



Généralité sur les matériaux composites

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons des généralités sur les matériaux composites. Tout d'abord, nous examinerons l'histoire de ces matériaux et leur définition, ainsi qu'une explication détaillée de leurs constituants, leurs classifications, et leur essentielle structure.

Finalement nous exposerons les avantages, les limites et quelques domaines d'application.

I. Matériaux composites

I.1. Historique

L'idée de combiner plusieurs composants pour produire de nouveaux matériaux (matériaux composés) avec de nouvelles propriétés n'est pas nouvelle, car la première utilisation de ces matériaux remonte à 1500 avant JC lorsque les Égyptiens et les premiers Mésopotamiens ont utilisé un mélange d'argile et de paille pour créer des bâtiments solides et durables plus tard et en 1200 après JC, inventé Premier arc à poulies des Moghols. Utilisant une combinaison de bois, d'os et de colle animale, ces bretelles sont très solides et très précises et compactes grâce à la technologie, ce fut l'arme la plus puissante de l'arme au sol jusqu'à l'invention de la poudre à canon [1].

Bien que les matériaux composites soient connus sous diverses formes à travers l'histoire de l'humanité, l'histoire des composés modernes est apparue au XVIIIe siècle, lorsque l'utilisation des matériaux composites s'est étendue à la plupart des domaines industriels.

I.2. Définition

Un matériau composite est la conjonction de plusieurs matériaux élémentaires non miscibles de natures différentes, se complétant. Pour obtenir un nouveau matériau ayant des propriétés supérieures à celui des composants pris séparément.

II. constituants des matériaux composites

En générale un matériau composite est constitué principalement d'une matrice, des additions, des renforts et des interfaces, les propriétés de ce matériau dépendant directement à la nature et la proportion de ses différents constituants.

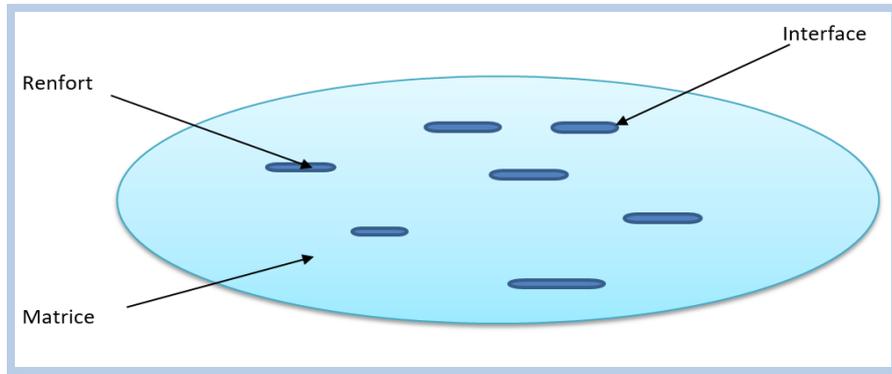


Figure (I.1) : Les constituants principaux d'un matériau composite

II.1. La matrice

La matrice est la phase continue qui lie et maintient les fibres, transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté elle donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques [2]. La figure ci-dessous représente les types de matrices les plus courants.

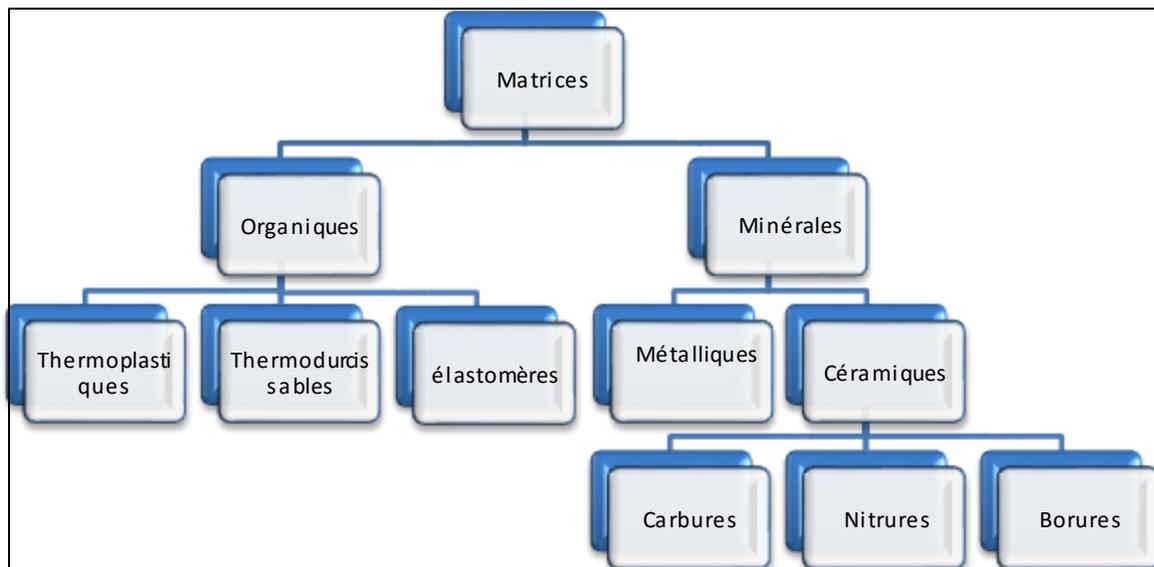


Figure (I.2) : Les Différentes types de matrice [3]

II.1.1. Matrices organiques

Les matrices organiques sont largement utilisées pour la fabrication des matériaux composites, grâce à leurs caractéristiques (Protection contre la corrosion et attaques chimiques, faible coût et facilité de mise en œuvre...). Par ailleurs, la matière organique désignée un polymère qui peut être défini comme un enchaînement de monomères (Un monomère est une molécule composée principalement de carbone et d'hydrogène). Généralement, les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables, ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés, le plus souvent, ils sont amorphes et parfois cristallisés [4], ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques et une faible masse volumique [5]. Il existe trois grandes familles de matière organique (thermoplastique, thermodurcissable et élastomères).

