

Composition des composites

1. Le renfort

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- sous forme linéique (fils, mèches, etc.),
- sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.),
- sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

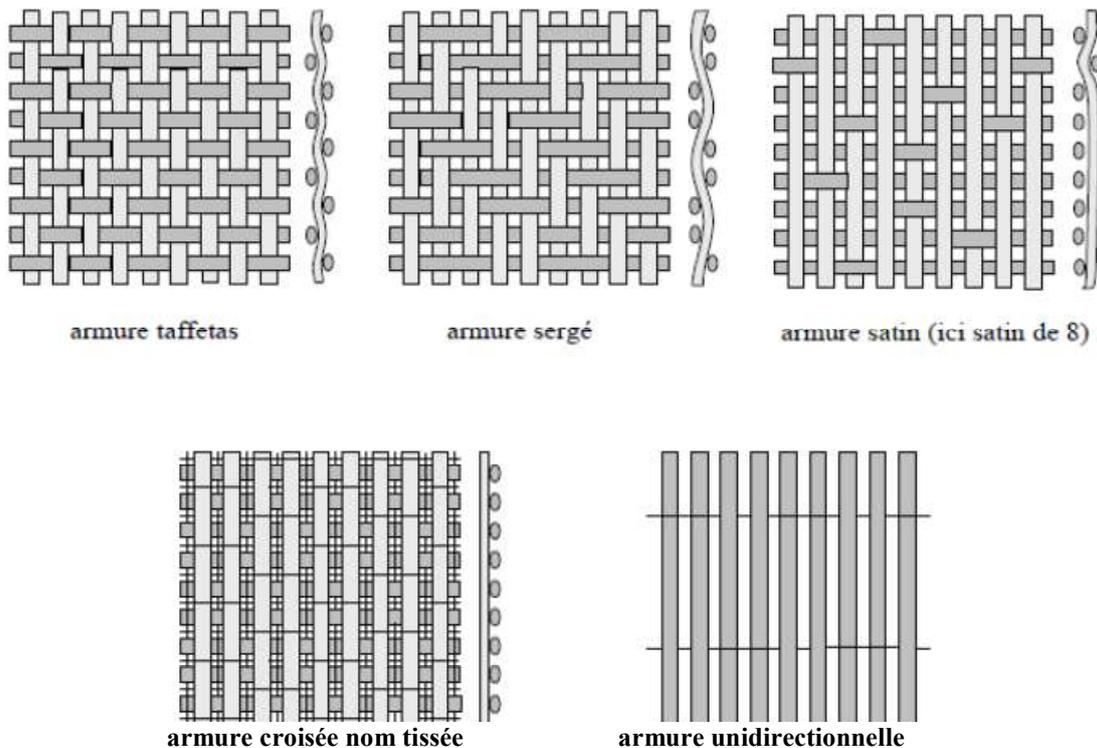


Fig.2.1 Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus

La figure 2.2 représente La classification des types de renforts couramment rencontrés

1.2 Fibre de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance–prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

Les fibres de verre de renforcement, appelées aussi fibres de verre textile, sont des filaments obtenus à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore, fluor, oxyde de sodium, oxyde de potassium, oxyde de zirconium, oxyde de fer, oxyde de titane)

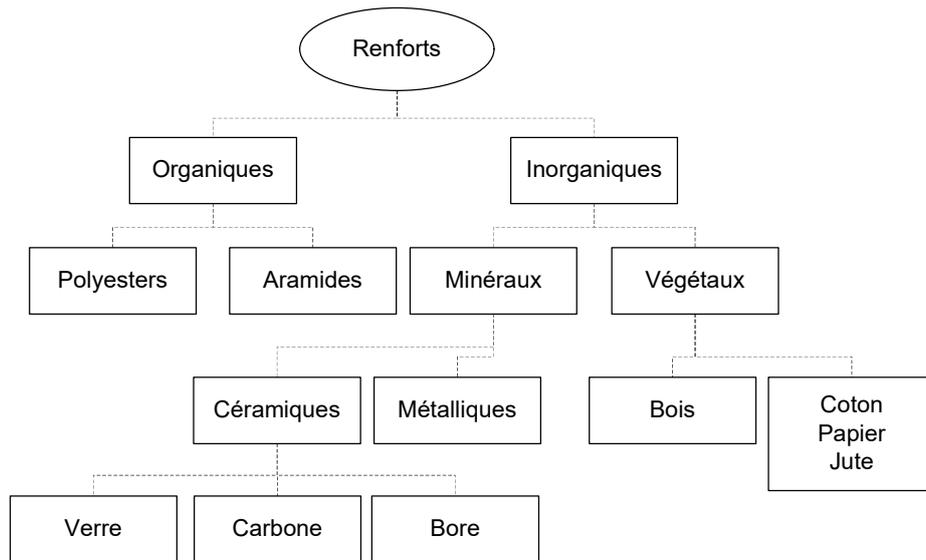


Fig 2.2 Types des renforts

1.1.2 Fabrication des fibres de verres

Le procédé de fabrication des fibres de verre se déroule en plusieurs étapes.

