

CHAPITRE 4 : LES MATERIAUX COMPOSITES

4.1. Introduction

Un **matériau composite** est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas.

Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites, reste complexe du point de vue mécanique de par la non-homogénéité du matériau.

Un matériau composite se compose comme suit :

Matrice + renfort + optionnellement : charge et/ou additif.

Exemples : le béton armé (composite) = béton + armature en acier

4.2. Composition d'un composite

(a) Renforts

Le renfort est l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques. Les renforts peuvent être classés selon :

- leur composition : métal, verre, polymère, etc. ;
- leur forme :
 - fibres : courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm).
 - charges renforçantes : gravier (additionné au ciment pour fabriquer le béton), sable, billes de verre, etc. ;
- leur disposition : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé.

Le tableau suivant résume les dispositions possibles des différentes formes de renforts dans un matériau composite

Type de renfort	Renfort non orienté	Renfort orienté
Fibres longues ou continues	Mat de fibres longues	Parallèlement les unes par rapport aux autres : renforcement unidirectionnel, Selon un angle prédéfini (45° par exemple les unes par rapport aux autres) : renforcement multidirectionnel : renfort tissé,
Fibres	Mat de fibres hachées,	Orientation préférentielle,

courtes	exemple : waferboard	exemple : panneau de grandes particules orientées (OSB)
Charges	Majoritairement	Orientation préférentielle possible

Le renfort peut être seul au sein d'une matrice (composite homogène) ou associé à un renfort de nature différente (composite hybride).

Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance faible à la compression.

Parmi les fibres les plus employées on peut citer :

- les fibres de verre qui sont utilisées dans le bâtiment, le nautisme et diverses applications structurelles peu chargées. Le coût de production de ces fibres est peu élevé ce qui en fait l'une des fibres les plus utilisées à l'heure actuelle ;
- les fibres de carbone utilisées pour des applications structurelles visant à obtenir une plus grande légèreté et une meilleure rigidité qu'avec la fibre de verre . Elles sont obtenues par la pyrolyse d'un précurseur organique ou non sous atmosphère contrôlée. Le plus utilisé de ces précurseurs est le polyacrylonitrile (PAN). Le prix de ces fibres reste relativement élevé mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. On les retrouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions (Formule 1, mâts de bateaux) ;
- les fibres d'aramide (ou Kevlar qui est une dénomination commerciale) utilisées dans les protections balistiques comme les gilets pare-balles ainsi que dans les réservoirs souples de carburant en Formule 1 ;
- les fibres de carbure de silicium sont une bonne réponse à l'oxydation du carbone dès 500 °C. Elles sont utilisées dans des applications très spécifiques travaillant à haute température et sous atmosphère oxydante (spatial et nucléaire). Leur coût de production est très élevé ce qui limite donc leur utilisation ;
- pour les composites d'entrée de gamme, un intérêt croissant est porté aux fibres végétales, comme le chanvre ou le lin (lin textile). Ces fibres ont de bonnes propriétés mécaniques pour un prix modeste, et sont particulièrement écologiques. On rencontre aussi des fibres de polyester, telles que le Textilène.

(b) Matrices

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis-à-vis des diverses conditions environnementales. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé.

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- les composites à matrice organique (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique) ;

- les composites à matrice métallique (CMM) pour quelques applications spécialisées.

Dans le cas des CMO (composites à matrice organique) les principales matrices utilisées sont :

- **Thermodurcissables :**
 - les résines polyesters insaturés (UP) peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante,
 - les résines époxyde (EP) qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure performantes (véhicules et voiliers de compétition, aéronautique),
 - les résines vinylester sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes. Elles sont issues d'une modification d'une résine époxyde et excellentes pour des applications de résistance chimique,
 - les résines phénoliques (PF) utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes imposées par les normes dans les transports civils,
 - les résines polyimides thermodurcissables (PIRP) pour des applications à haute température (~300 °C) et polybismaléimides (BMI) pour des applications à température intermédiaire (~225 °C) ;
- **Thermoplastiques,**
comme le polypropylène, le polyamide, le polyétherimide (PEI), le poly(sulfure de phénylène) (PPS) et la poly(éther-éther-cétone de phénylène) (PEEK) pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique.

