

composites et Matériaux polymères

Les grandes familles des matériaux

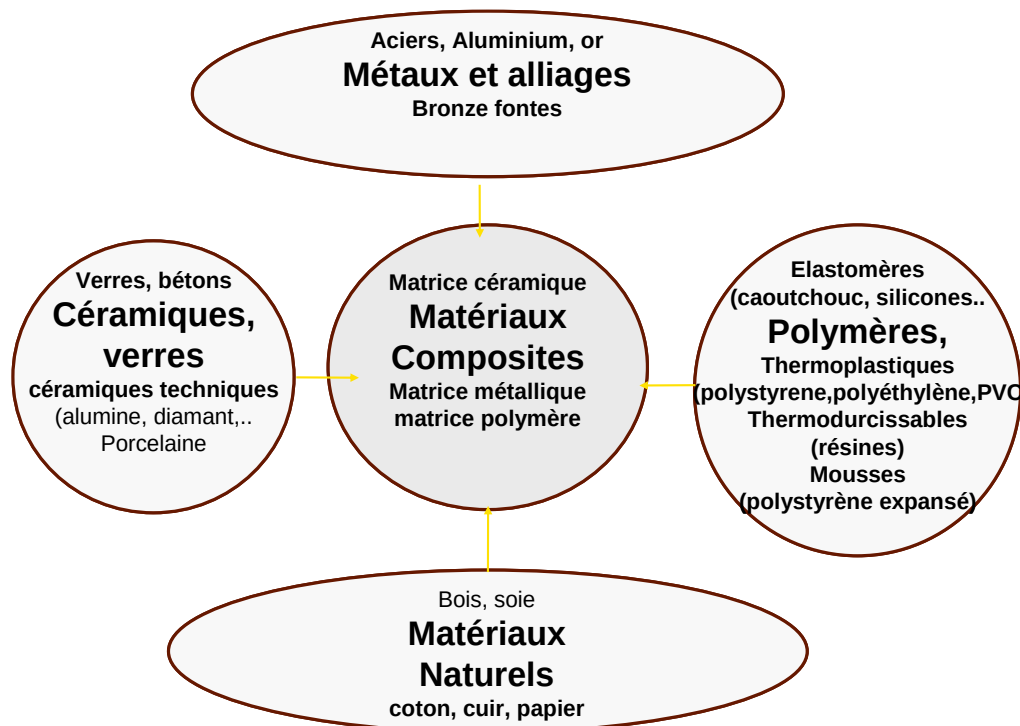
Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle. On distingue quatre grandes familles de matériaux.

1- Les matériaux métalliques : Ce sont des métaux ou des alliages de métaux. (fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc.)

2- Les matériaux composites : Ce sont des assemblages d'au moins deux matériaux non miscibles (fibres de verre, fibres de carbone, contreplaqué, béton, béton armé, kevlar, etc.)

3- Les matériaux minéraux : Ce sont des roches, des céramiques ou des verres. (céramique, porcelaine, pierre, plâtre, verre, etc.)

4- Les matériaux organiques : Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétiques. (bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, le caoutchouc, le cuir, etc.)



Les composites

Ces matériaux combinent des propriétés intéressantes des autres familles sans en avoir leurs inconvénients. Ils sont légers, rigides et résistants et peuvent être tenace. La majorité des composites disponibles aujourd'hui sont à matrice polymère (en général époxyde ou polyester) renforcés des fibres de verre, carbone, ou kevlar (Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède de très bonnes propriétés mécaniques en traction (résistance à rupture) mais ils ne peuvent pas être utilisés au-dessous de 250°C à cause de la matrice en polymère mais leurs performance à température ambiante sont exceptionnelle. Les pièces en composite coutent chères et difficiles à mettre en forme et à assembler.



