	–
B ₂ O ₃	8	–	–	–
CaO	17	9	–	–
MgO	5	6	10	–
Module de Young (GPa)	75	80	84	72
Résistance à la traction (MPa)				
Fibres vierges	3 400	4 400	4 800	8 800
Fibres industrielles	2 100	2 500	2 800	3 500
Allongement à la rupture (%) (fibres industrielles)	2,8	3	3,3	5
Masse volumique (kg/m³)	2 540	2 500	2 480	2 200
Température de fusion (°C)	900 à 1 200	1 400 à 1 600	1 400 à 1 600	1 720
Température maximale d'utilisation (°C)	550	650	650	750
Propriétés	Bonnes propriétés mécaniques Bonne tenue en corrosion à l'eau Résistance moyenne aux agents chimiques	Très bonnes propriétés mécaniques Bonne tenue en corrosion à l'eau et aux agents chimiques		Propriétés mécaniques élevées Chimiquement inerte Haute résistivité
Utilisations	Le plus répandu	Les plus récents Optimisation des structures		Hautes performances Résistance à l'abrasion

Tableau I.3. Caractéristiques des verres de renfort

Caractéristiques	Kevlar 29 [®]	Kevlar 49 [®]
Module de Young (GPa)	60	130
Résistance à la traction (MPa)	2 700	3 600
Allongement à la rupture (%)	4,5	2
Masse volumique (kg/m ³)	1 450	1 450
Température max. d'utilisation (°C)	200	200
Température de dégradation (°C)	400	425

Tableau I.4. Caractéristiques des fibres d'aramide

Application des composites

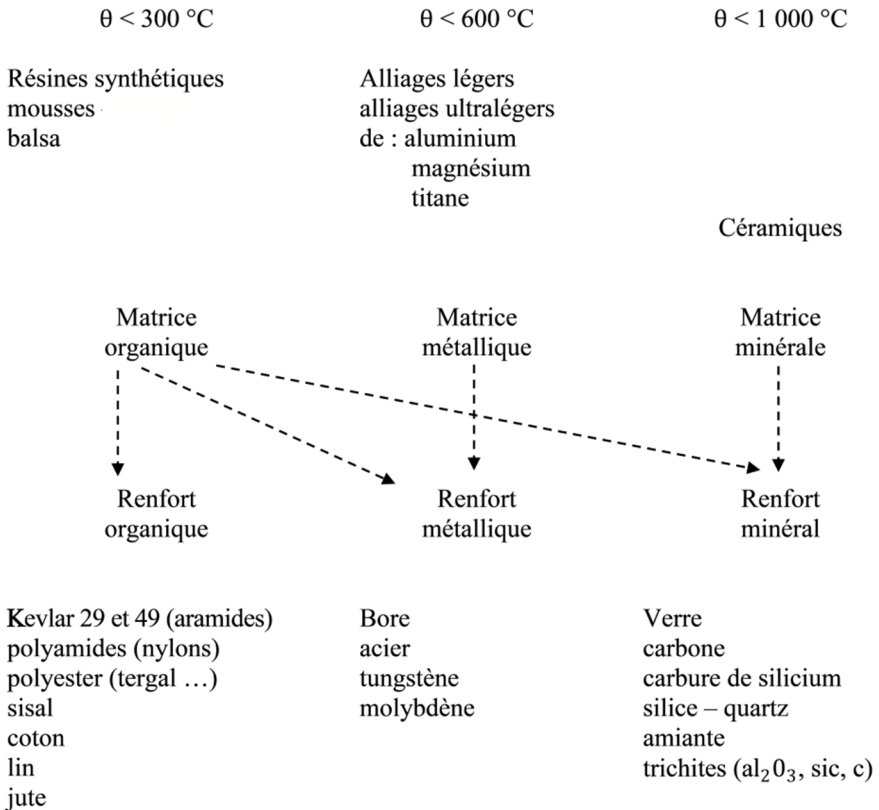


Figure I.1. Domaines d'utilisation (Gegier 1985)

De nombreuses applications sont dues à la mise au point de composites fibreux tels que les polymères renforcés par fibre de verre (PRFV) ou les polymères renforcés par fibre de carbone (PRFC). Par ailleurs, les panneaux en sandwich, qui sont des composites aux surfaces rigides avec à l'intérieur un matériau de faible densité, atteignent d'excellentes caractéristiques mécaniques en combinant pour une plaque les meilleures propriétés de deux éléments très différents.