- le mélange de matières premières est chauffé jusqu'à environ 1500°C afin d'obtenir un mélange homogène.
- le verre en fusion est acheminé vers les filières dans des canaux thermo-régulés afin d'éliminer les bulles de gaz résiduelles.
- Au passage des filières, le verre est étiré à grande vitesse pour se transformer en filaments continus. Cette étape d'étirage est cruciale pour contrôler le diamètre des filaments (de 5 à 24 μm).
-

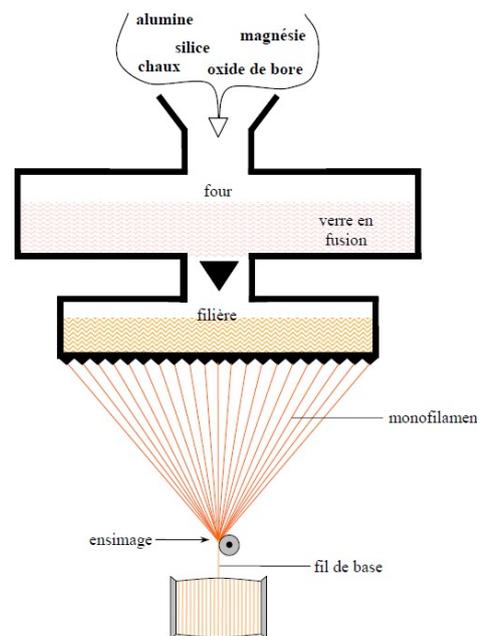


Fig 2.3 Fabrication des fibres de verre

Type des fibres de verres

-le verre D, à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications, en particulier les radomes;

- le verre C, résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique;

- les verres R et S, à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

Tableau 2.1 Types des verres

Type	Indications générales
E	Pour usage général ; bonnes propriétés électriques
D	Bonnes propriétés diélectriques
A	Teneur élevée en alcalis
C	Résistance chimique
S	Résistance mécanique élevée
R	Résistance mécanique élevée
AR	Résistant aux alcalis
E-CR	Pour environnements acides

(Source : ISO 2078)

Tableau 1 Composition des verres de type E, D, R

Constituants		Composition en masse (%)		
		Verre E	Verre D	Verre R
Silice	SiO ₂	53-54	73-74	60
Alumine	Al ₂ O ₃	14-15,5		25
Chaux	CaO	} 20 - 24	} 0,5 - 0,6	9
Magnésie	MgO			6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	6,5-9		
Fluor	F	0-0,7	22-23	
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	} < 1		
Oxyde de titane	TiO ₂		0,1-0,2	
Oxyde de sodium	Na ₂ O	} < 1		
Oxyde de potassium	K ₂ O		1,3	
			1,5	

1.2.3 Produits industriels en verre textile

A) Les fils de base

Nous avons vu que les fils de base étaient élaborés par assemblage parallèle sans torsion des monofilaments à la sortie de la filière, pour aboutir soit à des fils continus (fils silionne), soit à des fils discontinus (fils verranne). Ces fils ne sont qu'un intermédiaire dans l'élaboration des produits industriels en verre textile, et ne présentent pas un intérêt direct pour le fabricant de matériaux composites. Les fils de base sont caractérisés par :

- la désignation du verre utilisé (E, R, etc.),
- le type de fil : silionne (C : continu) ou verranne (D : discontinu),
- le diamètre nominal des filaments,
- la masse linéique du fil exprimée en tex.

B) Fibres broyées

Ces fibres sont obtenues par broyage des fils de base. Leur longueur est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre, avec un rapport longueur sur diamètre de 10 à 40 environ. Les fibres broyées sont utilisées pour le renforcement de certaines résines thermoplastiques, de résines de coulée, de mastics, etc.

C) Fils de base coupée

Les fils de base coupés sont obtenus par coupe des fils de base silionne. Les longueurs les plus courantes sont : 3, 4,5, 5, 13, 25 et 50 mm. Les fils de base coupés sont utilisés pour le renforcement de divers matériaux, en particulier les résines thermoplastiques.

D) Stratifil

Le stratifil (ou "roving" en anglais) est obtenu par assemblage sans torsion de fils de base silionne, et présenté en pelotes (sans tubes) ou en bobines (sur tubes)

La désignation du stratifil indique soit la masse linéique, soit le nombre de fils de base (norme ISO 2078). Par exemple, pour le stratifil EC 10 2400 (désignation globale), ou stratifil EC 10 40'60 (désignation complète), EC 10 40 désigne le fil de base, '60 désigne le nombre de fils de base assemblés sans torsion et 2400 indique la masse linéique globale en tex.

Les divers types de stratifils varient suivant :

- le nombre de fils de base : 2, 8, 15, 30, 60 par exemple ;
- la masse linéique globale : 600, 1 200, 2 400, 4 800, 9 600 tex.

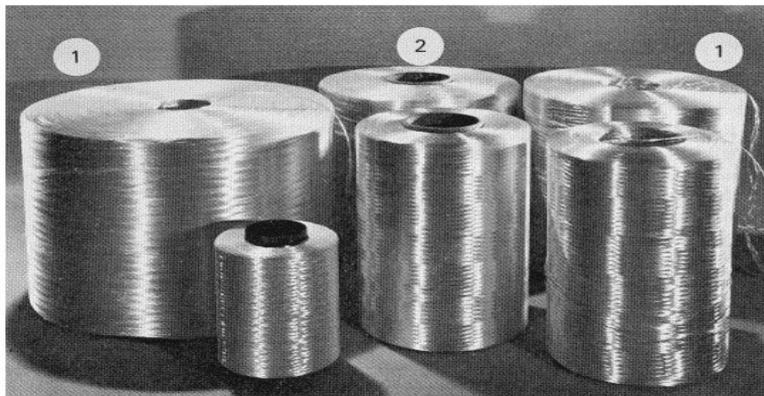


Fig2.4 Différentes présentations des stratifils: Pelotes- 1 Bobines (sur tube)

1.2.4 Utilisation des fibres de verre

Les fibres de verre permettent de réduire le poids des matériaux, tout en améliorant leurs performances. Elles sont notamment appréciées pour leurs propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation. Dans le domaine de la construction, ce procédé de renforcement permet un allègement des structures d'environ 30% par rapport à l'acier. La fibre de verre est utilisée pour le renforcement, l'isolation et l'optique. Le renforcement est de loin l'application la plus importante. Le verre sert à renforcer les bétons ou les polymères (matériaux plastiques thermodurcissables comme le polyester ou l'époxy) en vue de fabriquer des matériaux composites capables de se substituer à l'acier.

