

## **Chapitre I**

### **Généralités sur les Matériaux Composites**

#### **I.1. Introduction**

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

#### **I.2. Définition**

Un matériau composite est, par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme filamentaire. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface.

Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps, le matériau et le produit.

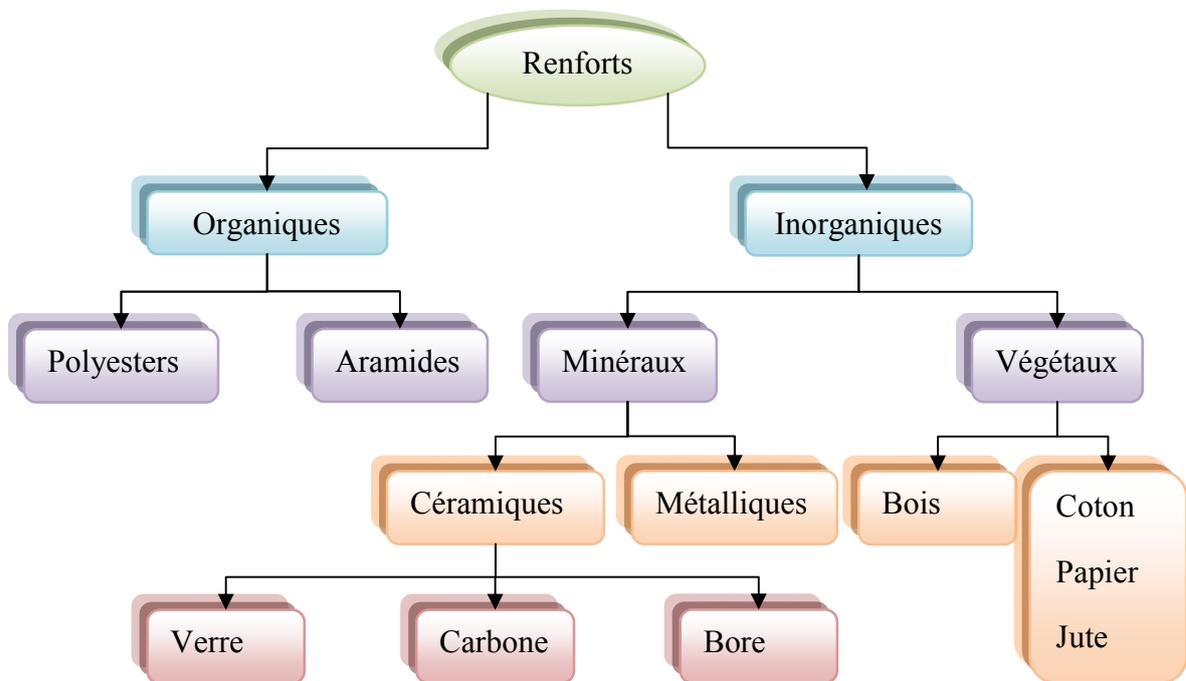
Actuellement, les composés à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

#### **I.3. Les Renforts**

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux Composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée la fibre continue qui donne au matériau un effet directif.

Ils sont caractérisés par:

- la nature de la fibre, minérale ou organique,
- l'architecture du renfort, Unidirectionnel (UD) ou Tissu.



**Figure I.1:** Principaux matériaux de renforts [27]

### I.3.1. Les différents renforts disponibles

Les principales fibres utilisées sont :

- Les fibres de Verre ;
- Les fibres de Carbone ;
- Les fibres d'aramides « Kevlar » ;
- Les Fibre de Bore ;
- Les Fibre de silice (ou de quartz) ;
- Les Fibre de polyéthylène de haut module.

#### I.3.1.1. Les fibres de verre

Sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1.250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour

obtenir des fibres continues. Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

- **fibres E** pour les composites grandes diffusions (GD) et les applications courantes
- **fibres D** pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés);
- **fibres R et S** pour les composites hautes performances (HP).

Les fibres de verre constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 90% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion (GD).