Dans le cas des CMC (composites à matrice céramique), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

Dans le cas des CMM (composites à matrice métallique) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (ex. : aluminium, magnésium, zinc, nickel) ;
- d'un renfort métallique ou céramique (ex. : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant).

Des charges (minérales, organiques ou métalliques) et additifs sont presque toujours incorporés à la matrice.

4.3. Mise en forme

La mise en forme des matériaux composites peut avoir lieu par des procédés manuels ou mécanisés. Dans l'ensemble, les outils nécessaires aux procédés mécanisés s'amortissent en produisant en moyenne et grande série ; c'est pourquoi les procédés manuels sont plus adaptés à la petite série du point de vue économique.

Parmi les procédés manuels, on distingue :

- le moulage par projection simultanée ;
- le drapage de préimprégnés (catalyse à haute température, souvent sous vide) ;
- le moulage au contact ;
- le moulage sous vide ;
- l'infusion.

4.4. Principaux composites

Quelques exemples de matériaux composites :

- les composites naturels :
 - le bois et les textiles naturels sont des composites à base d'une matrice en lignine et hémicellulose et de renforts en fibre de cellulose,
 - l'os est un composite à base d'une matrice en collagène et de renforts en hydroxyapatite,
- les composites artificiels :
 - les matériaux rigides communément appelés « fibre de verre » et « fibre de carbone » sont des composites respectivement de fibres de verre et fibres de carbone et de diverses résines rigides (notamment époxyde),
 - le Micarta est un composite de fibres (initialement coton ou papier) imprégnées à haute pression avec des résines phénoliques durcissantes telles que la Bakélite,
 - les panneaux de bois agglomérés comme le contreplaqué utilisé en menuiserie, construction, ébénisterie,
 - les cloisons de plaques de plâtre, très utilisées dans le bâtiment hors intempéries,
 - le béton armé en génie civil est un composite de béton et d'acier,
 - le GLARE, composé principalement d'aluminium et de fibre de verre, est utilisé en aéronautique,
 - l'acier damassé était un composé de plusieurs feuilles d'acier de nuances différentes ;
 - le composite dentaire ;
 - l'amalgame composite pouvant remplacer une dent.

4.5. Environnement

La plupart des composites sont à base de polymères thermodurcissables, ce qui les rend difficilement recyclables. Cette contrainte va donc à l'encontre du développement durable. On peut aussi voir de nouvelles recherches axées sur les biocomposites notamment avec des fibres issues de plantes. Les biocomposites sont des matériaux formés par une matrice (résine) et un renfort de fibres naturelles provenant usuellement des plantes ou de la cellulose (fibre de bois, chanvre, etc.). De plus, ils contribuent au respect de l'environnement car ils sont biodégradables, utilisés dans l'ingénierie des tissus, des applications cosmétiques et de l'orthodontie. Ces biocomposites ne sont pas encore prêts à être mis sur le marché pour des secteurs de pointe.

Un composite n'est entièrement biodégradable que si la matrice utilisée, en plus de fibres naturelles, l'est elle-même l'intérêt d'utiliser des fibres naturelles comme renfort sera le caractère renouvelable de celles-ci, mais on ne pourra pas parler de composite biodégradable.

4.6. Usages des composites

Dans la pratique, les usages des matériaux composites sont nombreux. Parmi ceux-ci, il y a plusieurs domaines dans lesquels les applications sont diverses. Il y a par exemple l'automobile, l'aviation, la recherche spatiale ou encore le sport. Au niveau sportif, des équipements tels le ski, la raquette de tennis ou encore la canne de hockey peuvent être cités. De nouveaux objets comme les prothèses ont aussi été grandement améliorés et ont servi aussi bien au handisport qu'au quotidien de personnes souffrant de handicaps, permettant à certaines personnes de poursuivre leur activité professionnelle par exemple.

