

1.1. Bref historique

Parmi les premiers matériaux composites fabriqués par l'homme on trouve notamment [1] :

- le bois et le torchis (mélange de terre argileuse et de paille) considérés comme les premiers matériaux composites de l'histoire. Le torchis était le matériau de construction des habitations. Les Celtes l'utilisaient principalement pour la construction des murs de leurs maisons en raison de son faible coût et de ses propriétés isolantes (inertie et accumulation thermique : chaleur en hiver et fraîcheur en été). Le torchis était composé d'une matrice plastique (la terre) et de renforts (les fibres végétales).
- les briques d'argile auxquelles les anciens Egyptiens ajoutaient de la paille pour améliorer leur solidité.
- les poteries auxquelles les Incas ajoutaient des fibres végétales pour les renforcer.
- la glace des igloos à laquelle, les Esquimaux incorporent aujourd'hui encore de la mousse pour la rendre moins cassante et plus façonnable
- les arcs Mongols dont l'âme en bois était contrecollée de corne sur sa face interne et de tendon au dos.
- les sabres traditionnels des Japonais dont le procédé de fabrication (dosage de fer et de carbone, martèlement et pliage) utilisé par les forgerons leur conférait une résistance et une souplesse remarquables.
- l'imperméable avec du caoutchouc sur des tissus inventé en 1823 par Charles Macintosh.
- le béton armé inventé en 1892 par François Hennebique.
- le premier composite à fibre de verre en 1942.

1.2.Définition et caractéristiques générales

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs[3]. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues

de natures différentes appelée le renfort ou bien matériau renforçant et une phase continue appelée la matrice.

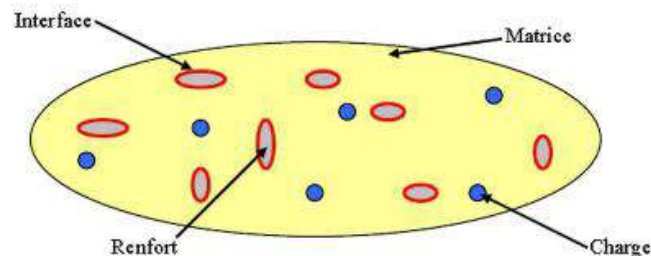


Fig.1.1 : Représentation schématique d'un matériau composite [4]

Le renfort assure souvent la tenue mécanique dans un composite, il forme le squelette, ou encore l'armature du composite. Il a pour fonction d'endosser l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite, alors que la matrice assure la liaison des renforts entre eux, leur protection du milieu extérieur, la répartition de la charge mécanique au sein du matériau, la cohésion et le transfert des efforts vers le renfort [5]

Il existe plusieurs types de matériaux composites. Cependant, deux grandes familles se distinguent en fonction des caractéristiques de la matrice et des renforts :

Les *composites de grande diffusion* (GD), qui sont peu dispendieux et occupent une grande part du marché. Ils représentent 95 % des matériaux composites utilisés. En général, ce sont des plastiques armés ou des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30 %.

Les principaux constituants de base sont les résines polyester (résines thermodurcissables) avec des fibres de verre. Les demandeurs les plus importants sont l'industrie des transports (Automobile, ferroviaire) et la construction électrique, destinés à des fabrications en grande série, souvent très automatisés.

- Les *composites à hautes performances* (HP), qui se trouvent le plus souvent renforcés par des fibres de carbone ou d'aramide, et sont surtout réservés à des secteurs de forte valeur ajoutée comme le secteur médical, l'aéronautique, les sports et les loisirs.

1.3. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites sont classés en trois grandes familles en fonction de la nature des constituants et en deux familles selon la forme des constituants.

1.3.1. Classification selon la forme des composants

Les matériaux composites sont classés en deux grandes classes[6-7]:

- Les matériaux composites à fibres.
- Les matériaux composites à particules.

1.3.1.1. Composites à fibres

Dans ce cas de composite, le renfort se trouve sous forme de fibres, ces dernières se présentent soit sous forme de fibres continues (longues) ou discontinues (fibres courtes, coupées), ...etc. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de moduler les propriétés mécaniques des matériaux composites MC, pour obtenir des matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur dans ce cas possède un matériau qu'il peut modifier ses caractéristiques en jouant sur : la nature des constituants, la proportion des constituants, l'orientation des fibres et le cahier de charges imposées, etc.