1.3 Le fibre de carbone

Les fibres de carbone présentent des propriétés mécaniques très élevées (haut module, haute résistance, faible dilatation thermique) et sont utilisées pour les applications industrielles de hautes performances. Leur coût de fabrication est élevé. Ce type de matériau est produit essentiellement aux Etats-Unis et au Japon. Le diamètre d'une fibre de carbone est de l'ordre de 5µm.

1.3.2 Fabrication des fibres de carbone

A) À partir des fibres acryliques

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur, se présentant lui-même sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement, les fibres utilisées sont les fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres acryliques sont connues sous divers noms commerciaux: crylor, courtelle, dralon, orlon, etc. La qualité des fibres de carbone finales dépend des qualités du précurseur.

1- La première étape consiste à obtenir des monofilaments par filage et étirage du polymère. Ces monofilaments sont ensuite assemblés en mèches contenant plusieurs milliers de fils. Cette étape permet déjà d'obtenir une orientation préférentielle des chaînes polymériques dans le sens du fil ;

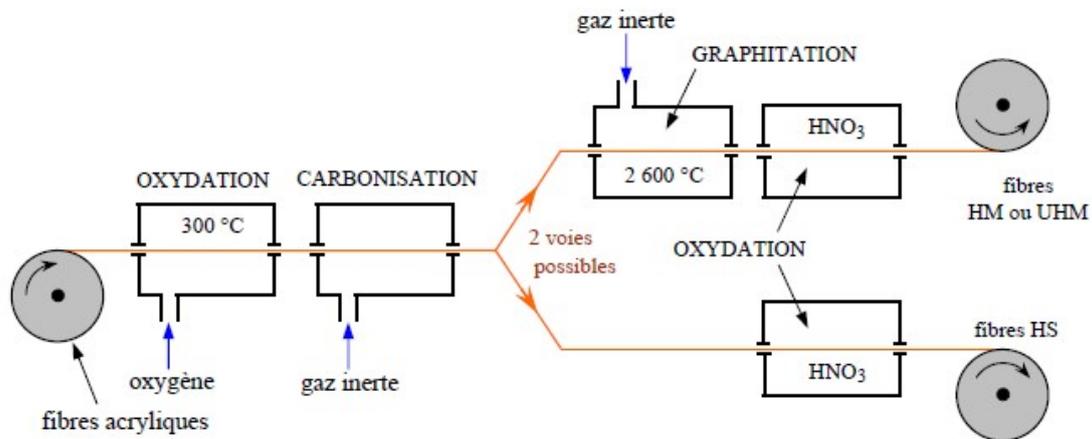


Fig.2.5 Procédés de fabrication des fibres de carbonnes

2- Les fibres acryliques étant fusibles, la phase d'oxydation a pour but de supprimer artificiellement le point de fusion. Cette opération est effectuée en chauffant les fibres à environ 300 °C en atmosphère d'oxygène. Il se produit alors une oxydation conduisant à une réticulation des chaînes moléculaires et à la création d'un réseau tridimensionnel :

Les fibres obtenues après cette phase ont de bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent être utilisées après traitement de surface. Les fibres sont alors dénommées fibres HR (haute résistance) ou fibres HT (haute ténacité).

3-La phase de graphitisation est utilisée lorsque l'on souhaite obtenir des fibres à module d'Young élevé. Cette phase consiste à effectuer à la suite de la carbonisation, une pyrolyse des

fibres, en atmosphère inerte, jusqu'à 2 600 °C ou à des températures supérieures. La graphitisation provoque une réorientation des réseaux hexagonaux de carbone suivant l'axe des fibres, ce qui aboutit à une augmentation du module d'Young. Toutefois, simultanément à cette réorientation, des défauts se créent dans la structure, entraînant une diminution de la contrainte à la rupture. Suivant le taux de graphitisation, on obtient des fibres HM (fibres à haut module) ou des fibres THM (à très haut module).

4- La dernière phase de l'élaboration consiste en un traitement de surface, par oxydation ménagée en milieu acide (nitrique ou sulfurique). Cette phase a pour objet d'accroître la rugosité des filaments ainsi que la nature des liaisons chimiques, afin d'améliorer la liaison fibre-résine.

B) À partir du précurseur brai

Depuis les années 1970, des procédés d'élaboration de fibres de carbone ont été développés à partir du brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille. Dans ce procédé, le brai est chauffé à 350 °C- 450 °C pour obtenir une mésophase (intermédiaire entre liquide et cristal), puis filé pour améliorer l'orientation. Comme dans le cas du procédé PAN, les filaments sont oxydés et arbonisés, et enfin pyrolysés à des températures supérieures à 2 000 °C pour obtenir des fibres haut module.

Les fibres de carbone produites par ce processus ont divers avantages:

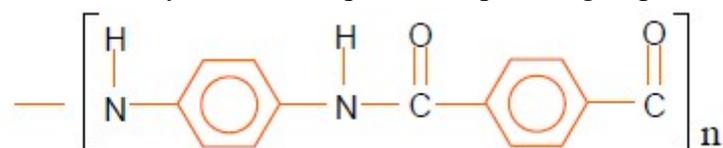
- un rendement massique filaments/précurseur élevé de l'ordre de 75 à 90 % (50 % for le procédé PAN),
- une vitesse de graphitisation plus élevée,
- une matière première bon marché.

Le développement de cette technique devrait permettre aux fibres de carbone d'atteindre les grands marchés industriels (type industrie automobile, etc.), par diminution notable du prix de revient, par rapport aux fibres obtenues à l'aide du précurseur PAN.