Les fibres de verre utilisées dans les composites ont un diamètre de l'ordre de 10 micromètres, nettement supérieur au diamètre critique (de l'ordre de 3 micromètres) pour que la fibre ne présente pas de risque respiratoire et ne puisse engendrer des cancers.

### **I.3.1.2. Les fibres de carbone**

Doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites, Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200°C), puis pyrolyse (1500 à 2500°C). Selon la température et le temps de cuisson.

Suivant les conditions de fabrication ; il existe toute une variété de fibres de carbone mais ; actuellement trois sortes sont commercialisées :

- \* les fibres haute résistance classique (HR) (types : As4, As6, T300 et X635) ;
- \* les fibres haute résistance module intermédiaire (type : IM6, X636) ;
- \* les fibres haute module (HM) (type : M40 et HM5) ;

D'un fabricant à l'autre, les propriétés mécaniques varient suivant les propriétés physiques et mécaniques moyennes.

### **I.3.1.3. Les fibres d'aramides « Kevlar »**

Issue de la chimie organique des polyamides aromatiques (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse température ; ses propriétés diffèrent des polyamides aliphatiques classiques (type PA 6-6, dit « Nylon ») ; on la nomme souvent « **Kevlar** », qui est la marque de son créateur, Dupont de Nemours.

Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- d'une adhérence moyenne entre matrice et fibre ;
- d'un prix encore trop élevé.

Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

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

**I.3.1.4. Les fibres métalliques ou céramiques**

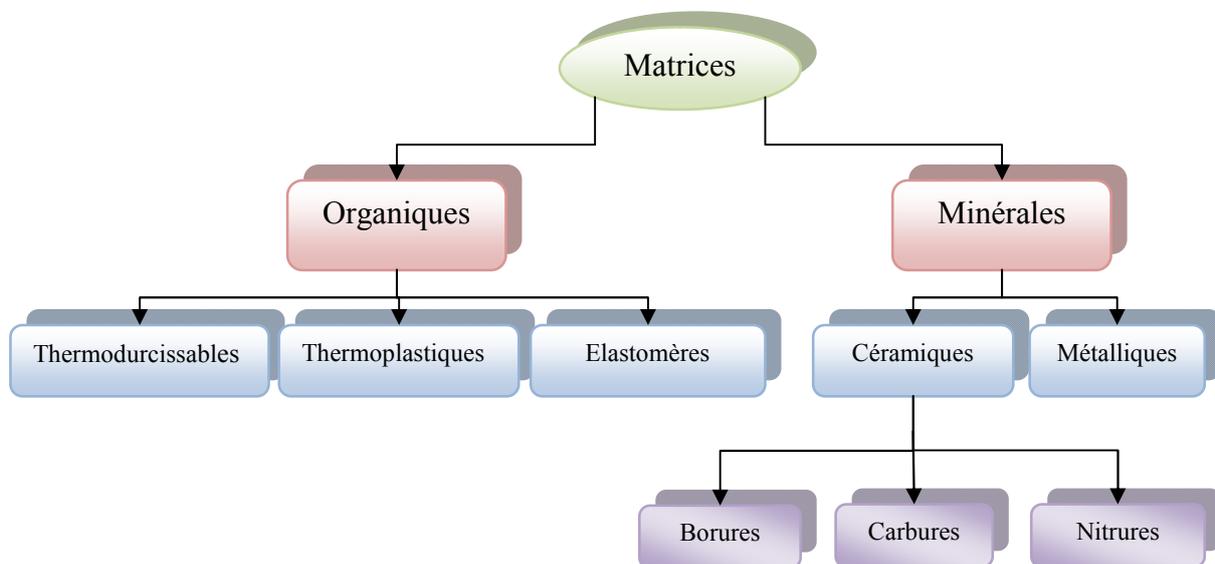
Sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication ; Les fibres de bore sont obtenues par réduction à 1100°C de chlorure de bore, qui se dépose sur un fil de tungstène de 10 à 15mm de diamètre.