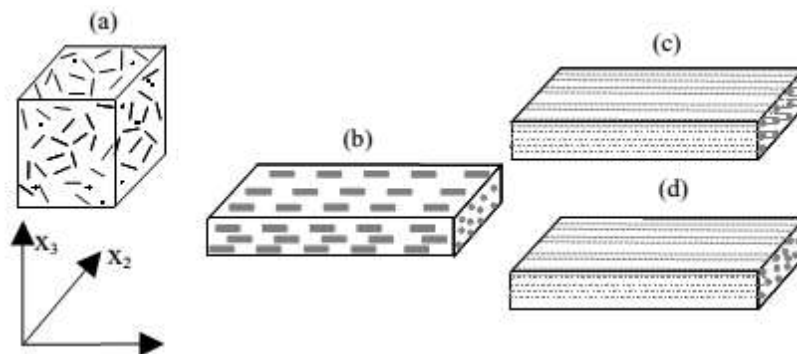


Fig. 1.2: Matériaux composites à fibres

1.3.1.2. Composites à particules

Un matériau composite est dit composite à particules si le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont utilisées généralement pour améliorer certaines propriétés des

matériaux ou des matrices : rigidité, tenue à la température, résistance à l'abrasion, diminution du retrait...etc. Mais dans plusieurs cas, les particules sont utilisées comme charges pour réduire

les coûts des matériaux, sans altérer aux caractéristiques de ces derniers.

1.3.2.Classification selon la nature des composants

Selon la nature des matrices, les MC sont classés comme[8] :

- Des composites à matrice organique.
- Des composites à matrices minérales.
- Des composites à matrices métalliques.

1.4.Eléments constituant les matériaux composites

Un matériau composite est constitué de :

- **Une matrice** : son rôle est de lier les fibres constituant le renfort, répartir les efforts, et assurer la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique.
- **Un renfort** : constitué de fibres, considéré comme l'armature, ou le squelette de la structure à laquelle il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est souvent de nature filamenteuse (des fibres organiques ou non organiques).
- Il existe **une interface** qui assure la compatibilité renfort-matrice et qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif.

Des charges et additifs: sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et, ainsi, de lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques. De manière générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites.

1.5. La matrice

1.5.1. Les matrices organiques et polymères

Les résines polymères les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables (TD) et les résines thermoplastiques (TP). La structure des matrices thermoplastiques (TP) se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent), cette opération est réversible. La structure des matrices thermodurcissables (TD)

a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement, la transformation est donc irréversible.

1.5.1.1. Les matrices thermoplastiques

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement, à l'aide de fibres et de charges, leur confère des tenues thermiques et mécaniques améliorées et une bonne stabilité dimensionnelle[7].

1.5.1.2. Les matrices thermodurcissables

Les thermodurcissables ou les thermodurs sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois, mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques[9]. On retrouve dans cette famille les polyesters insaturés (vinyle ester, les dérivés allyliques, les polyesters condensés, etc.), les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes,...etc.).

1.5.1.3. Elastomères

Les élastomères sont des matières réticulées d'une manière incomplète. Le degré de réticulation est faible à la différence des thermodurcissables. Les pontages permettent aux macromolécules de revenir en place plus ou moins rapidement après une déformation sous contraintes. C'est la propriété fondamentale des élastomères.

1.5.2. Matrices céramiques

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison d'un coût élevé, les composites à matrices céramiques 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.

1.5.3. Matrices métalliques

Ces matrices ont été développées pour améliorer certaines caractéristiques des métaux et pour répondre à certains inconvénients des composites à matrices organiques (température d'utilisation limitée, vieillissement, etc.). Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet une amélioration de la rigidité, de la résistance mécanique et la tenue à la fatigue. Les matrices métalliques sont des d'alliages d'aluminium, de magnésium, de titan, de zinc ou de nickel. Ces matrices sont renforcées par des fibres de carbone, de carbure de silicium, d'alumine ou de bore. Ces composites présentent des caractéristiques mécaniques élevées et les conservent jusqu'à des hautes températures (400°C pour la matrice d'aluminium).