Les composites peuvent être à renfort particulaire avec des charges comme le sable, des sphères creuses en verre, des particules de carbure de tungstène, etc.

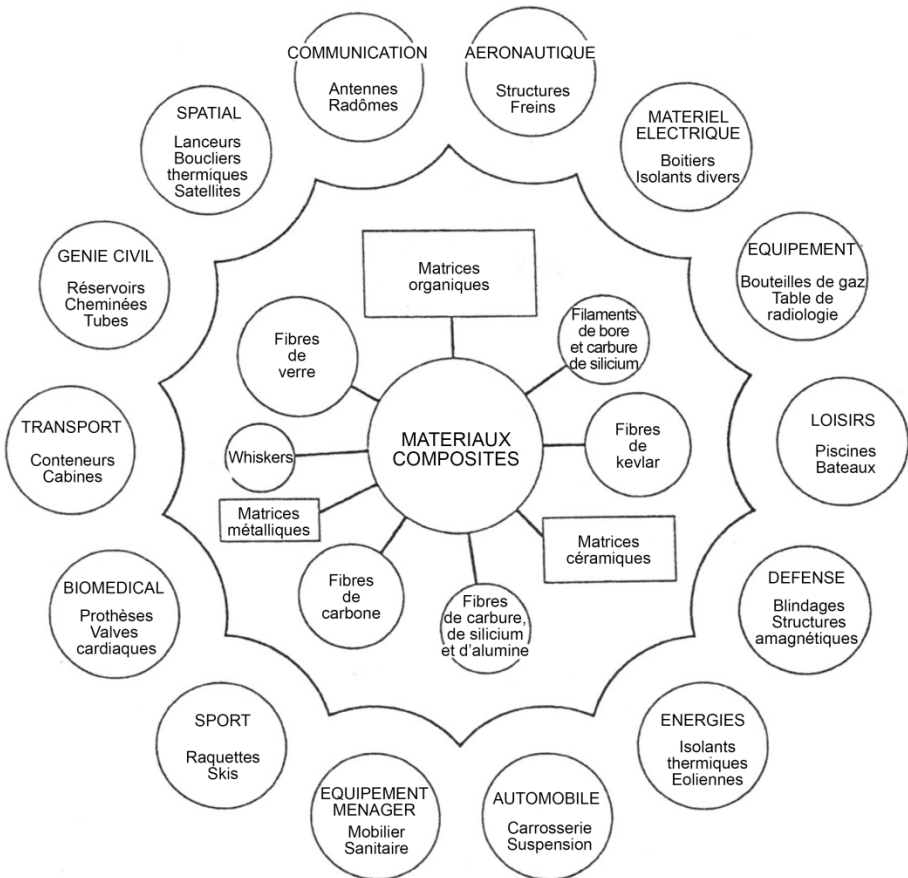


Figure I.2. Exemples d'applications (documentation Usine Nouvelle)

La figure I.2 illustre la variété des secteurs industriels utilisant les matériaux composites.

