

1. Historique

Le bois fut le premier matériau composite naturel utilisé, ensuite le torchis a été utilisé en construction pour ses propriétés d'isolation et de coût (Figure 1.1). Parmi les premiers composites fabriqués par l'homme on trouve aussi les arcs Mongols (2000 ans av. J. -C.). Leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne. Les sabres japonais respectant les traditions sont aussi un exemple de matériaux composites particulièrement ancien (Figure 1.2). Les forgerons nippons procédaient au pliage et au martèlement du métal jusqu'à obtenir une sorte de pâte feuilletée pouvant être composée de plus de 4 000 couches. Le procédé de pliage était utilisé pour maîtriser exactement l'uniformité de l'acier mais aussi sa composition en carbone tout en conférant à la lame ses propriétés de résistance et de souplesse.



Fig.1.1: Le torchis (mélange de terre et de paille)



Fig.1.2: sabres japonais

Au 20ème siècle, les composites modernes ont été utilisés dans les années 1930 lorsque les résines renforcées par des fibres de verre. Les bateaux et les avions ont été construits à partir de ces composites de verre, communément appelé fibre de verre.

Depuis les années 1970, l'application de composites a considérablement augmenté en raison du développement de nouvelles fibres telles que le carbone, le bore et les aramides, ainsi que de nouveaux systèmes composites comportant des matrices en métaux et en céramique.

2. Définition

Un composite est un matériau hétérogène, formé d'au moins deux matériaux non miscibles de nature différente ; Ces matériaux sont disposés selon une organisation géométrique, qui confère au composite des propriétés supérieures à celles des constituants pris séparément. La réalisation d'un matériau composite nécessite donc l'association d'au moins deux composants : **le renfort et la matrice**, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser. Pour cela, un agent de liaison, appelé interface, est nécessaire (Figure. 1.3). Des charges et des additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, afin de modifier une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs).

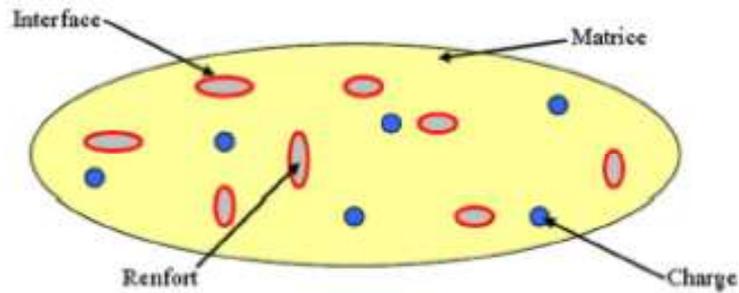


Fig.1.3: Représentation schématique d'un matériau composite (CAR04)

3. Classification des matériaux composite

Les composites peuvent être classés suivant la forme et la nature des composants:

3.1 Les matériaux composites suivant la forme

➤ 3.1.1 Les matériaux composites à fibres:

- Les fibres longues (i.e. longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure)
- Les fibres courtes (i.e. de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure)

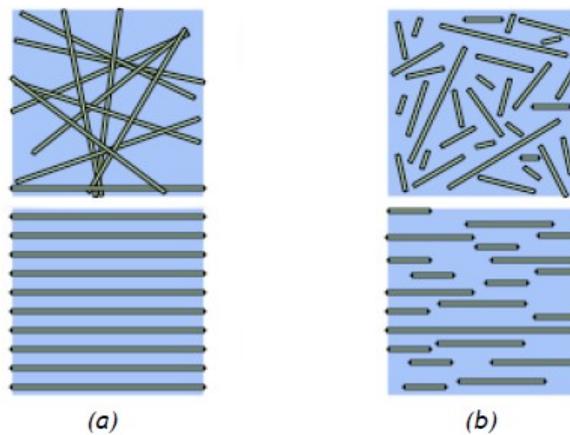


Fig. 1.4 (a) fibres longues, b) fibres courtes

➤ 3.1.2 Les matériaux composites à particules:

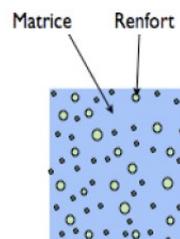


Fig. 1.5 Particules

3.2 Classification suivant la nature des constituants:

On distingue habituellement trois familles :

- Les composites à matrice organique (CMO),
- Les composites à matrice minérale (CMM),
- Les composites à matrice métallique (CMM).