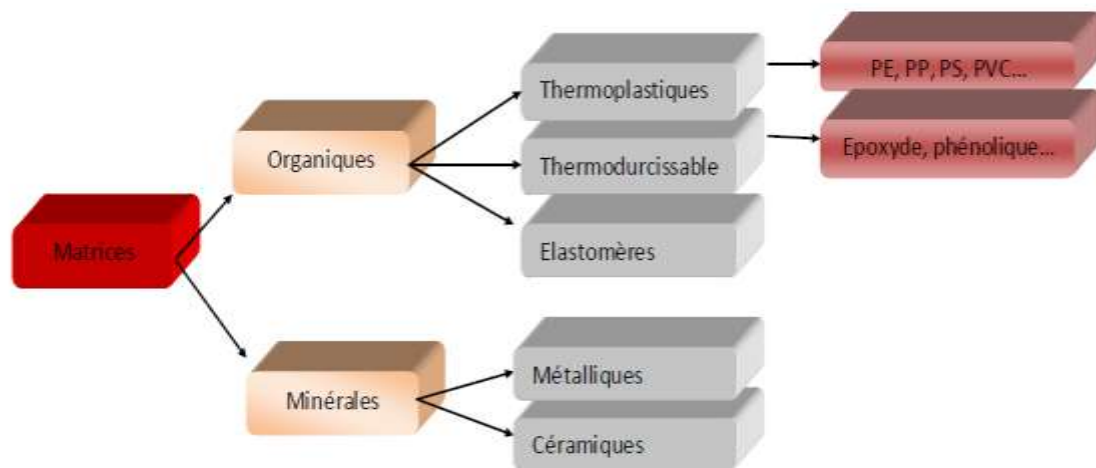


Fig. 1.3: Différents types de matrice[10]

1.6..Les renforts

C'est le principal porteur constitutif dans le matériau composite, il représente la phase discontinue d'un matériau composite, présent sous forme de particules ou de fibres (fibres de verre, fibres de carbone, fibres d'aramides...etc.), ainsi que les fibres végétales (lin, coton, farine de bois, farine de grignon d'olive...etc.) , il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, dureté...etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, propriétés électriques,...etc.

Le renfort apporte au composite ses performances mécaniques élevées, tandis que la matrice a pour rôle de transmettre les sollicitations mécaniques extérieur et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont :

- Des propriétés mécaniques élevées,
- Une masse volumique faible,
- Une bonne compatibilité avec les résines,
- Une facilité de mise en œuvre,
- Un faible coût.

Les renforts peuvent être classés en fonction de leur utilisation suivant leurs origines en renfort d'origine organique ou minéral.

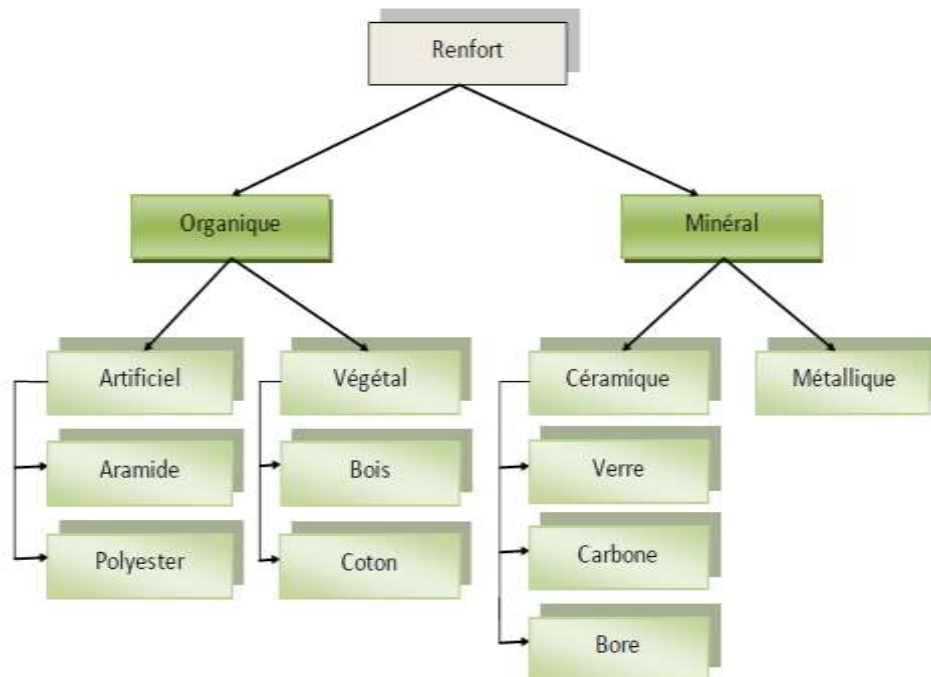


Fig. 1.4: Les différents types de renfort de base.