II.1.1.1. Matrices thermoplastiques(TP)

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons. Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts [6].

II.1.1.2. Matrices thermodurcissables(TD)

Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces polymères ont la particularité de ne pouvoir être mis en forme qu'une seule fois cela engendre le problème de recyclage [7], mais ils possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques [6].

II.1.1.3. Matrices élastomères(ME)

Les matrices élastomères sont des polymères naturels ou synthétiques dont la structure particulière conféré une importante élasticité (jusqu'à 500% d'allongement par rapport à la taille initiale), elles sont largement utilisées en tant que solutions antivibratoires. A titre d'exemple, nous pouvons citer les élastomères suivants : les silicones d'élastomère, les polyuréthanes, le néoprène, le latex etc.... [8].

II.1.2. Matrices métalliques(MM)

Les matrices métalliques les plus utilisées sont : l'aluminium et son alliage, le nickel, le titane et le magnésium. Ces matrices sont présentes d'excellentes propriétés physiques et chimiques par rapport au matrices organiques telles que : une tenue en température élevée, bonne conductivité électrique et thermique.

II.1.3. Matrices céramiques(MC)

Les matrices les plus utilisées sont composées de carbone, de silicium de carbure (SiC), d'alumine ou de verre [5], ce type est très difficile puisqu'elle nécessite des manipulations à des températures très élevées d'où l'intervention de main d'œuvre très qualifiée [9].

II.2. Les renforts

Le renfort est le squelette ou l'armature du composite, il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc...). Il permet aussi d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilité de mise en œuvre, un faible coût, etc... [10,11]. La figure ci-dessous représente les types de renforts les plus courants.

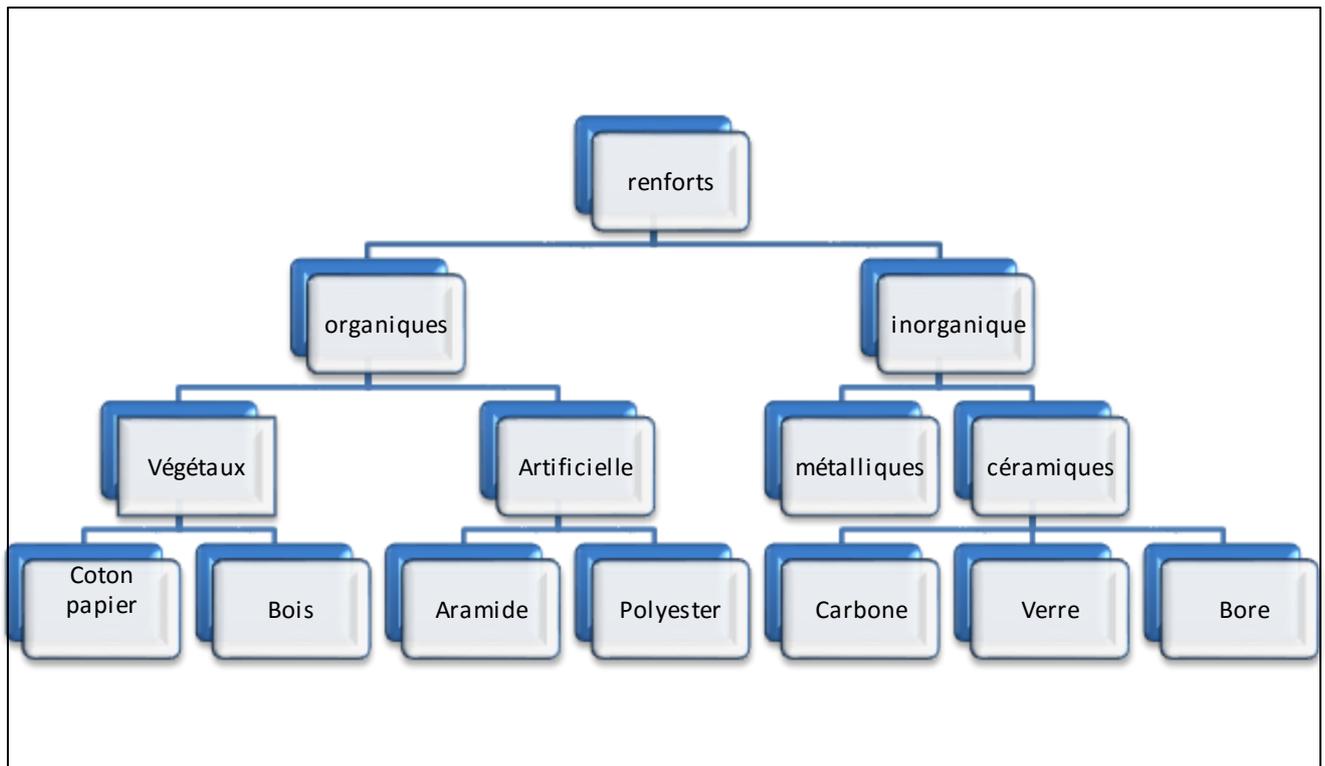


Figure (I.3) : Les différents types de renfort [12]

II.2.1. Renforts organiques

II.2.1.1. Les fibres aramides

Au niveau industriel, les fibres organiques les plus utilisées sont les fibres d'aramide. Elles sont les premières fibres organiques à être utilisées comme renfort dans les structures composites [13].