Le diamètre résultant est de 100 à 200µm pour la fibre. La même procédure expérimentale est utilisée pour produire des fibres de carbure de silicium (SiC). Les derniers développements concernent la production de trichites, ("whiskers") qui sont des monocristaux filamenteux obtenus.

Par décomposition d'un sel métallique en ambiance réductrice. Leur longueur est de quelques millimètres, pour un diamètre d'environ 1µm. Elles approchent les propriétés d'un cristal parfait.

**I.4. Les Matrices**

La matrice permet de lier les fibres de renforts, de répartir les contraintes, d'apporter la tenue chimique de la structure et de donner la forme désirée au produit final. Les différentes familles de Matrice sont présentées l'organigramme suivant:



**Figure I.2** : Les différentes familles de Matrice [27]

### I.4.1. Matrices Organiques

Un très grand nombre, de matériau plastique peut être utilisé comme matrice dans les matériaux composites. Elles peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines « Thermodurcissables » qu'à celles des résines « Thermoplastiques ».

Parmi ces familles de résines, on distingue deux types de résines qui sont, actuellement, les plus utilisées:

#### I.4.1.1. Les résines thermodurcissables

Qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible.

- **Polyesters insaturés:** C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

Il existe différents types de résines :

- Ortho phtalique : la plus courante,
- Iso phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité,
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité,
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

- **Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

- **Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

- **Epoxydes** : Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- Du durcissement à chaud ou à froid ;

- De la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

- **Polyuréthanes et polyurées** : Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :

Polyols + polyisocyanates = polyuréthanes ;

Polyéthers + polyamines = polyurées.

#### **I.4.1.2. Les résines thermoplastiques**

Renforcés avec des fibres courtes (et parfois, avec des fibres longues) se développe fortement. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). La transformation est réversible.

#### **I.4.1.3. Les Résines thermostables**

Polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

**I.4.1.4. Les élastomères thermoplastiques**

Polymère fortement élastique.

Résines	nom	P (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$	R (MPa)	$\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ )	Prix (F/kg)
	Polyester	1300	3800	0.37	88	100	15
	Vinylester	1200	3500	0.35	81	65	18
	Epoxide	1220	5200	0.38	121	40	40
	Silicone	1550	1000	0.45	3	30	200
	Polyimide	1217	3450	0.35	80	36	150
	Phénolique	1350	3000	0.36	70	80	10
	Polyamide	1130	1900	0.33	70	85	25
	Polycarbonate	1100	2300	0.33	60	70	30
	Polyester saturé	1310	2800	0.33	55	90	
métaux	Aluminium	2630	69000	0.33	358	23	13
	Acier XC10	7850	210000	0.29	1000	10	10
	Cuivre	8940	119000	0.30	350	17	11
	Magnésium	1660	42000	0.30	280	25	27

**Tableau I.01** : Principales caractéristiques mécaniques des résines

- \*  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : Masse volumique ;
- \* E (MPa) : Module d'Young ;
- \*  $\nu$  : Coefficient de Poisson ;
- \* R (MPa) : Limite élastique en traction ;
- \*  $\alpha$  : Dilatation thermique.

#### **I.4.2. Les matrices métalliques**

L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à 3000°C interdit pratiquement l'usage des matrices organiques et suppose donc que l'élément de renforcement soit noyé au sien d'une matrice métallique. Les plus employées sont les métaux légers et leurs alliages en particulier l'aluminium, le titane et le nickel.

#### **I.4.3. Les matrices carbonées**

Sont fabriquées par décomposition d'une matière organique à haute température. La matière peut être un liquide (imprégnation en phase liquide), ou un hydrocarbure gazeux (décomposition chimique en phase vapeur). Le second procédé est plus rapide que le premier, qui peut durer plusieurs mois pour obtention d'une densification suffisante, mais moins reproductible. Le carbone se dépose en grains sur les fibres, assurant leur bonne liaison. Il est possible par exemple d'obtenir un composite carbone-carbone dont la densité est égale à celle du carbone massif.