1.6.1. Types de renfort

On distingue plusieurs natures de fibres

1.6.1.1.Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

1.6.1.2.Fibre de verre

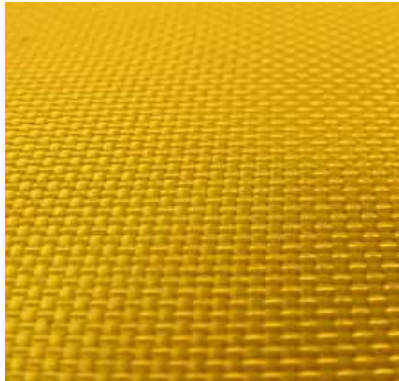
Elle constitue le renfort essentiel des composites à grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). Selon la composition chimique des matières premières, on distingue plusieurs types de fibres tels que :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

1.6.1.3.Fibre d'aramide (Kevlar)

Les fibres d'aramide ont de bonnes propriétés mécaniques en traction et bonne résistance aux chocs (excellente absorption des vibrations) et à l'abrasion, au feu et à la chaleur (Leur dilatation thermique est nulle), aux solvants organiques (exemple : carburants). Leur masse volumique est faible. Leurs inconvénients sont un mauvais comportement en compression, usinabilité délicate : grande difficulté à couper (résistance au cisaillement) ou à usiner, reprise d'humidité importante, sensibilité aux rayons ultraviolets, prix élevé. Les aramides sont utilisés dans de nombreuses applications à haute technologie dans l'aéronautique, l'aérospatiale, la construction navale, le secteur militaire pour fabriquer par exemple des gilets pare-balles ou des casques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes (Figure 1.5) :

- La fibre basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



Fibre d'aramide Tissée en toile ou taffetas Gaine isolante tressée en fibre d'aramide

Fig.1.5: Fibre d'aramide (Kevlar)

1.6.1.4.Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

1.6.1.5.Fibre de silice (ou de quartz)

Elles 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.

1.6.1.6.Fibres de polyéthylène

de haut module Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

1.6.2.Type de renforcement

L'assemblage des fibres utilisées lors de la fabrication du matériau constitue le « renfort » ; celui-ci peut être :

1.6.2.1.Unidimensionnel

Fibres unidirectionnelles, c'est-à-dire orientées suivant une même direction de l'espace. Elles peuvent se présenter sous deux formes :

- sans liaison particulière (roving) ;
- reliées par un fil (nappes).

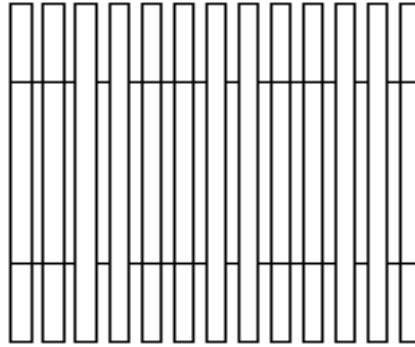


Fig.1.6: Armure unidirectionnelle

1.6.2.2. Bidimensionnel

surfaces tissées (tissus), ou non tissées.

Les tissus : les tissus sont constitués par des fibres disposées suivant deux directions perpendiculaires:

- une direction dite de chaîne répartie dans un plan suivant la longueur du tissu,
- une direction dite de trame s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

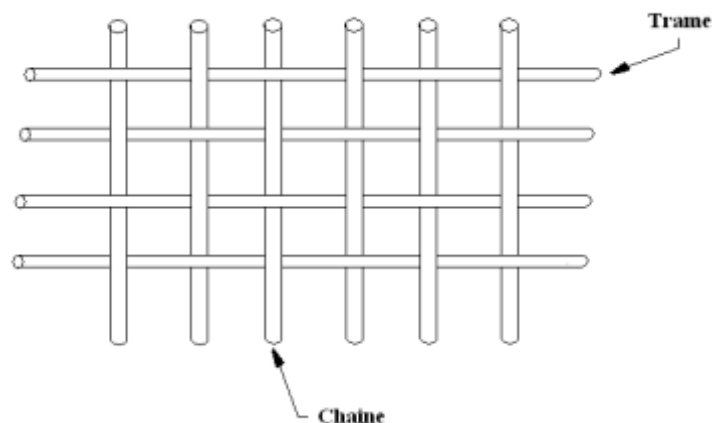


Fig.1.7: Chaîne et trame d'un tissu.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches ...etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode de trame. La figure 1-8 illustre les armures classiques utilisées: toile ou taffetas, satin, serge, armure haut module et armure unidirectionnelle.