Les fibres aramides (généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours) sont des polymères polyamides aromatiques, caractérisées par une stabilité thermique élevée et des propriétés diélectriques. En outre, les fibres d'aramide présentent une faible densité, une haute résistance à la traction et des caractéristiques exceptionnelles de rigidité. Le comportement de ces fibres est semblable à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes, elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre [14 - 16].

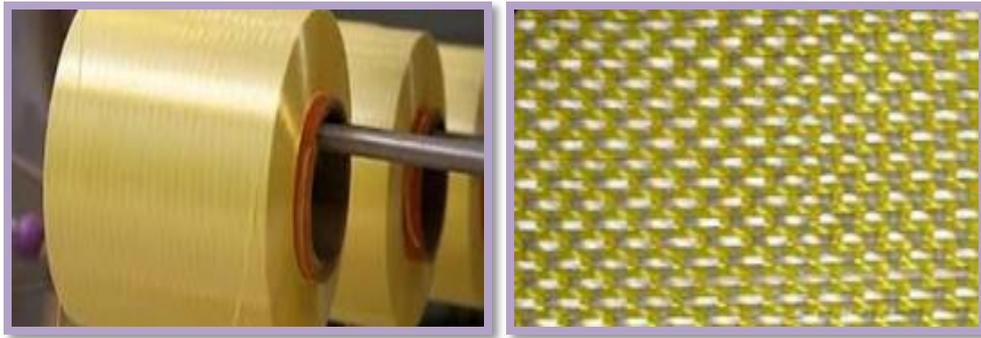


Figure (I.4) : Fibres d'aramide [17]

II.2.2. Renforts inorganiques

Les principales fibres inorganiques sont :

II.2.2.1. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont les plus anciennes (1940) et les moins chères (environ 1euro/kg) des fibres du marché [18], ont un excellent rapport performance mécanique/prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composite. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore) [19]. On distingue généralement différents types des fibres qui est utilisés pour des applications spécifiques, leurs caractéristiques majeures sont répertoriées dans le Tableau ci-dessous

Types de fibres	Caractéristiques générales
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
D	Hautes propriétés diélectriques
E	A usage général ; bonne propriétés électriques
R, S	Haute résistance mécanique

Tableau (I.1) : Caractéristiques générales des fibres de verre [20]

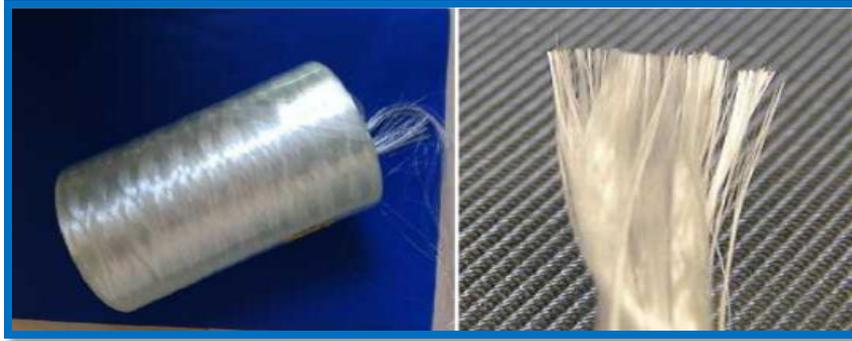


Figure (I.5) : Fibres de verre [21]

II.2.2.2. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone sont obtenues à partir de la pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone [5]. Ces fibres possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000 Kg/m³). On outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température, en atmosphère non oxydante. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500 C° environ [21].



Figure (I.6) : Fibre de carbone [21]

II.2.2.3. Les fibres de bore

Les fibres de bore sont obtenues par réduction à 1100 °C de chlorure de bore, qui se dépose sur un fil de tungstène de 10 à 15 mm de diamètre [18]. De prix très élevé, cette fibre est réservée à des applications impliquant des conditions très sévères d'emploi [14].

II.2.2.4. Fibres de silice

Les fibres de silice sont produites, comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [22].

II.2.2.5. Fibres métalliques

Les fibres métalliques (acier, cuivre, aluminium) sont plus utilisées dans le domaine de génie civil. Elles caractérisées par un module d'élasticité élevé, offrent au béton, une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable.



Figure (I.7) : Fibres métalliques [23]

II.2.2.6. Fibres de céramique

Les fibres céramiques sont des fibres de type carbure, borure et nitrure. Elles élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Elles sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication (de l'ordre de 1000 euros/kg) [16, 18,19]. Elles sont utilisées dans des applications très spécifiques travaillant à haute température et sous atmosphère oxydante (spatial et nucléaire). Les plus couramment produites sont : les fibres de bore, les fibres carbure de silicium, les fibres de bore-carbure de bore (B4C) et les fibres de bore-carbure de silicium (BorSiC) [16].

II.3. Les additions

En générale les additifs sont tous substance qui introduite dans les matrices pour apporter des propriétés spécifiques, ils se trouvent en faible quantité (quelque %) et

interviennent comme (adjuvants ; lubrifiants et agents de démoulage ; pigments et colorants ; agents anti-retrait ; agents anti-ultraviolets etc....).

II.4. L'interface

L'interface ou (interphase) est la surface de contact entre la matrice et le renfort, elle joue un rôle très important sur le comportement mécanique du composite. Lorsqu'un certain composite subit des dégradations mécaniques et commence à se fissurer suite à une surcharge et la fatigue, les interfaces ont la propriété de transmettre les chargements de la matrice vers le renfort et de dévier ou bloquer les fissures. Ainsi, évitez la rupture brutale de composite et prolonger sa durée de vie.

III. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon deux façons. Une manière consiste à les classer selon la nature de la matrice et un autre selon les formes des renforts.