1.4 Les fibres aramides

Dont la plus connue est le kevlar, ont de bonnes propriétés en traction et une excellente ténacité d'où leur usage pour la fabrication de gilet pare-balles. Le diamètre d'une fibre d'aramide est du même ordre de grandeur que celui d'une fibre de verre.

Les fibres aramides sont des fibres polyaramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont la structure est constituée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN :

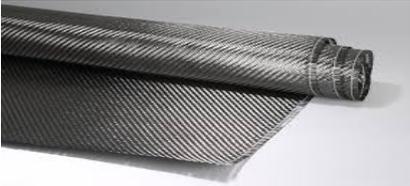


L'élaboration des fibres aramides est effectuée par synthèse à basse température (−10 °C), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité.

1.4.1 Caractéristiques des fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisé.

Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Fibres	Avantages	Limites d'utilisation
<p style="text-align: center;">Verre</p> 	<p>Bonne adhésion avec tous les types de résines. Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion 50% de sa résistance à 35° C Rapport performance/ prix Faible dilatation thermique</p>	<p>Densité de 2.2 à 2.5 Propriétés mécaniques de performance moyennes</p>
<p style="text-align: center;">Carbone</p> 	<p>Excellentes propriétés mécaniques Bonne tenue en températures en atmosphère inerte (sans oxygène) Dilatation thermique nulle Excellente résistance à l'humidité Densité faible: 1.8 à 2.2 Insensible aux rayures</p>	<p>Prix élevé Faible cassantes non imprégnées Tenue à l'abrasion limitée</p>
<p style="text-align: center;">Aramide</p> 	<p>Faible densité :1.45 Dilatation thermique nulle Très bonne résistance aux chocs et à la fatigue Résistance chimique moyenne</p>	<p>Faible résistance à la compression. Reprise d'humidité importante. Décomposition à 400°C Découpe difficile</p>

1.5 Les fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium (SiC),
- fibres de Bore (B)
- fibres de Bore carbure de silicium (BorSiC)

1.5. Les fibres synthétiques thermostables

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse, et qui conservent leurs caractéristiques mécaniques à températures élevées. Associées à des résines thermostables, elles permettent d'obtenir des matériaux dont les caractéristiques mécaniques en température sont conservées. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont toutefois nettement plus faibles que celles des fibres usuelles. Elles sont utilisées dans les isolants électriques et thermiques, les protections thermiques: boucliers de missiles, cônes de rentrée de véhicule spatial, etc.

Autres fibres

Les fibres d'origine végétale, telles que le bois utilisé sous forme de fibres

Orientées, le sisal, le jute, le lin, etc.

Les fibres synthétiques, telles les fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc.), les fibres polyamides, les fibres polyéthylène, les fibres polypropylène, etc.

Les fibres métalliques, comme les fibres d'acier, de cuivre, d'aluminium. Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques pour leurs bonnes conductibilités thermique et électrique et leurs caractéristiques thermomécaniques élevées.

2. Matrices (résines)

2.1 Matrices

Comme expliqué précédemment, la matrice est une phase continue permettant de former un monolithe englobant les renforts. Les matrices peuvent être soit organiques, soit minérales.

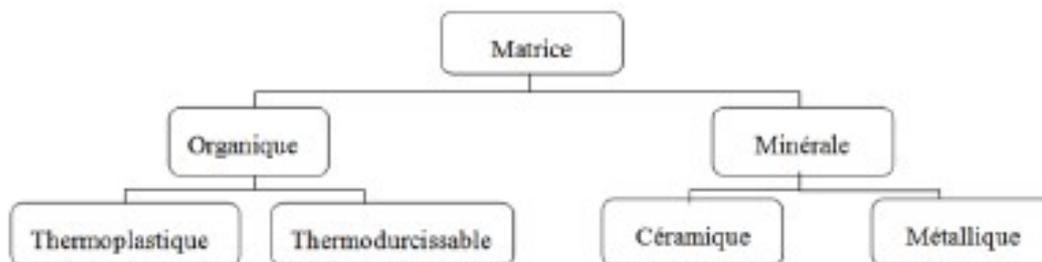


Fig. 2.6 Types des matrices

2.1.1 Rappel sur les polymères

Les polymères, sont des matériaux organiques composés de macromolécules (molécules géantes).

Ces macromolécules sont formées par exemple de la répétition d'un même motif ou unité monomère n fois tout au long de la molécule.

La polymérisation désigne une réaction chimique, fonction du temps et de la température, conduisant à la solidification de la résine de manière irréversible (valable uniquement pour les

thermodurcissables). La taille de la macromolécule d'un polymère est caractérisée soit par sa masse moléculaire, soit par son degré de polymérisation (nombre de molécules de monomère formant la macromolécule).

les polymères ne sont pas utilisables à l'état pur. Pour les rendre utilisables comme matériaux industriels, certains additifs sont rajoutés aux polymères et le semi-produit obtenu est appelé plastique.

2.2 Les divers types de résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

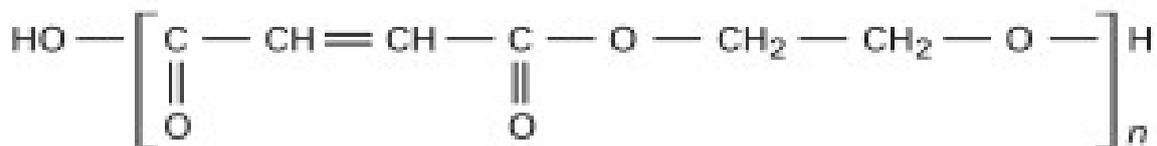
2.2.1 Les résines thermodurcissables

Les thermodurcissables présentent une structure tridimensionnelle. La polymérisation induit un pontage des macromolécules et cette structure se solidifie de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons chimiques fortes : cette transformation est irréversible.