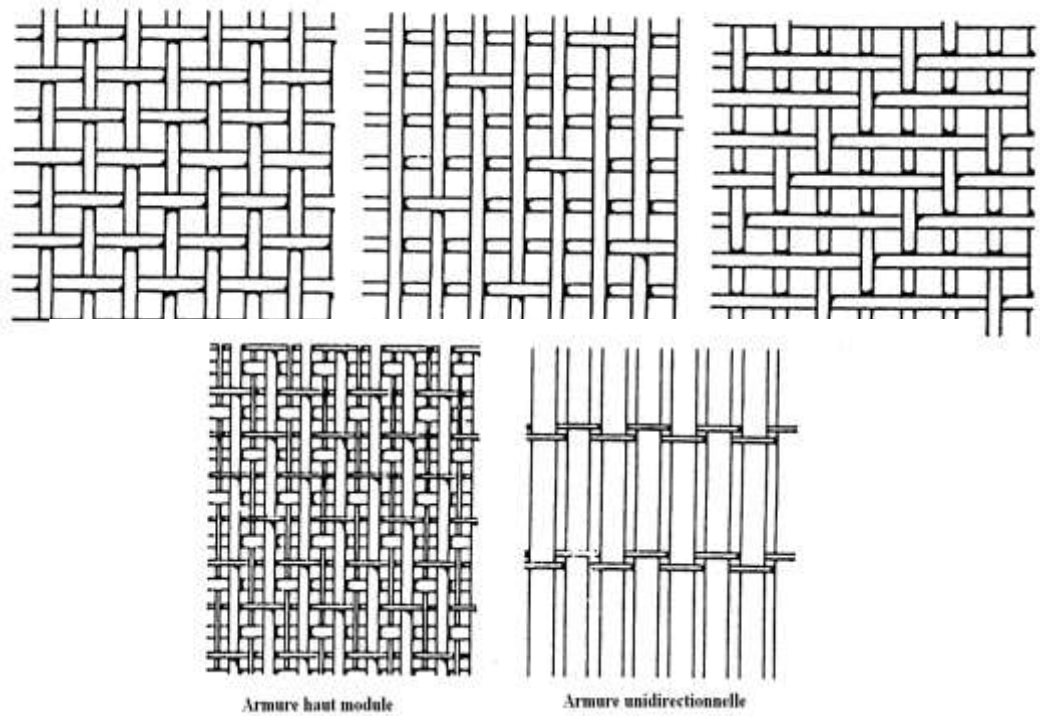


Fig.1.8: Les principaux types d'armures utilisés pour le maillage des tissus.

Les mâts

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre.



(a) mats à fil continu



(b) Natte des mats[4]

Fig.1.9: Les mâts

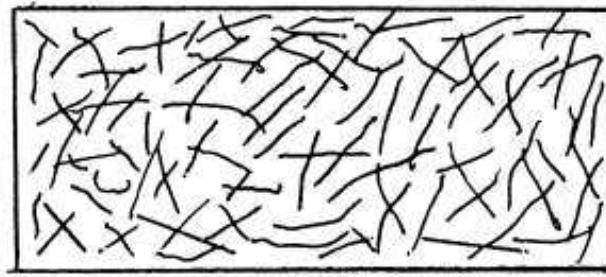


Fig. 1.10: Mâts à fils coupés

1.6.2.3. Multidirectionnel

Volumes préformés ou non, constitués par des fibres orientées suivant plusieurs directions (>2) de l'espace (appelés quelquefois « tissus multidimensionnels »).