Les composites carbone-carbone sont essentiellement utilisés pour des applications à haute température, telles que :

- tuyères d’engins spatiaux, fusées réfractaires et résistant à l’abrasion. Les pièces peuvent être usinées dans la masse du composite ou, au contraire, tissées en forme ;
- corps de rentrée de missiles balistiques ;
- disques de freins pour véhicules (avions, voitures de compétition, trains, etc.). Ces disques travaillent en compression, absorbent beaucoup d’énergie et conservent de bonnes propriétés de frottement, jusqu’à 800 °C. Ils permettent de gagner du poids (70 % sur les freins d’Airbus) ;
- applications médicales : une autre voie de développement est l’application aux prothèses osseuses et cardiaques, du fait de la bonne compatibilité avec le corps humain.

Les composites céramiques sont, par exemple :

- silice-résine : anciens corps de rentrée de missiles balistiques ;
- silice-silice : fenêtres d’antenne du corps de rentrée de missiles ;
- sic-sic : roue de turbine fonctionnant à 1 200 °C.

L’art de faire des composites volumiques fibre-matrice est sans limites. Les fibres inorganiques de synthèse, autres que les métaux, et communément appelées céramiques, sont en voie de développement :

- oxydes : silice SiO_2 , alumine Al_2O_3 , zirconie ZrO_2 ;
- carbures : SiC , WC ;
- borures : TiB_2 , B_4C , BN ;
- nitrures : Si_3N_4 , AlN ;
- oxynitrures : Si Al ON , Si Be ON , Si Y ON ;
- titanates : TiAl_2O_5 .

L’objectif est de créer des aubages de turbines à gaz ou des revêtements de chambres de combustion.

Contenu de l'ouvrage

Cet ouvrage est consacré aux composites anisotropes dans lesquels l'un des constituants est utilisé sous forme fibreuse.

À cette famille appartiennent notamment les composites à hautes performances mécaniques et/ou thermiques constitués d'une matrice – généralement légère – enrobant des fibres (ou filaments) à hautes caractéristiques mécaniques.

Nous développons et illustrons diverses applications de composites pour leurs propriétés en raideur, résistance et thermomécanique. Compte tenu de leurs particularités structurales, ciblées pour répondre aux flux d'efforts imposés (voir (Leroy 2024, section 2.2.3)), nous donnons de nombreux exemples pour leurs dimensionnements ; des unidirectionnels, tissus, stratifiés, sandwichs, mousses, charges, etc., sont étudiés dans ce but pour leurs applications.

Les principaux essais de caractérisation sont montrés pour la détermination des propriétés d'élasticité ainsi que l'emploi de critères d'analyse de leurs tenues aux chargements et nous donnons des techniques de calcul permettant diverses stratifications répondant aux flux d'efforts.

Raideurs et résistances spécifiques

Un des avantages importants des composites est le gain de masse. Pour de nombreuses applications, la masse a autant d'importance que la résistance mécanique.

Analyse des raideurs et résistances spécifiques pour la conception de produits

Pour les constructions, si le paramètre important est la raideur spécifique E/Q , rien ne distingue la plupart des métaux tandis que, lorsque c'est $E^{1/2}/Q$, les alliages légers sont meilleurs que les aciers.

Pour le paramètre important $E^{1/3}/Q$ (correspondant à la déformation élastique de plaques en flexion sous l'action d'un chargement réparti), on emploiera par exemple le PRFC, afin de minimiser les flèches élastiques.