#### **I.4.4. Les matrices céramiques**

Sont particulièrement intéressantes en raison de leur caractère réfractaire. Elles sont utilisées dans des pièces qui doivent subir sans dommage de très hautes températures (tuiles de protection thermique, brûleurs). Le point faible des céramiques, à savoir leur très faible résistance à la rupture en traction, est partiellement masquée par l'insertion de fibres dans la matrice. Les techniques de fabrication les plus courantes sont l'imprégnation en phase liquide (SiC-SiC par exemple) ou le dépôt plasma (par exemple dépôt de silicium puis nitruration à l'aide d'un traitement sous azote à 1450°C, qui produit une augmentation de volume et favorise la densification).

### **I.5. Propriétés physiques des composites**

Chaque type de matériau composite a ses propres caractéristiques physiques selon les caractéristiques de fibres utilisées, le pourcentage de fibres, le type de résine, les configurations de la section transversale et de la surface du matériau de renforcement et de la méthode de fabrication.

#### **I.5.1. Propriétés de masse**

Les fractions massiques (des fibres, de la matrice et des additifs) peuvent être déterminées à partir d'essais en laboratoire. La taille des particules inorganiques, qui peuvent être sphériques ou allongées, est donnée en termes de tailles moyennes des particules,

exprimée normalement comme le diamètre sphérique équivalent, en microns. La taille moyennes des particules varie entre 0,1 et 0,3  $\mu\text{m}$ . les tailles des particules sont généralement graduées, échelonnées, pour assurer une bonne distribution spatiale des fillers. On doit reconnaître que les diamètres des fibres de renforcement non métalliques courantes qui s'étendent de 6 à 25  $\mu\text{m}$ , peuvent être du même ordre de grandeur que les diamètres des fillers. Ceci peut avoir un effet sur les propriétés résultantes du composite. De plus, de nombreux fillers ont des formes allongées et peuvent produire une anisotropie structurale dans la phase matricielle. Cependant, la résine est normalement isotropique.

### **I.5.2. Propriétés thermiques**

La connaissance des coefficients d'expansion thermique (C.E.T) est particulièrement importante. Dans le cas d'un béton renforcé de barres en acier, les CET des deux matériaux ont des valeurs très proches. On a donc suggéré que le béton renforcé d'acier pouvait tolérer des changements en température sans générer des contraintes internes à l'interface entre les barres de renforcement et le béton. Celles-ci pourraient conduire à un endommagement ou à une réduction de la capacité d'adhérence. Mais les barres, dans ce cas-là, ont deux C.E.T, un dans le sens longitudinal et l'autre dans le sens transversal. Pour la plupart des matériaux composites unidirectionnels, couramment utilisés dans la construction, le C.E.T longitudinal est proche de celui du béton. Cependant, le C.E.T transversal est 2 à 10 fois supérieur à celui du béton. Ceci est dû au fait que le C.E.T longitudinal est dominé par les fibres (qui ont des C.E.T longitudinaux faibles) tandis que le C.E.T transversal est dominé par celui de la matrice, qui est, d'une façon significative, plus grand que celui des fibres.

On doit non seulement reconnaître que le C.E.T des matériaux composites ont des valeurs différentes dans la direction longitudinales et transversales, mais que , les constituants individuels peuvent aussi être anisotropiques et avoir des propriétés longitudinales et transversales différentes.

On sait, par exemple, que les fibres de carbone et d'aramide sont isotropiques transversalement. Elles ont des C.E.T différents dans les directions longitudinales et transversales.

### **I.5.3. Propriétés hygroscopiques**

Le coefficient d'expansion hygroscopique (C.E.H), est une propriété physique des matériaux composites. Il décrit les changements dimensionnels qui se développent, quand le matériau absorbe de l'humidité. Ce phénomène n'est pas considéré comme important pour les renforcements métalliques. Comme dans le cas des C.E.T, le C.E.H est différent dans les directions longitudinales et transversales. Les constituants peuvent atteindre des concentrations en humidité différentes à l'équilibre. De plus, la plupart des fibres absorbent beaucoup moins d'humidité que les résines polymériques (sauf dans le cas des fibres organiques, tels que les fibres d'aramides. Souvent, l'absorption de l'humidité dans la fibre est négligeable. Dans le cas des composites unidirectionnels, on suppose souvent que le C.E.H dans la direction longitudinale est nulle. De plus, on suppose que l'expansion hygroscopique dans la direction transversale est reliée au C.E.H de la matrice.