III.1. Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature des constituants (nature de la matrice), les composés peuvent être divisés en trois grandes classes, considérées ici par ordre croissant de tenue en température : Composites à matrice organique (pour une utilisation $T < 300\text{ C}^\circ$), Composites à matrice métallique (pour une utilisation à $T < 600\text{ C}^\circ$) et Composites à matrice céramique (pour une utilisation à $T < 1000\text{ C}^\circ$) [9,24].

III.1.1. Composites à matrice organique (CMO)

Les composites à matrice organique sont les plus courants à l'échelle industrielle, se constitués d'une résine polymère renforcée par des fibres (fibre de verre, de carbone, de d'aramide etc...). Ils sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à rupture. Ce type de composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques où la réduction de poids est essentielle [25, 26].

III.1.2. Composites à matrice métallique (MMC)

Dans ces composites, la matrice est un métal ou un alliage léger tel que l'aluminium, le magnésium ou le titane [26] sont renforcés par des renforts généralement non-métalliques, souvent des céramiques. Les composites à matrice métallique ne sont pas

aussi largement utilisés que leurs homologues en organiques, très coûteux, ils caractérisés par une haute résistance, fracture la ténacité, résister à une température élevée. Leurs applications dans les moteurs d'automobile sont bien établies [25 - 27].

III.1.3. Composites à matrice céramique(CMC)

S'agit d'une matrice de céramique renforcée de fibres courtes ou de filaments. Matrice et renforts sont tous deux constitués de matériaux tels que le carbure de silicium, le carbone ou l'alumine [26]. Ce type des composites sont caractérisé par un points de fusion élevés, bon résistance à la corrosion, stabilité aux températures élevées et haute résistance à la compression, beaucoup plus coûteux, utilisé dans des environnements sévères et réservé aux applications de très haute technicité comme dans les moteurs de fusées, les boucliers thermiques, ou les turbines à gaz [25,27].

III.2. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la géométrie des constituants (géométrie des renforts), nous pouvons diviser les matériaux composites en deux grandes classes : les matériaux composites à fibres et les matériaux composites à particules.

III.2.1. Composites à fibres

On peut dire que le matériau composite est un matériau composé à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibres, c'est à dire qu'il possède une direction privilégiée. L'arrangement des fibres, leur orientation définissent les propriétés souhaitées et peuvent rendre le matériau fortement anisotrope ou fortement isotrope dans un plan [28]. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues (fibres longues), soit sous forme de fibres discontinues (fibres courtes).

III.2.2. Composites à particules

On peut dire que le matériau composite est un matériau composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide [25], ces particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.... [29].

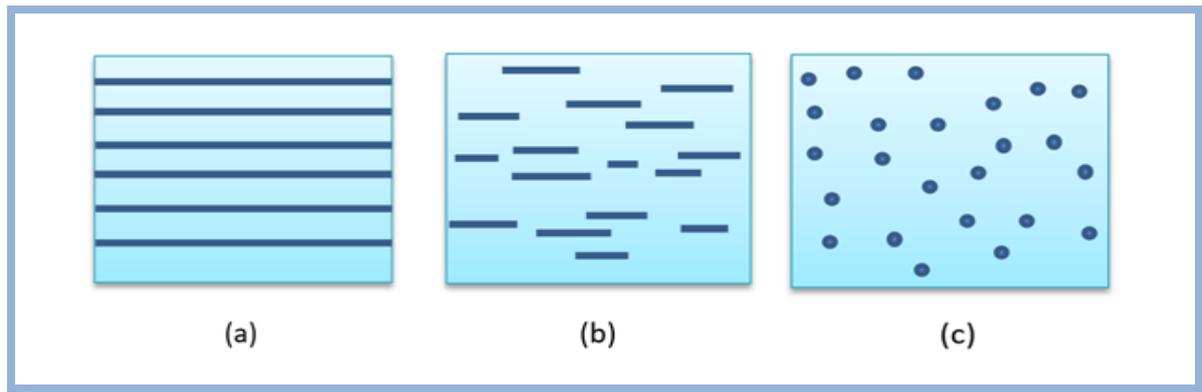


Figure (I.8) : classification des composites suivant la forme des constituants ((a) : composite à fibres longues, (b) : composite à fibres courtes, (c) : composite à particules)

IV. Architecture d'un matériau composite

La plupart des propriétés physiques des matériaux composites sont relativement conditionnées par ses structures. Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : les monocouches, les stratifiés et les sandwichs.

IV.1. Les mono-couches

Les monocouches (plis) représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort à fibres longues (unidirectionnelles UD, Tissées), à fibres courtes (structure orienté, aléatoire) [12]

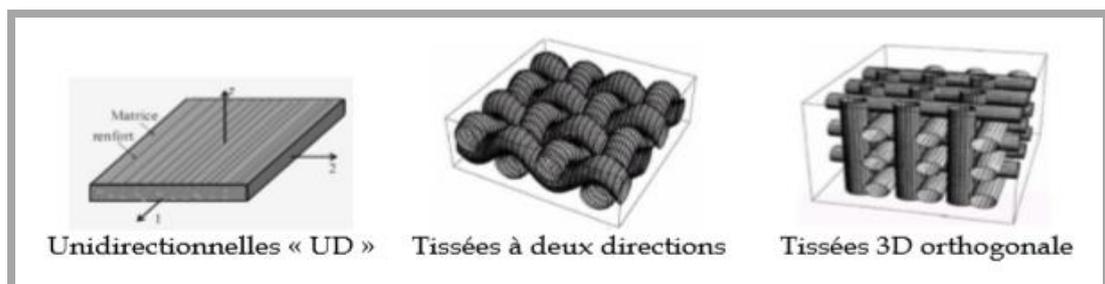


Figure (I.9) : structures des matériaux composites monocouches [4].