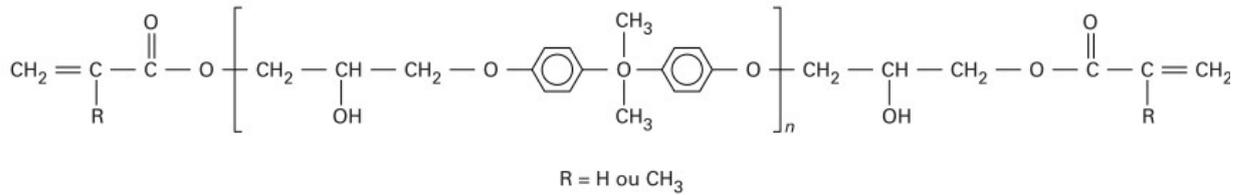
2.2.2 Les résines thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage :

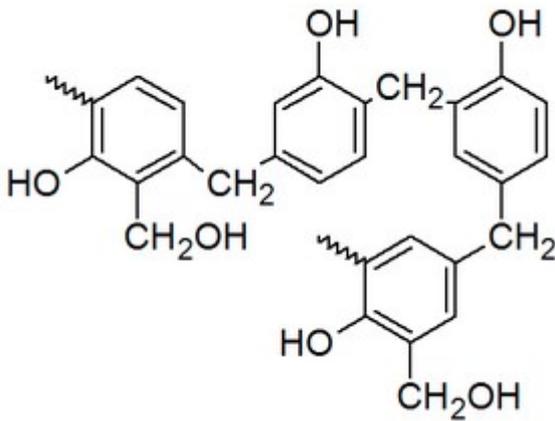
- les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques, etc.,
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques (peu utilisées en France), etc.,
- les résines époxydes.



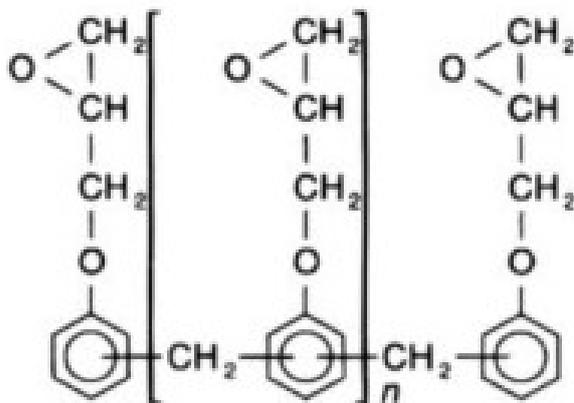
(a) Structure Polyesters insaturés [Jannel, 2004]



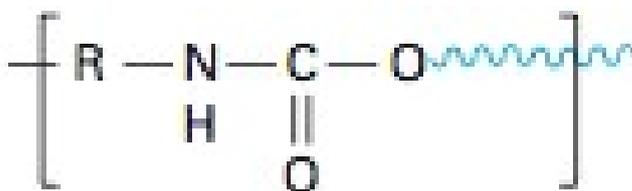
(b) Structure Vinylesters de type bisphénol A [Schneider, 2003]



(c) Structure Phénolique [Hirano and Masakatsu, 2013]



(d) Structure Époxyde phénol-novolac [Bardonnet, 1992]



(e) Structure Polyuréthane [Berthier, 2009]

2.2.2.1 Les résines polyesters

Les polyesters insaturés sont les résines les plus utilisées dans les composites de grande diffusion de par leur coût de production et leur bonne résistance mécanique. Cependant, les résines de polyesters insaturés sont majoritairement rencontrées dans la formulation de composites renforcés à fibres de verre.

2.2.2.1 Les résines de condensation

A- **Les résines phénoliques:** sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Masse volumique	1 200 kg/m ³
Module d'élasticité en flexion	3 GPa
Contrainte à la rupture en traction	40 MPa
Allongement à la rupture en traction	2,5 %
Contrainte à la rupture en flexion	90 MPa
Résistance à la compression	250 MPa
Température de fléchissement sous charge	120 °C

Les avantages et les inconvénients des résines phénoliques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> — une excellente stabilité dimensionnelle, — une bonne tenue à la chaleur et au fluage, — une bonne résistance aux agents chimiques, — un faible retrait, — de bonnes caractéristiques mécaniques, — un faible coût. 	<ul style="list-style-type: none"> — une mise en oeuvre sous pression, donc à faibles cadences, — les couleurs foncées des résines, — une non adaptation à des utilisations alimentaires. <p>-Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques.</p>

B- résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

- la possibilité d'utilisations alimentaires,
- la possibilité de colorer les résines.

C. Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters. Parmi leurs avantages :

- un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,
- une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

2.2.3 Les résines epoxydes

Le terme époxyde désigne une grande variété de prépolymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques qui, après polycondensation avec un durcisseur, conduisant à

des produits thermodurcis dont les principales applications concernent le collage et les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Masse volumique	1 100 à 1 500 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> — de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters, — une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu; — une excellente résistance chimique, — un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %), — une très bonne mouillabilité des renforts, — une excellente adhérence aux matériaux métalliques. 	<ul style="list-style-type: none"> — un temps de polymérisation long, — un coût élevé, — la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en oeuvre, — une sensibilité à la fissuration

2.2.2. Les résines thermoplastiques

La famille des résines thermoplastiques (on parle de "plastiques") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou technopolymères). Les plastiques de grande diffusion sont mis en oeuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection.