### **I.5.4. Propriétés chimiques**

Les propriétés chimiques des matériaux composites sont put être les propriétés les plus difficiles à identifier pour les renforcements. Ceci est dû au fait que la composition chimique des matériaux composites joue un rôle central dans deux domaines. Ceux-ci sont un grand souci pour les ingénieurs en construction: la perte des propriétés mécaniques (spécialement la rigidité) à température élevée et la durabilité.

## **I.6. Propriétés mécaniques des composites**

### **I.6.1. Déformation élastique**

Contrairement à l'acier, les matériaux composites ne montrent pas une déformation plastique, et leur rupture est fragile. Dans le béton on ne peut généralement pas accepter qu'il ait une déformation plastique.

### **I.6.2. Relation contraintes-déformations**

Les propriétés mécaniques des barres de renforcement, peuvent être obtenues à partir des propriétés des constituants, à l'aide de la loi des mélanges, qui considère que chaque constituant contribue selon sa proportion en volume dans le composite. Soit  $V_f$  la fraction volumique des fibres. En première approximation, le module d'élasticité du composite est donné par l'expression suivante:

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad \text{avec } V_f + V_m = 1$$

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f) = (E_f - E_m) V_f + E_m$$

Avec :

$E_c$ : module d'élasticité du composite ;

$E_f$ : module d'élasticité des fibres ;

$E_m$ : module d'élasticité de la matrice ;

$V_f$  : fraction volumique des fibres ;

$V_m$  : fraction volumique des matrices.

### I.6.3. Comportement en traction

La variation de la résistance en traction des matériaux composites est beaucoup plus élevée, comparée à celle de l'acier. La variation dépend du type de fibres, de la configuration des fibres, des liants et des dimensions de l'échantillon. Beaucoup d'essais ont été réalisés pour déterminer les résistances en traction des barres de renforcements. D'une façon générale, ces barres sont caractérisées par:

- Les résistances en traction des barres à base de fibres de carbone ( $V_f=47$  à  $70\%$ ) sont pour la plupart comprises entre 1100 et 2200 MPa, le module élastique de 100 à 150 GPa ;
- Les résistances en traction des barres en fibres de verre ( $V_f=50$  à  $60\%$ ) sont comprises entre 900 et 1100 MPa, le module élastique est autour de 45 GPa ;
- Les résistances en traction des barres en fibres d'aramide ( $V_f=43$  à  $70\%$ ) sont comprises entre 1350 et 1650 MPa et leur module d'élasticité est d'environ 60 GPa.

### I.6.4. Comportement en compression et cisaillement

Les matériaux composites sont généralement utilisés comme des renforcements de traction. Les résistances en compression et en cisaillement sont généralement très faibles. On n'utilise donc généralement pas les matériaux composites comme renforcement en compression et en cisaillement.

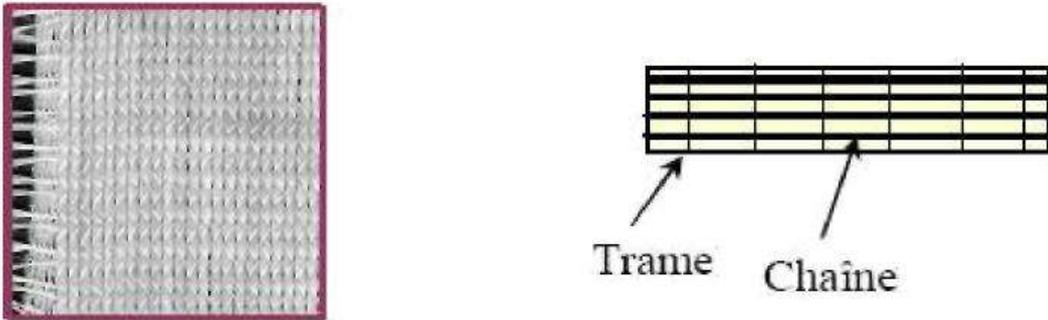
### I.7. Architectures de renforcement

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts:

### I.7.1. Les unidirectionnels

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.