IV.2. Les stratifiés

Les stratifiés ou multicouches sont constitués d'un empilement successif de plusieurs mono-couches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (La superposition des monocouches) [30]. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre

de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [31].

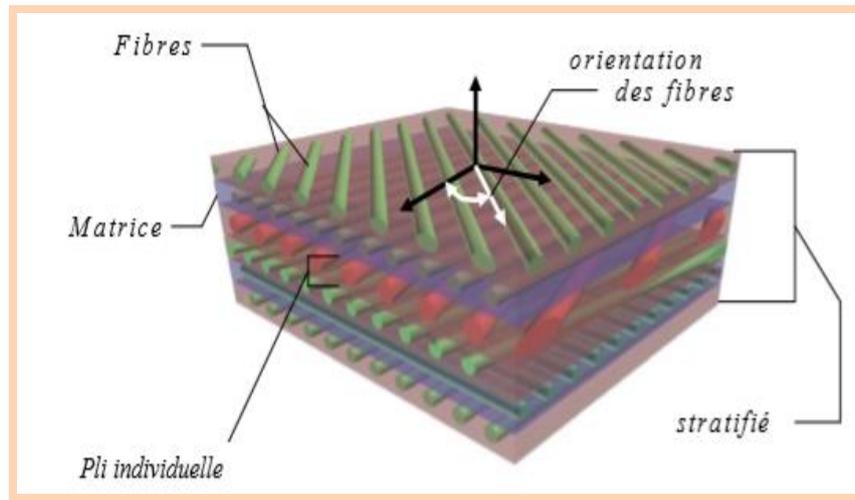


Figure (I.10) : structure d'un composite stratifié [32]

IV.3. Les sandwichs

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur renfermant un cœur (âme) de forte épaisseur et de faible résistance. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Ces structures possèdent une grande rigidité en flexion et torsion et d'une excellente isolation thermique [5, 31].

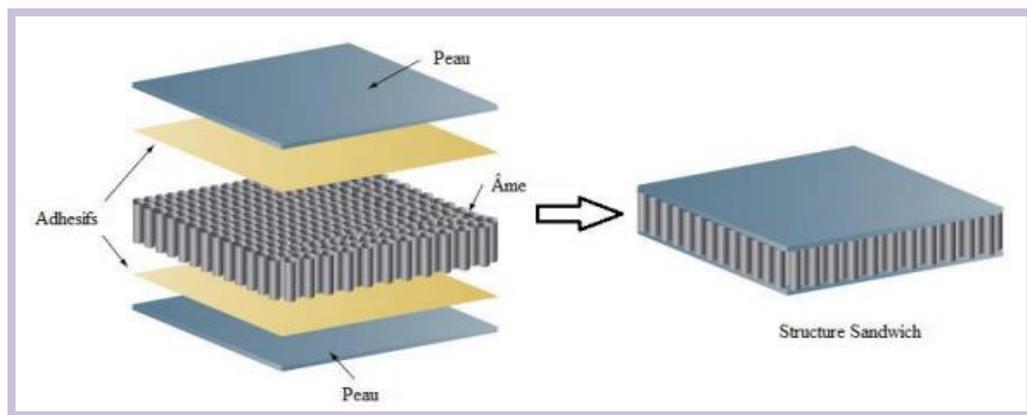


Figure (I.11) : Structure d'un matériau sandwich [33]

V. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les matériaux composites présentent de nombreux avantages et certains et inconvénients, peuvent être résumés dans le tableau ci-dessous.

Avantages	Inconvénients
✓ Intégration de fonctions des composants élémentaires (propriétés améliorées)	✓ Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
✓ longue durée de la vie	✓ Sensibilité aux agents atmosphériques (eau, rayons UV, humidité, température...)
✓ L'adaptabilité	✓ Difficulté à réparer
✓ Absence de corrosion	✓ Matériaux très sensibilité à la chaleur
✓ Tenue aux agents chimiques (résistance chimique)	✓ L'augmentation des déchets qui en résultent et difficulté d'élimination ou de recyclage
✓ Résiste au feu	
✓ Gain de masse (la réduction du poids)	
✓ Grande résistance à la fatigue	
✓ Très bonne légèreté et souplesse	
✓ La possibilité de fabriquer des grandes ainsi que des petites pièces sous différentes formes (formes complexes)	
✓ Peut être utilisé dans un large éventail d'applications	
✓ Résistance élevée aux chocs	

Tableau (I.2) : Les Avantages et les inconvénients des matériaux composites [34, 35]

IV. Domaines d'application

Grâce au procédé d'assemblage associant une fibre à une matrice et les propriétés de très hautes performances de matériau final. Les matériaux composites se substituent de plus en plus aux métaux traditionnels dans la plupart des applications industrielles et inondent de plus en plus notre quotidien. Dans ce qui suit, nous passerons en revue les applications les plus populaires de ces matériaux.

IV.1. Applications aérospatiales

La transition des matériaux composites de l'expérience de laboratoire à l'usage pratique dans la production des avions militaires et civils est une réalité. Des progrès ont passé de l'aviation militaire à l'aviation commerciale, et aujourd'hui à la communauté d'aviation générale (environ 50% de la composante de l'espace aérien est constituée des

composites), l'industrie aéronautique utilise principalement des composites en fibre de carbone en raison de leurs caractéristiques de haute performance [36, 37].

La principale motivation d'utilisation des matériaux composites pour la réalisation de structures sur les produits aéronautiques est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques. L'utilisation de matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel dont les gains de masse varient de 10 à 20% [6].