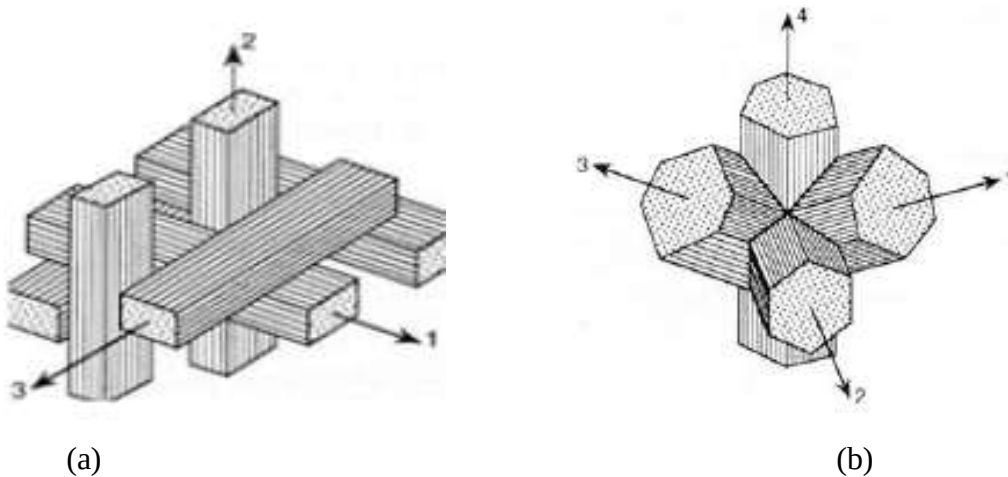


Fig. 1.11: a: Tissage 3D orthogonal b: Tissage 4D

1.7. L'interface

Les propriétés d'un matériau composite résultent des propriétés de ses constituants. Les bonnes qualités des constituants ne suffisent pas pour obtenir un composite, cependant une bonne interface qui assure la compatibilité renfort matrice est indispensable.

En effet la résine doit transmettre régulièrement et presque intégralement aux fibres les efforts supportés par le matériau, ce qui nécessite une bonne mouillabilité de la fibre dans la résine.

La mouillabilité caractérise la relation physique d'un liquide en contact avec un solide, elle dépend d'une adhésion fibre résine.

Il y a deux types principaux d'adhésion :

- L'adhésion physico-chimique : qui est un assemblage par liaisons intermoléculaires entre des éléments de la résine et de la fibre telle que cette adhésion peut être expliquée par la

diffusion mutuelle des molécules des plans superficiels de la fibre et de la résine, ou bien par la création des liaisons de type électrostatique par polarité des groupements négatifs et positifs de part et d'autre des constituants.

- L'adhésion mécanique : elle est définie par un accrochage de la résine dans les aspérités existant, ou créées spécialement à la surface de la fibre. Dans le cas d'un mauvais mouillage de la fibre, la résine n'imprègne pas toutes les aspérités et crée à certains endroits des défauts par rétention d'air après sa polymérisation.

1.8. Des charges et additifs

"Certains produits" peuvent être imprégnés dans une résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût, ces produits sont les charges, renforçantes ou non renforçantes.

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Elles peuvent être classées suivant leur forme géométrique en:

a) *Charges sphériques*: Se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles, pleines ou creuses avec un diamètre généralement compris entre 10 et 15 μ m.

Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique. Leur intérêt essentiel réside dans la forme sphérique qui évite les concentrations de contraintes et par conséquent diminue la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des charges non sphériques.

b) *Charges non sphériques*: Le mica est le matériau le plus utilisé. Il est incorporé sous forme d'écailles de dimensions transversales de 100 à 500 μ m et d'épaisseur de 1 à 20 μ m.

Les charges renforçantes ont pour rôle de diminuer le coût des résines en conservant leurs performances et/ou améliorer certaines de leurs propriétés.

Ces Charges augmentent la rigidité de la matrice si elles sont plus rigides que la résine qui la compose, en particulier pour les composites à fibre de verre ou de carbone.

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage,
- pigments et colorants,
- agents anti-retrait,
- agents anti-ultraviolets.

1.9. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les matériaux composites apportent de nombreux avantages fonctionnels:

- légèreté,
- résistance mécanique et chimique,
- maintenance réduite,
- liberté de formes.

Les matériaux composites permettent :

- D'augmenter la durée de vie des équipements grâce à leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la fatigue), mais aussi grâce à leurs propriétés chimiques (résistance à la corrosion).
- Un renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu.
- D'offrir une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique.
- Un enrichissement aussi des possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions.

Inconvénients qui freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène.
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous entend une très bonne connaissance des constituants mis en place.
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité. Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables des fibres.

1.10.Domainses d'utilisations des Matériaux composites

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents Domaines à cause de leur simplicité d'élaboration, leur légèreté ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Contrairement aux matériaux classiques qui présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques. Les matériaux composites peuvent répondre aux exigences des différents types de contraintes à partir d'une élaboration et d'un choix judicieux de matrice et de renfort, et ceci, dans différents domaines. Les matériaux composites ont été introduits progressivement dans les automobiles, à la suite des matériaux polymères dont certains sont utilisés comme matrices. De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines aéronautique, transport, bâtiment, loisirs...etc. Du point de vue écologique, les fibres naturelles utilisées comme renforts dans les composites prennent une place croissante et sont de nouveau d'actualité.

1.10.1. Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons. La société LOHEAC de transports routiers [11]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 renforcés de fibre à haute résistance. Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire, assurant 80% de la fonction suspension en évitant des ruptures brutales.