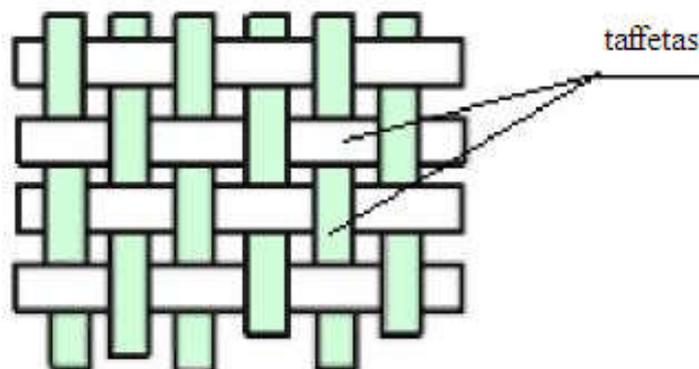
**Figure I.3 :** Nappe unidirectionnel des renforts

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

### I.7.2. Les tissus et rubans

#### I.7.2.1. Toile ou taffetas

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.



**Figure I.4 :** Toile ou taffetas

### I.7.2.2. Sergé

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.

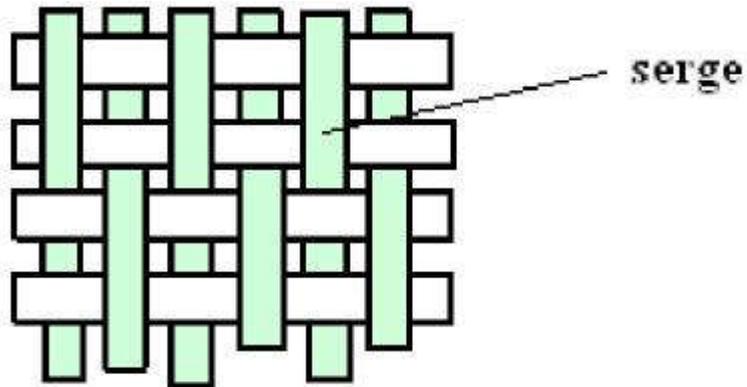


Figure I.5 : Un sergé 2/2

### I.7.2.3. Satin

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n- 1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

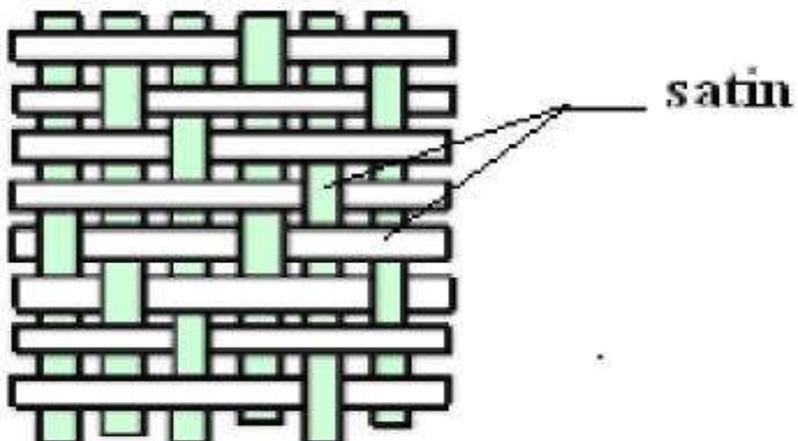


Figure I.6 : Tissu sous forme d'un satin

## **I.8. Les avantages et inconvénients des matériaux composites pour certains produits**

### **I.8.1. 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. 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, qui réalisé en métallique, nécessite plusieurs sous éléments. Ceci permet de réduire les coûts d'assemblage de façon importante.