Exemples de rigidités optimales

Cas de poutres en traction ou compression

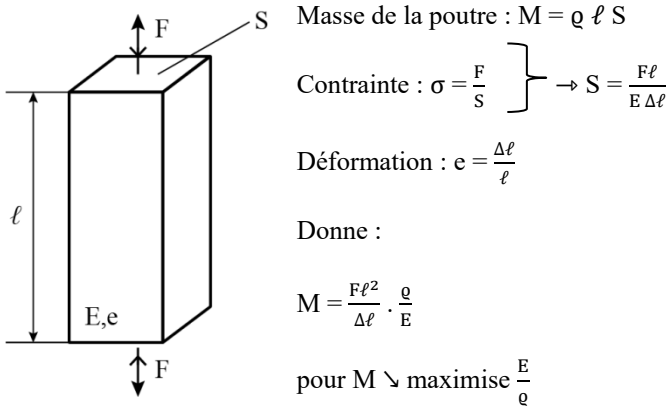


Figure I.3. Pilier

Cas de poutres en flexion

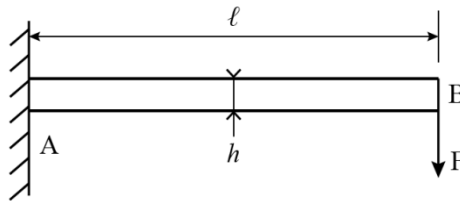


Figure I.4. Poutre encastrée en A. Section : carré $h \times h$.
En (A) encastrement ; en (B) charge F , flèche δ

On a :

$$\delta = \frac{F\ell^3}{3EI} \text{ avec } I = \frac{h^4}{12}$$

$$M = \rho h^2 \ell$$

$$\delta_B = \frac{4F\ell^3}{Eh^4} \rightarrow h^2 = 2 \left(\frac{F\ell^3}{E\delta_B} \right)^{1/2}$$

d'où :

$$M = 2 \left(\frac{F \ell^5}{\delta_B} \right)^{1/2} \frac{q}{E^{1/2}}$$

pour $M \searrow$ maximise $\frac{E^{1/2}}{q}$.

Cas de plaques avec chargement uniformément réparti

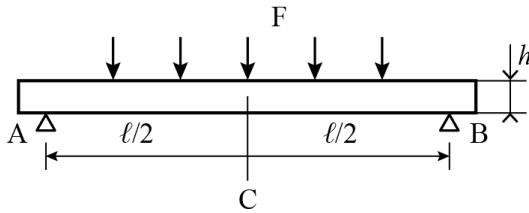


Figure I.5. Poutre sur appui

Soit une plaque de longueur ℓ , de largeur a et d'épaisseur h sur appuis simples en A et B.

Le long de c , axe médian de la plaque, on a :

$$\delta_c = \frac{5 F \ell^3}{32 E a h^3} \rightarrow h = \left(\frac{5 F \ell^3}{32 a \delta_c E} \right)^{1/3}$$

$$M = q a h \ell$$

d'où :

$$M = \ell^2 \left(\frac{5 F a^2}{32 \delta_c} \right)^{1/3} \frac{q}{E^{1/3}}$$

pour $M \searrow$ maximise $\frac{E^{1/3}}{q}$.

Pour d'autres constructions, il faut plutôt optimiser la résistance des produits et de leurs masses, c'est-à-dire R_e/q .

Exemples de résistances optimales

Cas de la poutre en traction ou compression

$$R_e = \frac{F}{S}, M = \rho \ell S = \rho \ell F/R_e$$

soit :

$$M = F \ell \frac{\rho}{R_e}$$

pour $M \searrow$ maximise $\frac{R_e}{\rho}$.

Cas de la poutre en flexion

$$R_e = \sigma = \frac{M_f}{I} \cdot \frac{h}{2} \text{ avec } M_f = F \ell \text{ et } I = h^4/12$$

$$R_e = \sigma = \frac{6 F \ell}{h^3}, M = \rho \ell h^2 \text{ et avec } h = \left(\frac{6 F \ell}{R_e} \right)^{1/3}$$

soit :

$$M = \ell (6 F \ell)^{2/3} \frac{\rho}{R_e^{2/3}}$$

pour $M \searrow$ maximise $\frac{R_e^{2/3}}{\rho}$.

Cas de la plaque avec charges uniformément réparties

$$\sigma = R_e = \frac{3 F \ell}{4 a h^2}, M = \rho \ell a h$$

soit :

$$M = \left(\frac{3 F \ell^3 a}{4} \right)^{1/2} \frac{\rho}{R_e^{1/2}}$$

pour $M \searrow$ maximise $\frac{R_e^{1/2}}{\rho}$.