3.2.1 Les composites à matrice organique (CMO)

Il s'agit, de loin, des composites les plus répandus : ce sont en effet les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries. Plus précisément, on distingue généralement deux types de CMO :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées ;
- Les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle

Les matrices employées pour ces composites sont des résines polymères. Différentes fibres peuvent être employées avec ces matrices. Les plus courantes sont:

- Des fibres minérales (verre, carbone, etc.)
- Des fibres organiques (Kerbar, polyamides, etc)
- Des fibres métalliques: bore, aluminium, etc.)

3.2.2 Composites à matrice métallique (CMM)

Les composites à matrice métallique ont été élaborés pour tenter de concilier les qualités des métaux (ductilité, bonne tenue face au vieillissement et au feu...) avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Ce sont des matériaux performants, mais pénalisés par un coût de revient encore élevé et réservés à des applications relativement exigeantes, dans divers domaines.

Les CMM comportent une matrice en métal léger (aluminium et ses alliages, magnésium, titane...) et un renfort pouvant être, de deux types :

Soit des particules ou des fibres courtes céramiques ; les propriétés mécaniques sont alors légèrement supérieures à celle du métal formant la matrice, et les procédés traditionnels de mise en forme des métaux peuvent généralement être employés

Soit des fibres longues céramiques ou métalliques ; les propriétés sont alors bien supérieures à celles de la matrice, et les procédés de mise en forme sont plus coûteux (il s'agit typiquement d'infiltrer du métal fondu autour d'un tissu de fibres).

Un avantage de ces composites est que la matrice étant métallique, ses caractéristiques mécaniques intrinsèques sont généralement bonnes. Il est donc possible de s'appuyer sur le comportement matriciel et de ne renforcer que certaines zones, ou encore de se contenter de

renforts unidirectionnels ; cela est généralement impossible avec les matrices polymères (en raison de leur faible résistance) ou céramiques (en raison de leur fragilité). Un inconvénient est la grande réactivité chimique des métaux : lors de la mise au point du composite, il faut s'assurer que la matrice et le renfort ne peuvent pas réagir entre eux, faute de quoi les conséquences sur les propriétés mécaniques peuvent être catastrophiques.

3.2.3 Composites à matrice céramique (CMC)

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison d'un coût élevé, les CMC s'adressent aux applications à très haute température. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire, ainsi que pour la conception d'organes haut de gamme comme des disques ou plaquettes de freins.

Les céramiques possèdent de nombreux atouts pour de telles applications : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Malheureusement, leur grande fragilité limite fortement leur domaine d'utilisation. Le principe des CMC est donc de rendre les céramiques moins cassantes en leur donnant une structure composite, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice. Cela conduit à une meilleure résistance à la rupture, pour deux raisons :

Les fibres ayant un diamètre microscopique, il est possible de les fabriquer avec très peu de défauts, ce qui conduit à des contraintes de rupture plus élevées ;

Lorsque le composite se dégrade, les fissures ont tendance à suivre les interfaces situées entre les fibres et la matrice au lieu de se propager dans les fibres ; au lieu de rompre brutalement.

Afin de ralentir le plus possible la rupture, les matrices céramiques possèdent généralement une structure multicouches (figure 1.6a) : la matrice est faite de plusieurs couches superposées, ce qui permet de multiplier les interfaces et donc les déviations des fissures (figure 1.6b). Tout ceci fait que les CMC sont beaucoup moins fragiles et beaucoup plus tenaces que les céramiques massives, et peuvent donc être utilisés dans des pièces mécaniques.

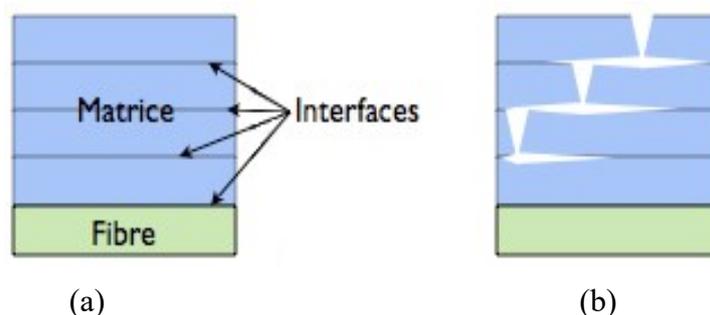


Fig.1.6 (a): Schématisation d'une matrice multicouches ; (b) effet protecteur des interfaces : les fissures sont déviées et leur progression vers les fibres est donc ralentie.