IV.2. Industrie des transports terrestres et maritimes

Dans le domaine des transports, les matériaux composites ont été utilisés dans les voitures, les trains, les navires et autres outils de transport depuis plus d'un demi-siècle, les matériaux composites sont principalement utilisés dans une variété de composants de carrosserie, (capot moteur, tableau de bord, des boucliers amortisseurs de choc, porte, plancher, siège, camion frigorifique, moteur à incendie, wagon couvert etc....).

L'intégration des matériaux composites dans l'industrie des transports terrestres et maritimes a pu réduire substantiellement la consommation de carburant au moyen de l'économie du poids obtenu. La société LOHEAC de transports routiers a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie du poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce. Cette innovation a permis de réduire le poids de la cabine de 875 Kg. Équipée en acier, à 455 Kg seulement et de présenter une plus grande solidité et une meilleure résistance aux dégâts [36].

I.3.Applications électrique et électronique

Les matériaux composites sont équipés d'une isolation électrique de haute qualité, sans étincelles et de bons agents antimagnétiques. Ils sont utilisés pour la construction de colonnes de distribution, de tuyau isolant, de bague de retenue électrique, de lampadaire, de télégraphpole et d'outil de fonctionnement sous tension.de boîtiers de liaison et de profils pour la séparation des phases de transport de courant afin d'éviter les courts-circuités, .et aussi dans tous les composants électroniques.

IV.4. L'industrie chimique

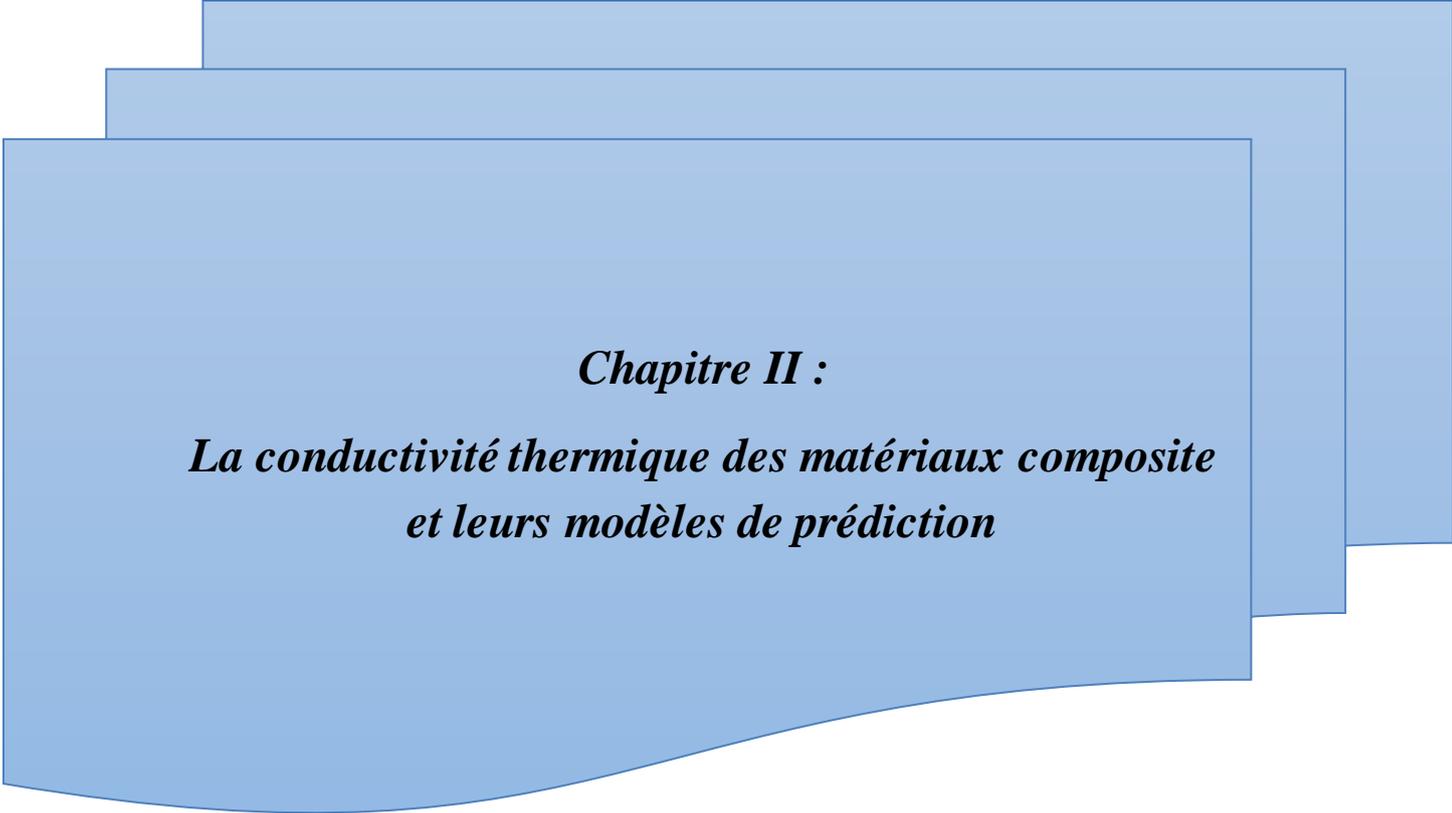
Les matériaux composites sont l'un des matériaux les plus populaires utilisés dans l'industrie chimique (l'industrie des équipements anti-corrosion), en particulier les plastiques renforcés de fibres de verre, sont très résistants aux produits chimiques corrosifs. Comprennent principalement (les laveurs, les conduits, les tuyaux, de réservoirs de stockage, de cheminées et de soufflantes d'échappement, de colonnes, de pompes, de réacteurs, etc....), pour les environnements acides et alcalins.