Lampe en composite à fibre de carbone



Carrosserie composite pour voiture « Hybride »

Les matériaux composites à matrice métallique ont été développés à partir des années 1960-1965 en deux vagues successives. Des efforts importants de recherche ont été menés aux États-Unis et en France dans les années 60 autour d'une fibre monofilamentaire de bore. Ce composite métal-métal était pénalisé par le coût très élevé de la fibre. À cette date, les applications envisagées étaient exclusivement orientées vers l'aéronautique et l'espace. Dans les années 80, la disponibilité de nombreuses nouvelles fibres céramiques devait relancer les recherches dans ce domaine avec des perspectives de développement industriel plus encourageantes. Des exemples d'applications industrielles ont été développés dans l'automobile, à l'initiative de l'industrie japonaise.

- Les composites se composent de 2 parties :
 - Le renfort : il assure la tenue mécanique.
 - La matrice : elle assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.
- distingue 3 catégories :
 - les composites à matrices métalliques (CMM),
 - les composites à matrices céramiques (CMC),
 - les composites à matrices organiques (CMO).

Renforts

Les rôles des renforts consistent à :

- supporter les efforts appliqués;
- conférer au composite sa rigidité élastique et sa résistance à la rupture, éventuellement à haute température.

Ils doivent également être compatibles avec la matrice du composite sur le plan chimique, c'est-à-dire assurer une adhérence inter-faciale 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, feutres, nappes de mat 2D, nappes unidirectionnelles, tissages 2D, tissages 3D) ou par leur nature.

a) Fibres de verre

Les fibres de verre de diverses qualités sont de loin les renforts les plus courants. Leur procédé d'élaboration par filage du verre en fusion permet d'obtenir des fibres de 5 à 15 μm de diamètre. Leur résistance à la rupture en traction ou flexion est d'autant plus élevée que leur diamètre est faible.

Principaux avantages :

- bonne résistance thermique et électrique;
- bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité;
- bonne compatibilité avec les matrices organiques;
- faible coût.

Principales limitations :

- caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique;
- tenue au choc médiocre.

b) Fibres polymères

Malgré leur faible masse volumique, peu de polymères permettent d'obtenir des fibres de module suffisant pour présenter un intérêt comme renfort de composites. Les fibres aramides (Kevlar), en particulier, présentent d'excellentes caractéristiques de rigidité et de résistance en traction, une bonne tenue à la fatigue, mais un comportement médiocre en compression et cisaillement (donc en flexion). Elles sont le plus souvent utilisées en association avec des fibres de verre ou de carbone.

Toutes les fibres organiques sont pénalisées par leur sensibilité à l'humidité et à la température et une médiocre compatibilité avec les matrices organiques.

c) Fibres de carbone

Elles sont élaborées par pyrolyse en atmosphère contrôlée de fibres de polymère précurseur, ce qui permet d'obtenir sous diverses variantes un squelette d'atomes de carbone à structure graphitique à haut module et haute résistance malgré de nombreuses imperfections.

Elles sont **conductrices** électriques et thermiques. Elles sont employées sous formes de nappes unidirectionnelles ou de tissus pré-imprégnés pour la fabrication de matériel industriel ou sportif et sous forme de tissage 2D ou 3D dans l'industrie aéronautique et spatiale.

Principaux avantages :

- grande résistance à la traction et grande rigidité;
- très bonne tenue en température sans chute de propriétés (jusqu'à 1 500 °C en atmosphère non oxydante);
- inertie à la corrosion et aux agents chimiques;

Principales limitations :

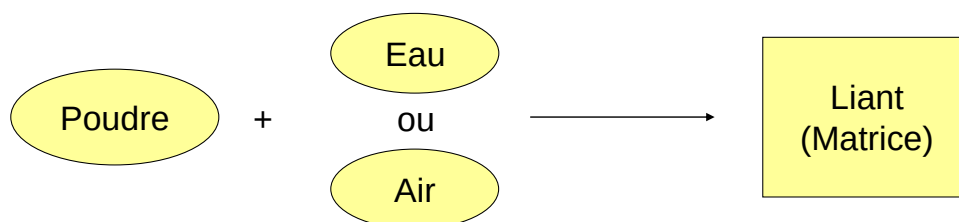
- fragilité au choc;
- fragilité à la courbure ou au pliage;
- coût élevé.