En ce qui concerne les résines thermoplastiques, les polymères susceptibles de servir de matrice à des fibres courtes sont : le polyéthersulphone (PES), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), les polyesters à base de polytéréphtalate de butylène (PBT) et de polytéréphtalate d'éthylène (PET), le polyphénylène sulfide (PPS), le polyéther imide (PEI), le polyétheréthercétone (PEEK) et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA). Comme principales matrices thermoplastiques à fibres longues, on peut citer du FIT (fibre imprégnée de thermoplastique) et de l'utilisation du polypropylène (PP) (ou PA, PET, PUR thermoplastique) dans la technique du TRE (thermoplastique renforcé estampé). Seules les

résines thermoplastiques de haute performance telle que le PEI et le PEEK sont en concurrence avec les résines thermodurcissables à base de polyesters insaturés et d'époxyde en termes de propriétés mécaniques.

2.2.3 Les résines thermostables

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et polyimides sont les plus utilisées.

Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.

Les résines polyimides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

2.3 Les charges et les additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de :

- quelques dizaines de % dans le cas de *charges*,
- à quelques % et moins dans le cas d'*additifs*.

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en oeuvre. Nous donnons dans ce paragraphe des exemples de charges et d'additifs.

2.3.1 Charges

a) Charges renforçantes

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

- charges sphériques et
- charges non sphériques.

b) Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

c) Charges de faible coût

Ces charges sont extraites de roches ou de minerais, d'où leur faible coût.

Généralement, l'incorporation de ces charges conduit à :

- une augmentation :
 - de la masse volumique de la matrice,
 - du module d'élasticité,
 - de la dureté,
 - de la viscosité,
 - de la stabilité dimensionnelle.
- une diminution :
 - du prix,
 - de la résistance à la traction et à la flexion.

d) Charges ignifugeantes

Ces charges ajoutées aux résines ont pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion. Parmi les charges solides utilisées dans les résines thermodurcissables, nous citons :

- l'hydrate d'alumine, produit le plus utilisé dans les résines thermodurcissables,
- l'oxyde d'antimoine.

e) Charges conductrices et antistatiques

Les résines organiques sont des isolants thermiques et électriques. Pour certaines applications, il est donc nécessaire d'ajouter un élément conducteur. Les principales charges utilisées sont :

- des poudres ou paillettes métalliques : cuivre, fer, aluminium, etc.,
- des microbilles de verre métallisées (cuivre, argent),
- des particules de carbone (noir de carbone),
- des filaments métalliques

2.3.2 Additifs

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.

-Lubrifiants et agents de démoulage

Ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules, aux mandrins, etc.

-Pigments et colorants

-Agents anti-retrait et agents de fluage

-Agents anti-ultraviolets

2.4 Stratifiés (multicouches)

La *stratification* est une autre structure couramment rencontrée dans les pièces composites. Dans un stratifié, les fibres sont agencées en couches fines (quelques dixièmes de millimètre) nommées *plis*, qui sont empilées les unes sur les autres ; après la mise en forme, ces couches seront liées entre elles par l'intermédiaire de la matrice.

2.4.1 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels

Ces stratifiés sont constitués de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