IV.5. Industrie des articles de sport et de loisir

En raison de leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique et dynamique, leur stabilité dimensionnelle et haut degré d'amortissement des vibrations de stabilité thermique supérieure, de bonne résistance au frottement et à l'abrasion, et peut être traité et façonné facilement, les composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux des équipements sportifs et de loisirs contrairement aux matériaux traditionnelles tels que : les bateaux de planification, les voiliers, les skis et les bâtons, les raquettes de tennis , les cannes à pêche , le hockey, les planches à voile et les mâts, les yachts amusants, les arches, Cadres de vélo et instruments de musique etc....[38,39].

IV.6. Applications en médecine

Les composites sont des matériaux non viables utilisé dans des dispositifs médical et destiné à interagir avec le système biologique. Au fil des siècles, les progrès des matériaux synthétiques, des techniques chirurgicales et des méthodes de stérilisation ont permis l'utilisation de matériaux composites de nombreuses manières. La pratique médicale utilise aujourd'hui un grand nombre de dispositifs et d'implants. Composites sous forme de sutures, remplacements osseux et articulaires, greffes vasculaires, valves cardiaques, lentilles intraoculaires, implants dentaires, stimulateurs cardiaques, biocapteurs, cœurs et membres artificiels, etc. largement utilisés pour restaurer la fonction de tissus ou d'organes perturbés ou dégénérés, améliorer la fonction, aider à la cicatrisation, corriger les anomalies et ainsi améliorer la qualité de vie des patients [37].



Chapitre II :
La conductivité thermique des matériaux composite
et leurs modèles de prédiction

Introduction

Au cours de ce chapitre, nous donnerons un bref aperçu sur la conductivité thermique des matériaux composites. Ensuite nous exposerons une explication détaillée de leurs différents modèles de prédiction.

I. La conductivité thermique k des matériaux composites

La conductivité thermique (k) est une grandeur physique qui désigne le pouvoir des matériaux à laisser passer la chaleur (ou l'isoler), ou c'est la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température (s'exprimer en $W.m^{-1}.K^{-1}$). Plus la conductivité est élevée, plus le matériau laisse passer la chaleur. A l'inverse, plus la conductivité est faible, plus le matériau est isolant [40].

La conductivité thermique des matériaux composites est une grandeur intrinsèque plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

II. Les modèles de prédiction de la conductivité thermique effective K_{eff}

En générale la valeur de la conductivité thermique k pour des matériaux isotropes (homogènes) est constante dans toutes les directions et en chaque point du matériau, par contre elle varie localement dans le cas des matériaux composites anisotropes (hétérogènes) en raison de l'existence de plusieurs phases. Dans le cas des matériaux composite anisotropes la conductivité thermique peut être approchée statistiquement grâce à une valeur moyenne équivalente : un nouveau terme k_{eff} correspondant à la conductivité thermique effective est alors introduit [41].

La détermination des valeurs de la conductivité thermique effective des matériaux composites est l'un des problèmes classiques dans les milieux hétérogènes, elle a fait l'objet de nombreuses études bibliographiques [41,42], en raison de l'importante et l'utilisation croissante de ces matériaux dans les systèmes à haute température, les applications de transfert de chaleur et de l'isolation thermique. Pour cela, il est nécessaire de connaître toutes les informations sur la conductivité thermique pour déterminer les conditions optimales pendant le traitement des matériaux, ainsi que pour analyser le transport de chaleur dans les matériaux pendant les applications pratiques [42].

A cet effet, de nombreux modèles ont été développés pour prédire le comportement de la conductivité thermique dans les matériaux composites anisotropes, ce qui sera expliqué en détail dans ce qui suit.

II.1. Les modèles analytiques

II.1.1. Modèles de premier ordre (ou modèles en série et en parallèle)

D'après cette approche, on peut supposer que la conductivité thermique réelle d'un certain milieu est toujours comprise entre deux valeurs extrêmes, la borne inférieure (modèle série) correspond à un milieu où le flux de chaleur est perpendiculaire aux strates, et la borne supérieure (modèle parallèle) correspond à un milieu où l'orientation des strates et la direction du flux de chaleur sont disposé parallèlement [43]. Ce modèle a été proposé par Wiener en 1912, qui lui a appliqué une analogie électrique au problème du transfert de chaleur dans les matériaux hétérogènes. Les deux phases sont supposées arrangées parallèlement l'une à l'autre. La conductivité thermique effective est alors bornée par les deux valeurs k_{inf} et k_{sup} , avec : $k_{inf} \leq k_{eff} \leq k_{sup}$ [44]

$$\frac{k_{sup}}{k_m} = \varphi_m + \frac{k_{re}}{k_m} \varphi_{re} \quad \text{et} \quad \frac{k_{inf}}{k_m} = \frac{\frac{1}{k_m}}{\frac{\varphi_m}{k_m} + \frac{\varphi_{re}}{k_{re}}} \quad \text{Avec : } \varphi_m = 1 - \varphi_{re}$$

Où :

k_{eff} : la conductivité thermique effective de composite matrice/renfort.

k_{sup} : la conductivité thermique de la borne supérieure.

k_{inf} : la conductivité thermique de la borne inférieur.

φ_m : la concentration volumique de la matrice.

φ_{re} : la concentration volumique de renfort.

K_m : la conductivité thermique de la matrice.

k_{re} : la conductivité thermique de renfort.