d) Autres types de fibres et renforts

Il existe d'autres types de fibres métalliques continues (bore, tungstène, acier...) ou de renforts minéraux (Al_2O_3 , B_4C , SiC , Si_3N_4 , BeO , TiO_2 , TiC ...) sous forme de filaments ou de particules. Ils sont compatibles avec des matrices métalliques imprégnées par fusion. Malgré leur résistance et leur rigidité, le diamètre élevé des fibres (la centaine de microns) les rend sensibles à la flexion et surtout, leur coût élevé restreint leur utilisation à quelques applications de haute technologie.

Qu'est ce qu'une «**Matrice**»?

Une matrice est un liant qui a la propriété de faire prise avec l'eau ou l'air, suivant la nature de ses constituants. Cette réaction transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau, pour lier le squelette granulaire qui constitue le matériau. La matrice peut être de nature minérale, ou organique.



La matrice d'un composite a pour rôles :

- d'enrober les renforts, les protégeant ainsi du milieu extérieur;
- d'assurer une répartition spatiale homogène des renforts;
- de transmettre aux renforts les efforts extérieurs et de les répartir;
- de conférer la forme à la pièce de matériau composite : ce sont elles qui conditionnent l'aptitude à la mise en forme du composite.

a) Matrices organiques

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus courantes dans les composites de grande diffusion, associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone. Elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts.

Principaux avantages :

- faible masse volumique;
- coût-matière relativement faible;
- insensibilité à de nombreux agents chimiques;
- mise en œuvre aisée et rapide, compatible aussi bien avec du prototypage qu'avec une production en série.

Principales limitations :

- tenue en température médiocre;
- sensibilité à l'humidité.

Les plus utilisées sont :

- les résines polyester insaturées, thermodurcissables, imprégnées à l'état liquide, avant réticulation;
- les résines époxydes, également thermodurcissables, mises en œuvre dans des conditions similaires; elles sont un peu plus coûteuses que les précédentes;
- des polymères thermoplastiques (polypropylène, polyamide), qui permettent un thermoformage d'ébauches planes et autorisent le recyclage;
- des élastomères (polyuréthanes, silicones) sont également utilisés. Certains polymères thermoplastiques courants (PE, PS, PVC...) sont souvent renforcés et rigidifiés par incorporation de fibres courtes, de paillettes ou de particules peu coûteuses (fibres de verre hachées, mica, talc, silice) pour la fabrication d'objets de grande diffusion.

La quasi-totalité des matériaux d'origine biologique sont des composites : élastine + collagène pour les tissus animaux, collagène + hydroxyapatite pour les os, fibres de cellulose + matrice de lignine et d'hémicellulose pour le bois et les textiles naturels.

b) Matrices métalliques

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide étant une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramiques. Ils sont faciles à mettre en œuvre car leur température de fusion est relativement basse; leur masse volumique est faible et ils sont peu coûteux. Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C.

Leur coût de mise en œuvre élevé réserve les composites à matrice métallique aux applications aéronautiques et spatiales.

Signalons également les tentatives d'obtention de composites par moulage et solidification dirigée d'alliages eutectiques, permettant d'obtenir simultanément « in situ » une matrice et des fibres métalliques.

c) Matrices minérales

Des composites à matrices céramiques (C, Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃, MgO, SiC...) peuvent être obtenus par imprégnation de préformes de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone).

Principaux avantages :

- faible masse volumique;
- réfractivité;
- bonne résistance à la compression et haute rigidité, même en température;
- inertie chimique.