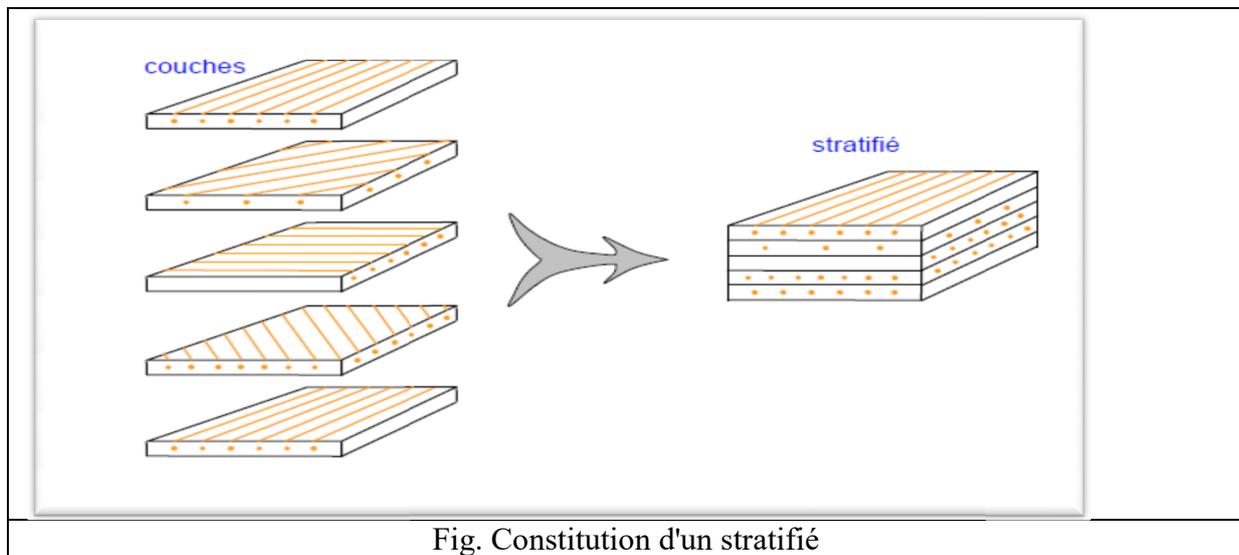


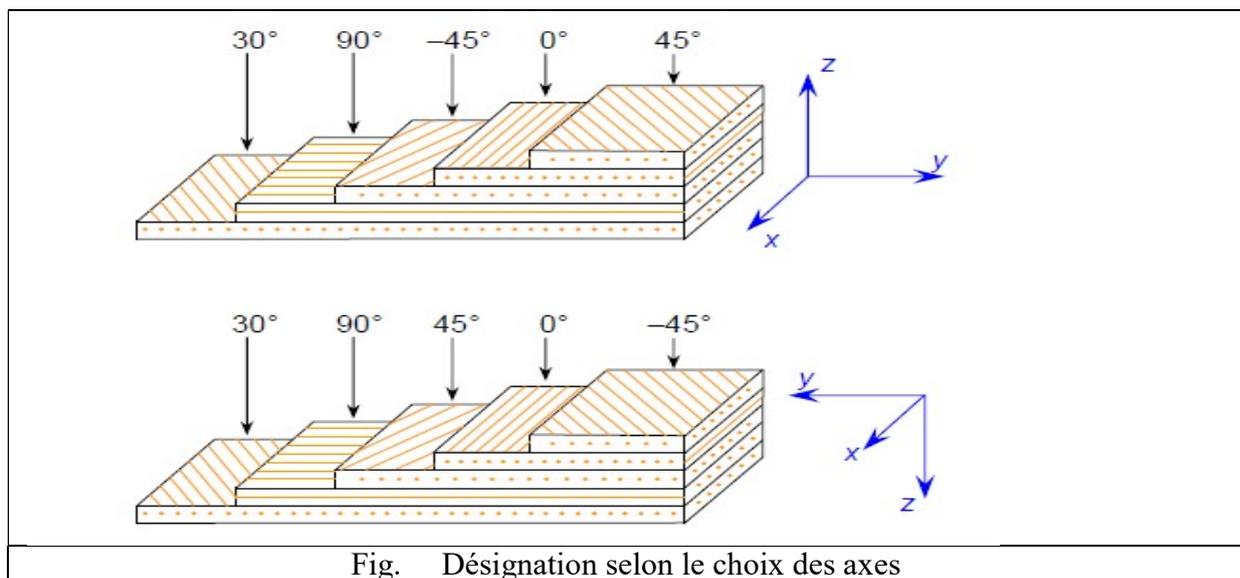
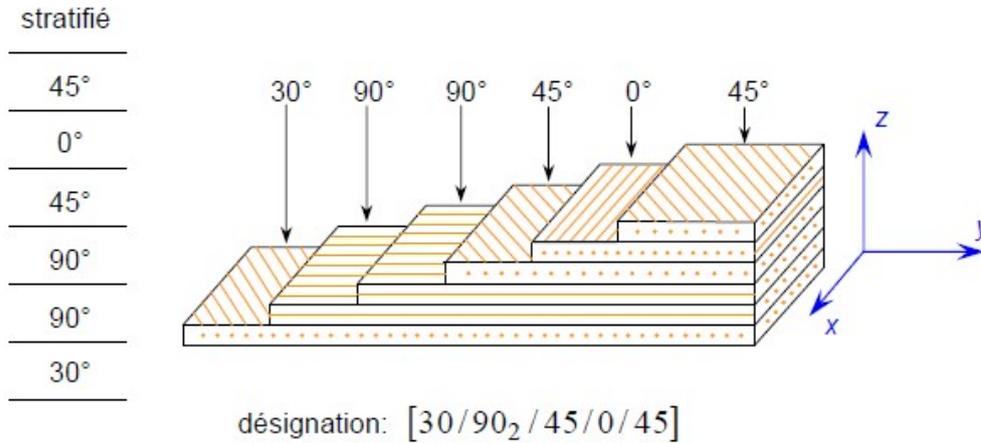
Fig. Constitution d'un stratifié

2.4.2 Orientation des stratifiés

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

1. Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.
2. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
3. Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
4. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre.

Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code. La désignation dépend du système d'axes choisi.



Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes + ou - sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué

Stratifié	Désignation
0°	
30°	
-30°	[±45 / ∓30 / 0]
-45°	
45°	
30°	
-60°	
-60°	[45 / 0 / -60 ₂ / 30]
0°	
45°	

0 °	
-45 °	
45 °	
45 °	
-45 °	
-45 °	
45 °	

$$[\pm \mp \pm 45 / 0]$$

ou $[45 / -45_2 / 45_2 / -45 / 0]$

Stratifiés symétriques

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives. Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique. Par exemple :

90 °	
45 °	
45 °	
0 °	
0 °	
45 °	
45 °	
90 °	

$$[90 / 45_2 / 0]_S$$

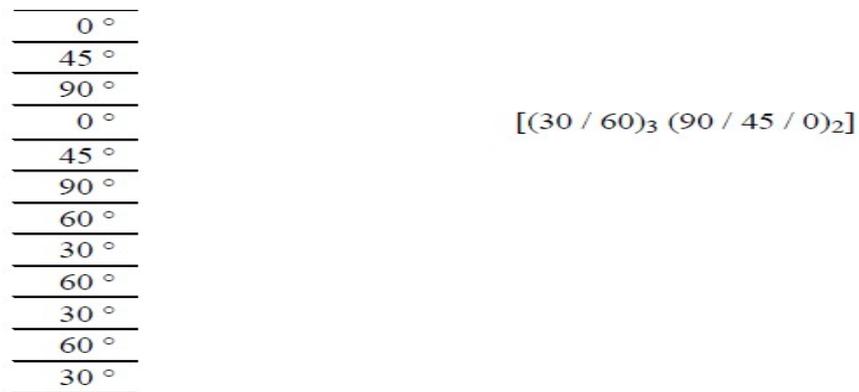
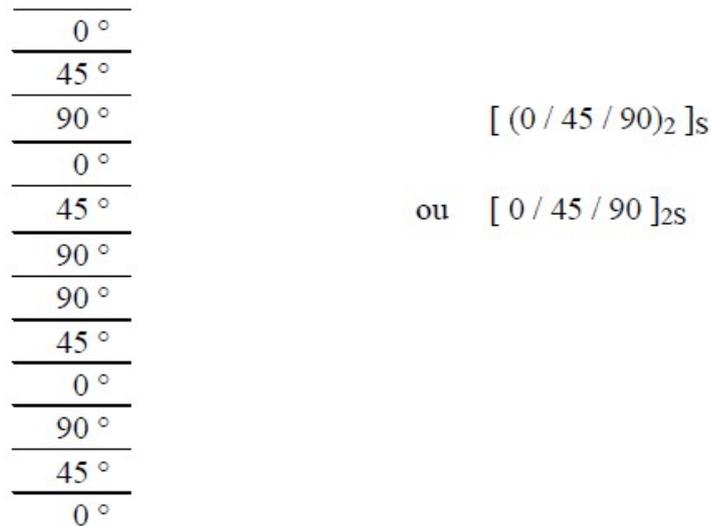
Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. Par exemple :