Dans les CMC, les renforts et la matrice sont souvent constituées de carbure de silicium (SiC), de carbone (C) ou d'alumine (Al_2O_3) ; bien que le carbone ne soit pas une céramique, les matrices de carbone possèdent des comportements assez similaires aux matrices céramiques et sont donc souvent assimilées aux CMC. Il est relativement fréquent que les

renforts et la matrice soient faits du même matériau : le rôle de la structure composite, ici, n'est pas tant de combiner les propriétés des constituants que d'en faire émerger de nouvelles, à savoir la ténacité et la ductilité. Une particularité des CMC est d'ailleurs que souvent, les fibres sont moins rigides que la matrice.

4. Fraction volumique et massique des composites

Un des facteurs les plus importants qui déterminent les propriétés mécaniques d'un matériau composite est la proportion relative de la matrice et le renfort. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique ou massique.

4.1 Fraction volumique

Soit v_c, v_f, v_m le volume de la composite, le volume des fibres et le volume de la matrice respectivement:

- La fraction volumique des fibres

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}$$

- La fraction volumique de la matrice

$$V_m = \frac{v_m}{v_c}$$

Où:

$$V_m = 1 - V_f$$

Puisque:

$$v_c = v_f + v_m$$

Fraction massique

Soit m_c, m_f, m_m la masse de la composite, la masse des fibres et la masse de la matrice respectivement:

- La fraction massique des fibres

$$M_f = \frac{m_f}{m_c}$$

- La fraction massique de la matrice

$$M_m = \frac{m_m}{m_c}$$

Où:

$$M_m = 1 - M_f$$

Puisque:

$$m_c = m_f + m_m$$

Relation entre fractions volumiques et fraction massiques

Les relations entre fractions volumiques et fraction massiques peuvent intervenir les masses volumiques ρ_c, ρ_f, ρ_m respectives du matériau composite, des fibres et de la matrice.

Les masses et les volumes sont liés par les relations:

$$P_c = \rho_c v_c, \quad P_f = \rho_f v_f, \quad P_m = \rho_m v_m,$$

La masse totale du matériau composite est:

$$P_c = P_f + P_m$$

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m$$

La masse volumique du matériau composite s'écrit donc en fonction des fractions volumiques suivant:

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

De même manière, en portant du volume total du composite:

$$v_c = v_f + v_m$$

$$\frac{p_c}{\rho_c} = \frac{p_f}{\rho_f} + \frac{p_m}{\rho_m}$$

d'où l'expression de la masse volumique en fonction des fractions massiques:

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_m}{\rho_m}}$$

Les relations entre fraction massique et fraction volumique peuvent maintenant être établies en fonction des relations de définition:

$$P_f = \frac{p_f}{p_c} = \frac{\rho_f v_f}{\rho_c v_c} = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c}, \quad P_m = \frac{\rho_m V_m}{\rho_c}$$

La masse volumique du matériau composite est déterminée par la relation précédente, les relations inverses s'obtiennent de la même manière, soit:

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} P_f$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} P_m$$

Où la masse volumique du matériau composite est déterminée cette fois par l'expression générale s'écrivent pour n constants:

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} V_i, V_i = \frac{\rho_c}{\rho_i} V_i$$

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i$$

Où:

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\rho_i}}$$

$$\frac{\rho_f}{\rho_m}$$

$$(1 - P_f)/P_f$$

1.6 Emploi des composites

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreuses applications et inondent de plus en plus notre quotidien. Outre dans les utilisations aéronautiques et aérospatiales, ils sont également présents dans les secteurs du génie civil, de l'automobile, de la construction navale, du sport, etc.

1.7 Avantages et les inconvénients des composites:

- grande résistance à la fatigue
- liberté de formes
- maintenance réduite
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf le carbone)
- insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique.
- Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

Toutefois, ces matériaux présente des inconvénients, tels que :

- Faible conductivité électrique des composites à matrice organique, ce qui constitue un problème important pour la résistance aux impacts de foudres des fuselages composites.
- Forte sensibilité aux singularités géométriques (de type trou, entaille...) constituant des maillons faibles au sein de la structure.
- Coût important du passage matériau métallique à matériau composite, prenant en compte le coût matériau (des constituants) et le coût associé au procédé de fabrication.
- Dispersion du matériau plus importante que pour les matériaux métalliques induisant un surcoût des campagnes de qualification (nombres de répétitions d'essais imposées).

- Sensibilité à l'environnement des matrices organiques entraînant une perte de propriétés mécaniques notables après vieillissement thermique.