Principales limitations :

- sensibilité aux chocs;
- mise en œuvre délicate et coûteuse;
- pour les composites carbone-carbone, sensibilité à l'oxydation dès 400°C.

Propriétés générales des matériaux composites

Classement des propriétés des matériaux en 6 catégories (en fonction des agents auxquels ils sont exposés) :

Mécaniques	Electriques
Thermiques	Magnétiques
Optiques	Chimiques

	Caractéristique	Qualité
Mécaniques	Module d'Young	Rigidité, capacité d'un matériau à s'opposer à une déformation
	Limite d'élasticité, résistance	Résistance aux efforts
	Déformation à la rupture	Ductilité (capacité à se déformer avant de rompre)
	Limite d'endurance	Résistance à la fatigue (solicitations mécaniques cycliques alternées)
	Ténacité	Résistance à la propagation de fissure
	Dureté (Vickers)	Résistance à l'enfoncement d'un pénétrateur
Thermiques	Chaleur spécifique	Quantité de chaleur pour élever la température d'un kilo de matériau d'un degré
	Conductivité thermique	Aptitude d'un matériau conducteur à transmettre de la chaleur
	Coefficient de dilatation thermique	Dilatation du matériau lorsqu'on le chauffe
Electriques	Résistivité	Indique dans quelle mesure un matériau est résistant au passage d'un courant électrique

Caractéristiques des matériaux composites

La résistance et la ductilité d'un composite sont limitées par la rupture progressive des renforts et/ou des interfaces renforts/matrice, et/ou la délamination des plis; le module chute dès les premiers endommagements. La rupture se produit généralement sans striction et de manière assez fragile.

Compte tenu de leurs difficultés de mise en œuvre et de leur coût élevé, l'intérêt des matériaux composites se situe surtout dans le gain de poids ou de volume qu'ils autorisent dans les pièces où on les utilise dans des applications de pointe (température élevée, rigidité + ténacité...). Ces gains se traduisent par des valeurs élevées des résistances spécifiques et rigidités spécifiques par unité de masse.

Toutes ces caractéristiques sont naturellement très variables en fonction des paramètres de constitution du composite.

Méthodes de mise en œuvre des matériaux composites : MATRICE MÉTALLIQUE

Alliage liquide			Alliage solide	Composés gazeux
↓	↓	↓	↓	↓
Fibres courtes : mélange à l'alliage liquide, coulée, injection, forgeage liquide, rhéomoulage, extrusion, ...	Fibres longues : imprégnation d'une pré forme, aspiration, injection, forgeage liquide, ...	Élaboration in situ solidification dirigée d'un alliage biphasé	Compression à chaud : Empilement de couches de filaments et de feuillards métalliques soudage Par compression à haute Température	Imprégnation en phase vapeur d'une pré-forme de fibres longues
↓	↓	↓	↓	↓
Finition : calibrage, reprise d'usinage, ébavurage, ... Assemblage : soudage, brasage, collage, éléments de jonction, ...				

MATRICE CÉRAMIQUE	MATRICE ORGANIQUE, Thermodurcissables et élastomères		MATRICE ORGANIQUE, Thermoplastiques
Composés gazeux	VOIE HUMIDE : Imprégnation de fibres courtes, mat ou tissu par une résine liquide	VOIE. catalysée SÈCHE : Mat ou fibres	Mélange à chaud de fibres courtes ou de particules et de granulés de polymère
↓	↓		↓
Imprégnation en phase vapeur d'une pré-forme de fibres longues	Moulage au contact, projection simultanée, stratification sous vide, sous pression, à chaud, moulage à la presse, enroulement filamenteux, stratification en continu, centrifugation, ...	courtes pré-imprégnées de résine thermodurcissable et inhibée	Injection, Pressage à chaud, ...
↓	↓	↓	↓
Finition rectification, polissage, ... Assemblage colles, ciments.	Finition : reprise d'usinage, ébavurage, ... Assemblage : emboîtement, collage, vissage, ...		