### **I.8.2. Produits militaires**

Pour les produits militaires (missiles), le 1er 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, 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.

### **I.8.3. Produits spatiaux (satellites)**

Les déformations de la structure peuvent avoir une origine thermique avec des expositions en température pouvant varier entre  $-180^{\circ}\text{C}$  lorsque le satellite est dans l'ombre et  $+160^{\circ}\text{C}$  lorsque le satellite est exposé au soleil. De plus, sur la même structure, entre la face éclairée et la face à l'ombre, le gradient de température peut être important. Les structures en matériaux composites à matrice organique, de part, la valeur négative du coefficient de dilatation thermique des fibres de carbone et la valeur positive du coefficient de dilatation

thermique de la matrice, peuvent, avec une orientation optimisée des différentes couches constituant la structure, présenter globalement un coefficient de dilatation thermique proche de zéro pour l'ensemble de la structure. La stabilité géométrique de la structure aussi apportée par la raideur globale de la structure. L'utilisation des fibres de carbone à très haut module sur les composites permet de répondre à cette préoccupation. Le principal inconvénient des composites à matrices organiques pour les applications satellites est sans aucun doute la reprise d'humidité, pendant les opérations d'assemblage et pendant le stockage avant lancement.

### I.9. Les matériaux composites structuraux

La rigidité d'un composite est conditionnée par le nombre et l'empilement des couches, leur nature, leur orientation, leur séquence d'empilement, etc. Généralement les matériaux composites structuraux sont classés en trois catégories :

- Les monocouches ;
- Les stratifiés ;
- Les sandwiches.

#### 1.9.1. Les monocouches

Les monocouches 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, réparties aléatoirement), à fibres tissées ou à fibres courtes.

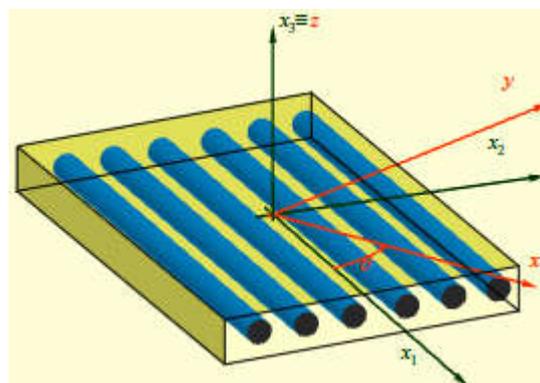


Figure I.7 : Matériau composite monocouche

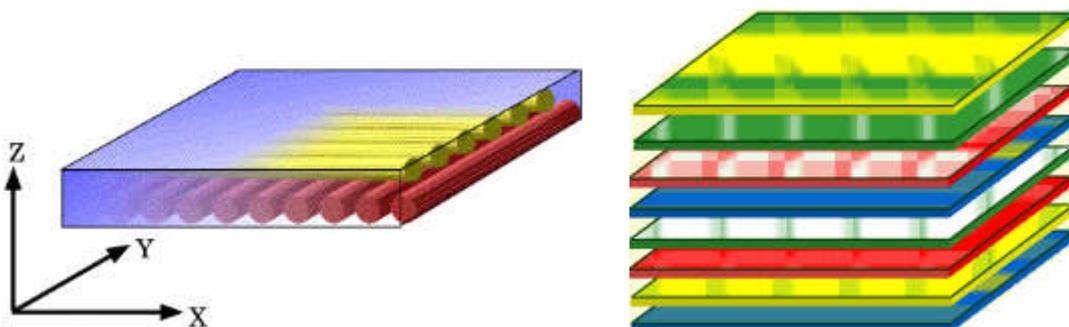
### 1.9.2. Les stratifiés

Un stratifié est constitué de l'empilement de deux ou plusieurs couches (appelées également plis) entreposées successivement et se comportant comme une seule entité structurale. Chaque couche est désignée par son orientation, qui est l'angle que fait la direction des fibres avec la direction de référence (qui est généralement la direction des fibres unidirectionnelles orientées à  $0^\circ$ ), (figure I.5).