90 °	
45 °	
45 °	
0 °	
45 °	
45 °	
90 °	

$$[90 / 45_2 / \bar{0}]_S$$

Séquences

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée. Par exemple :



L'alternance [0 / 90]_n est souvent désignée par *stratifié croisé*.

Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :

0 ° K	$[0_{2C} / (45 / \overline{90})_{SV} / 0_{2K}]$
0 ° K	
45 ° V	
90 ° V	
45 ° V	
0 ° C	
0 ° C	

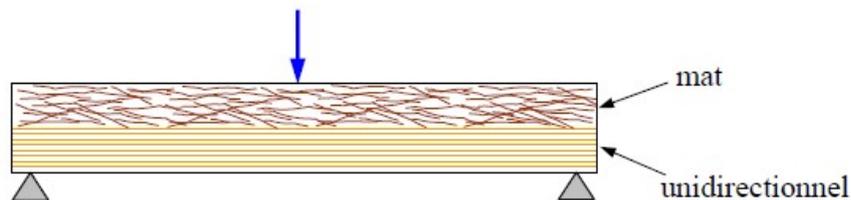
avec V : verre, C : carbone, K : Kevlar

0 ° V	$[0_V / \pm 45_C / 90_C]_s$
45 ° C	
-45 ° C	
90 ° C	
90 ° C	
-45 ° C	
45 ° C	
0 ° V	

2.4.3 Structure générale d'un stratifié

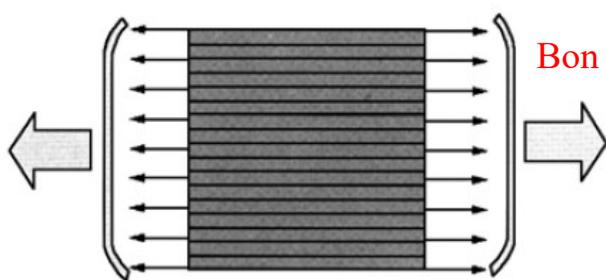
matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé :

- les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres;
- les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées : par exemple couches unidirectionnelles dans la zone de traction, mat dans la zone de compression d'une poutre sollicitée en flexion;



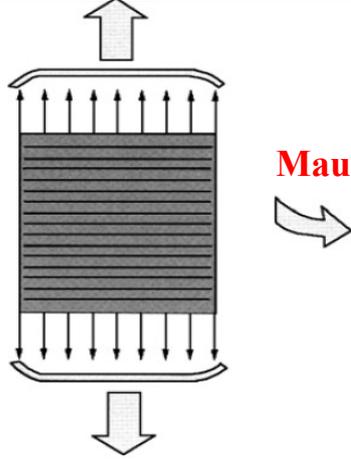
- une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire;
 - une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.
- Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

○ Tension -compression



Bon

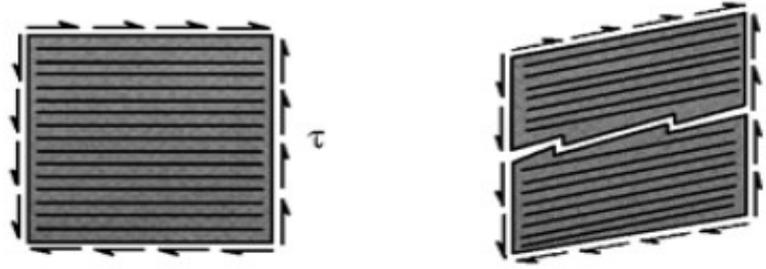
les fibres supportent la charge en traction, ce qui donne une résistance élevée à la traction



Mauvais

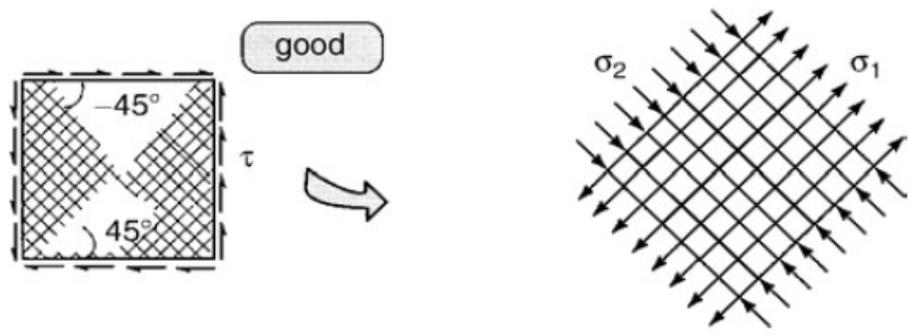
la résine supporte la charge, ce qui donne une faible résistance

○ Shear



la résine est cisillée et peu résistante

good



2.5 Composite sandwich

Constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux “feuilles”, appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

— pour les *âmes pleines*:

- le balsa ou bois cellulaire;
- diverses mousses cellulaires;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques ;
- etc.;

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

— pour les *âmes pleines*:

- le balsa ou bois cellulaire;
- diverses mousses cellulaires;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques ;
- etc.;