4.7. Description mécanique

Le comportement d'un matériau composite se décrit de la façon suivante, en utilisant le formalisme euclidien de la mécanique des milieux continus :

- on a matériaux différents qui forment le composite (on parle de « phases », caractérisées par leur fraction volumique et leur géométrie) ;
- à l'intérieur de chaque phase, le matériau peut se déformer et subir des contraintes. La déformation se fait selon la loi de comportement du matériau en question (que l'on connaît) : pour le cas élastique linéaire ;
- il y a *équilibre des forces volumiques*, soit, dans chaque matériau i : si l'on néglige la force de pesanteur devant les forces appliquées au matériau (pression, traction, cisaillement) ;
- enfin, l'agrégation des comportements de chaque matériau simple, pour aboutir au comportement du composite, nécessite de décrire l'équilibre des forces entre deux matériaux « collés », en chaque point de leur *surface de contact*. Cette condition est que la force exercée par le matériau 1 sur le matériau 2 à la surface de contact doit être opposée à celle exercée par le matériau 2 sur le matériau 1. Ceci implique une certaine continuité du champ de contraintes : on doit avoir (en chaque point des surfaces de contacts des matériaux mélangés dans le composite). C'est par cette condition qu'intervient la microgéométrie du mélange dans la détermination du comportement du composite. Ainsi, en mélangeant des matériaux isotropes selon une géométrie non isotrope (fibres, feuilles, etc.), on obtient un composite non isotrope mais dont les propriétés mécaniques sont issues des celles des matériaux initiaux ;
- ainsi, le matériau composite est décrit en chacun de ses points. La loi de comportement du composite qui en résulte doit pouvoir faire le lien entre les déformations *microscopiques* et les contraintes *macroscopiques* (c'est-à-dire leurs valeurs moyennes, car par exemple si l'on mélange un matériau mou et un dur, les déformations microscopiques seront très variables selon le matériau, et c'est la déformation globale que l'on observera à l'échelle du composite). Cette loi de comportement du composite est dite « effective » : on note dans le cas linéaire.

Résolution

Le problème précédent ne se résout pas simplement, sauf dans le cas de *géométries très simples* (inclusions sphériques, fibres, feuilles empilées, ou de manière générale dans le cas d'inclusions de forme ellipsoïdale).

Des recherches visent à décrire le comportement du composite sans forcément en connaître la géométrie exacte, en essayant de borner l'*énergie de déformation* du composite (l'énergie de déformation d'un matériau est).

La mécanique des composites est encore un domaine de recherche théorique active : comportement mécanique ou électrique, linéaire, non linéaire, viscoélastique, avec fissures ou plasticité, flambage, etc.

Une limite de cette modélisation est que l'on ne peut pas connaître de manière précise la microgéométrie d'un composite réel : il y a toujours des défauts ; mais la modélisation permet de décrire de manière assez précise la loi de comportement.

Un autre intérêt de cette recherche théorique entre la géométrie d'un composite et sa loi de comportement est le mode de réalisation d'un matériau dont les caractéristiques mécaniques ont été obtenues par une optimisation informatique.

Références :

<https://fr.wikiversity.org/wiki/>

<https://fr.wikipedia.org/>

<https://www.amp-composite.com/le-composite/>

Yves Bréchet, « La science des matériaux : du matériau de rencontre au matériau sur mesure » [[archive](#)], sur www.college-de-france.fr, 17 janvier 2013 (consulté le 6 mai 2020)

Yves Bréchet, « Quels seront les matériaux de demain ? » [[archive](#)], sur *France Culture*, 14 septembre 2014 (consulté le 6 mai 2020)

Ouvrages :

- 1- Ashby et Jones, *Matériaux*, t. 2, Microstructure et mise en œuvre, chap. 25, Dunod, 1991
- 2- *Traité des Matériaux*, PPUR, vol. 1 : Introduction à la Science des Matériaux, 3^e éd., chap. 16 (ISBN 2-88074-402-4), vol. 15 : Matériaux Composites à Matrices Organiques (ISBN 2-88074-528-4)
- 3- Bensaude-Vincent B. (2011). *L'art du composite : innovation et design en matériau*. Conférence présentée au IV^e congrès de l'Association Française de Sociologie : Création & Innovation, Paris 1 – Panthéon-Sorbonne.

- 4- Bréchet Y. (septembre 2019). *Quels seront les matériaux de demain ?* [podcast radio]. M. Nicolas. La méthode scientifique de France culture. France.
- 5- Maurice Reyne, *Technologie des composites*, Hermes, 1995 (ISBN 2-86601-455-3)
- 6- Daniel Gay, *Matériaux composites*, 5^e éd., Hermes Science Publications, 2009 (ISBN 978-2746210981)