1.10.2. Produits aéronautiques

La principale motivation dans l'utilisation des matériaux composites pour la réalisation des structures aéronautiques est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques, figure (1.12).

Les matériaux composites présentent aussi un quasi insensibilité à la fatigue, en comparaison aux matériaux métalliques qui nécessitent une maintenance et un suivi régulier de la propagation des fissures. Ils ne sont pas aussi sujets à la corrosion, mais ils nécessitent une

bonne isolation électrique lors des assemblages avec des pièces en alliages légers entre le composite et le métal pour éviter la corrosion galvanique de l'aluminium (si la fibre de renfort est en carbone par exemple). Les techniques de fabrication utilisées permettent l'obtention de formes complexes directement par moulage avec possibilité de réaliser en une seule pièce un ensemble, figure (1.13), qui réalisé en métallique, nécessite plusieurs sous éléments. Ceci permet de réduire les coûts d'assemblage de façon importante.

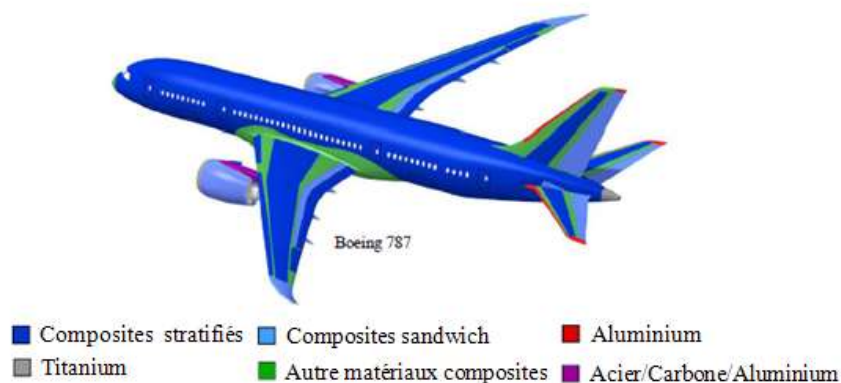


Fig. 1.12:Composites sur des structures d'aéronefs- Boeing 787(Source Boeing).

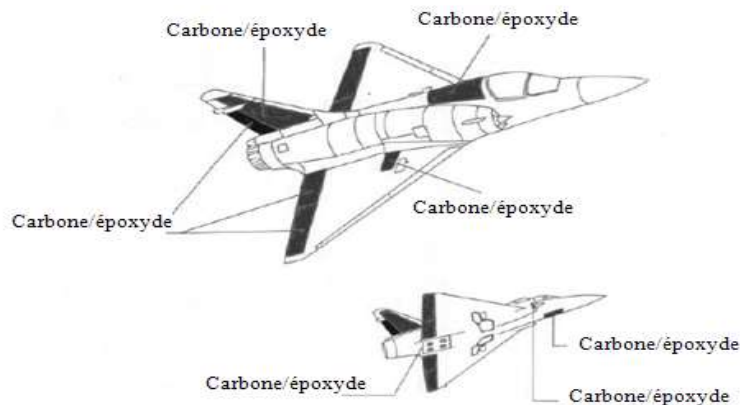


Fig.1.13:Les Pièces composites en carbone/époxyde sur des structures d'aéronefs-Mirage 2000

1.10.3. Produits militaires

Pour les produits militaires (missiles), le premier avantage, c'est la performance des matériaux composites, ensuite l'utilisation des composites sur les ailettes de guidage de missiles permet de garder une bonne maîtrise de la trajectoire jusqu'à la cible finale à cause de l'échauffement cinétique provoqué par le frottement de sur la structure des ailettes de

missile, figure (1.14), en fin de trajectoire les ailettes en alliage d'aluminium peuvent foudre dans certaines conditions et le missiles poursuit sa trajectoire sans contrôle ce qui entraîne une perte précis de tir.