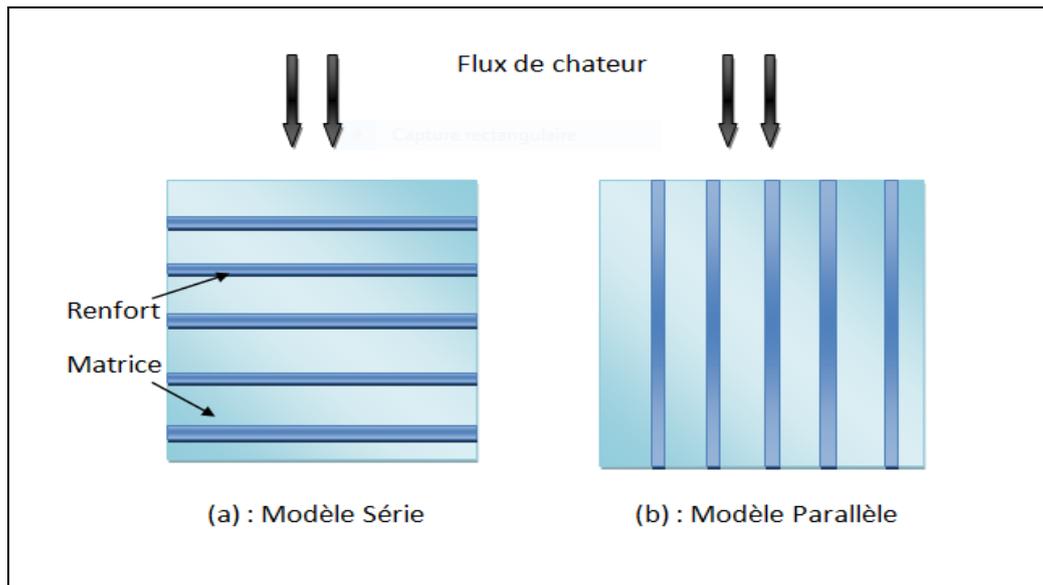


Figure (II.1) : Modèles de premier ordre

II.1.2. Modèle de Maxwell

L'approche de Maxwell, initialement associée à un problème de conduction électrique dans un milieu hétérogène suppose que le milieu granulaire soit constitué de plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p . L'ensemble du modèle est représenté par un milieu bi-phasique, constitué d'une phase continue et de particules sphériques non poreuses. Ce modèle de calcul concerne les milieux granulaires de forte porosité. Les particules sont séparées d'une distance, et les interactions entre les champs thermiques des particules sont négligées [43,5].

La formule de Maxwell est donnée par :

$$k_{eff} = k_m \frac{2k_m + k_{ch} - 2(k_m - k_{re})\phi}{2k_m + k_{ch} + 2(k_m - k_{re})\phi}$$

Où :

K_{eff} , k_m et k_{re} : sont respectivement la conductivité thermique effective de composite, la conductivité thermique de la matrice et la conductivité thermique de renfort

ϕ : La fraction volumique des renforts (des sphères) tel que $\phi_{re} = \frac{V_{re}}{V}$ et $V = V_m + V_{re}$

V , V_m et V_{re} : sont respectivement le volume de totale de composite, le volume de matrice et le volume de renfort.

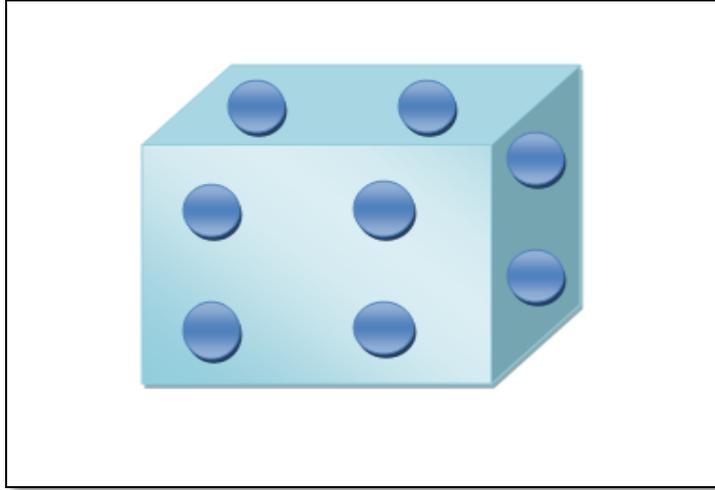


Figure (II.2) : Modèle de Maxwell

II.1.3. Modèle de Bruggeman

Ce modèle est l'une des corrélations utilisées pour la prédiction de la conductivité thermique effective, proposé en 1935 par Bruggeman [5]. Elle est basée sur les suppositions de Maxwell [44], et donnée par la formule suivante :

$$1 - \varphi_{re} = \frac{k_{eff} - k_{re}}{k_m - k_{re}} \left(\frac{k_m}{k_{eff}} \right)^{\left(\frac{1}{1+x} \right)}$$

Où :

k_{eff} , k_m et k_{re} : sont respectivement la conductivité thermique effective de composite, la conductivité thermique de la matrice et la conductivité thermique de renfort.

φ_{re} : la concentration volumique de renfort.

X : constante qui dépend de la géométrie des inclusions ($x=2$ pour les inclusions sphérique, $x=1$ pour les inclusions cylindriques).

II.1.4. Modèle de Topper [45]

Dans ce modèle, Topper est utilisée un modèle d'énergie série-parallèle pour un système de vides cubiques dans un réseau ordonné. Où le transfert radiatif est négligeable la conductivité thermique équivalente donnée par la formule suivante :

$$\frac{1}{k_{eff}} = \left[\frac{1 - \varphi_3^{\frac{1}{3}}}{k_m} + \frac{\varphi_3^{\frac{1}{3}}}{k_{re} \varphi_3^{\frac{2}{3}} + k_m (1 - \varphi_3^{\frac{2}{3}})} \right]$$