La séquence d'empilement du stratifié, désigne le nombre et l'orientation des couches successives en parcourant le stratifié d'une face à l'autre. Ainsi, un stratifié est dit unidirectionnel si, l'angle entre deux couches consécutives est nul, c'est-à-dire, toutes les fibres sont alignées selon une seule direction. Par contre, un stratifié est multidirectionnel si les couches successives, sont orientées les unes par rapport aux autres à des angles autres que  $0^\circ$  tel, les multidirectionnels  $[0/+45/-45/90/90/+45/-45/0]$ .

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientées suivant la direction  $-\theta$ .
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$ .



**Figure I.8 :** Matériau composite stratifié.

### 1.9.3. Les Sandwichs

Les matériaux sandwichs résultent généralement de l'association de deux semelles ou peaux, de faible épaisseur, constituées de matériaux à relativement haute résistance et haut module et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité (figure I.6). Ces structures complexes offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des secteurs très divers. On peut songer d'abord à des applications structurales classiques pour lesquelles il faut allier légèreté et rigidité comme dans l'industrie aérospatiale, ou plus généralement les transports (TGV). L'usage des sandwichs se répand aussi dans l'industrie du bâtiment car, ils possèdent une excellente caractéristique d'isolation thermique.

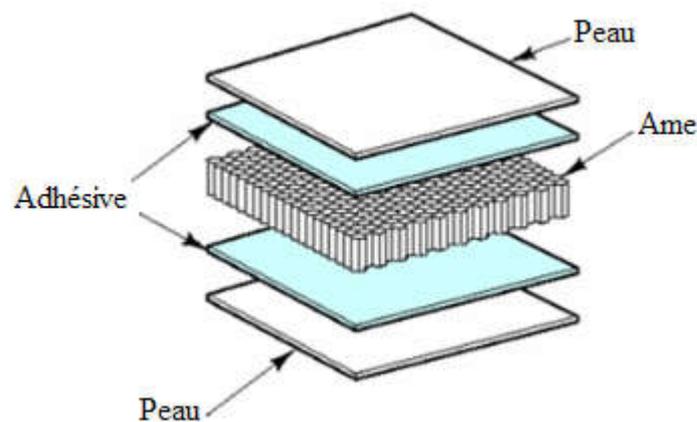


Figure I.9 : Structure composite sandwich.

### 1.9.4. Charges et additifs

Dans une formulation, une charge est une substance solide, non miscible et dispersée par un moyen mécanique dans une matrice. Elle est introduite dans un mélange pour en particulier diminuer le coût, améliorer certaines propriétés ou modifier la densité. On distingue une toute variété des charges (minérales ou cellulosiques) et additifs (colorants, pigments, plastifiants, protecteurs, agents anti-UV,...etc) des matières plastiques sont des éléments ajoutés aux matériaux composites au cours de leur élaboration ou de leur transformation et qui visent à leur conférer des caractéristiques particulières utiles lors de la

transformation ou des fonctionnalités pour leur usage final. La typologie proposée repose sur le type de fonction de l'additif.

Enfin les charges et additifs sont incorporés dans un matériau composite pour :

- Modifier la couleur ;
- Modifier sensiblement les propriétés mécanique, électrique ou thermique ;
- Réduire le coût ;
- Résister au feu ;
- Diminuer le retrait ;
- Faciliter le démoulage ;
- Améliorer la résistance au vieillissement ;
- Modifier la densité du matériau.

#### **I.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes catégories des matériaux composites. On s'est intéressé à ceux résultant de l'assemblage d'une matrice et d'un renfort se présentant sous forme de fibre.

Cette présentation montre les caractères avantageux de ces matériaux à savoir légèreté et une grande résistance à la traction.