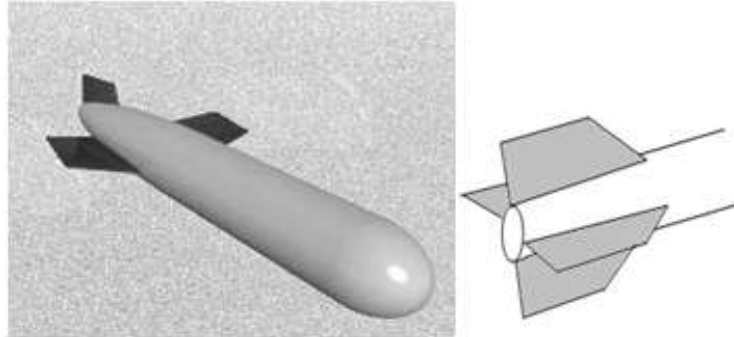


Fig. 1.14:Les ailettes de guidage de missiles

1.10.4. Industrie des articles de sport et de loisir

De par leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique' et dynamique et leur stabilité dimensionnelle, les composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux d'articles de sport et de loisirs tels que les skis et les bâtons, les raquettes de tennis, les cannes à pêche et de hockey, les planches à voiles et leurs mâts, les voiliers de plaisance, les aies, les cadres de vélos, des instruments de musique, ... au lieu du bois qui ne pouvait plus taire face à la demande créée par la civilisation des loisirs, ou l'aluminium qui ne correspondait plus aux critères modernes de performance et d'endurance.

1.10.5. Produits du travaux publics

Le béton armé ayant servi à construire ce pont est un matériau composite. La matrice est formée de béton dans lequel des tiges d'acier ont été insérées. Le pont peut ainsi résister aux contraintes de traction grâce aux tiges d'acier ainsi qu'aux contraintes de compression grâce au béton.



Fig1.15: Un pont au béton armé

1.11.Architecture du composite

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

1.11.1. Les monocouches

Le composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire d'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,...) assemblés sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites (fibres+matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible (≈ 0.125 mm). On distingue, le pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli mat (Le renfort est à structure aléatoire).

La superposition de la monocouche dans l'ordre du plan de drapage va constituer le stratifié.

1.11.2. Les stratifiées

Le composite stratifié ou multicouches est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation (Figure 1.16). Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite. La figure (1.17) montre un exemple de plan de drapage d'un stratifié.

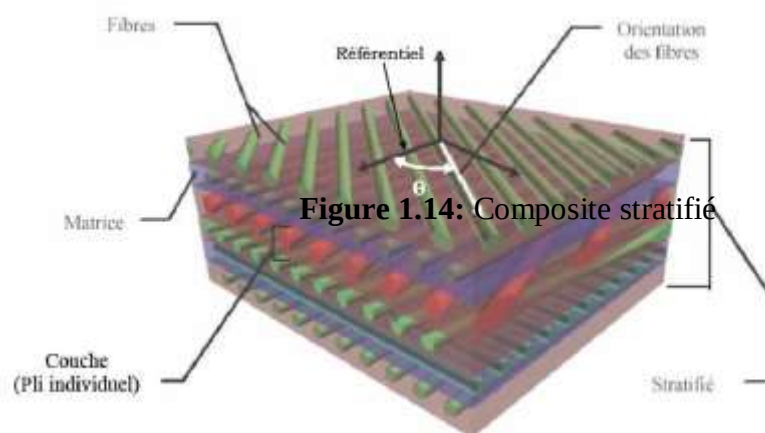


Fig. 1.16. Orientation des couches composites

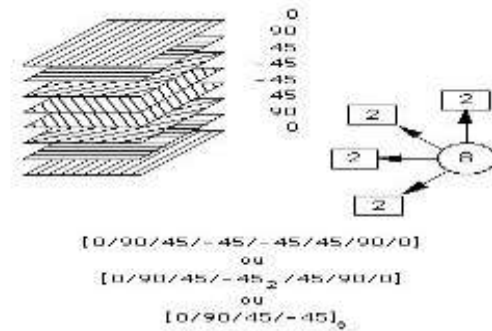


Fig. 1.17: Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié

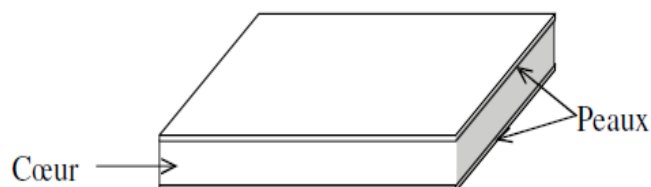
Les stratifiés peuvent être de trois types :

- 1) *Equilibrés*: le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction ($+\theta$) que de couches suivant la direction ($-\theta$),
- 2) *Symétriques*: les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir),
- 3) *Orthogonaux*: le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° . Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie des contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensembles de la pièce (voilement, gauchissement).

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.

1.11.3. 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 (Figure 1.18). L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une bonne résistance à la flexion et est un excellent isolant thermique.



ig. 1.18: Plaque sandwich