

II. 1. INTRODUCTION

Un matériau composite (pris au sens de ce module) est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres.

La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

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

Le type d'association matrice-renfort dépend des contraintes imposées au concepteur : caractéristiques mécaniques élevées, tenue en température, coût, résistance à la corrosion, etc.

II. 2. LES RÉSINES

II. 2. 1. 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.

Compte tenu de ces contraintes, les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc. Les résines sont livrées en solution, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules prépolymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du prépolymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.

Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.

Les résines thermoplastiques, dont la fabrication atteint de loin le plus gros tonnage du fait d'un faible coût, possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

Par contre, les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique. Ainsi, les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites.

Cependant, l'amélioration des caractéristiques des résines thermoplastiques conduit à une utilisation qui ne cesse de croître.

Deux autres classes de résines à usages spécifiques sont également utilisées, ce sont :

- les résines thermoplastiques qui peuvent résister en service continu à des températures de l'ordre de 200 °C et plus,
- les élastomères dont le renforcement par différentes fibres conduit à diverses applications dans le domaine de l'automobile.

II. 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, etc.,
- les résines époxydes.

II. 2. 2. 1. Les résines polyesters

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat :

- d'un faible coût de production,
- de leur diversité offrant de multiples possibilités,
- d'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser.

D'où un développement industriel sans cesse croissant.

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes :

Masse volumique	1 200 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement à la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge (1,8 MPa)	60 à 100 °C

Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- une bonne stabilité dimensionnelle,
- une bonne mouillabilité des fibres et des tissus,
- la facilité de mise en œuvre,
- une bonne tenue chimique,
- un faible coût de production,
- une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %,
 - un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gel-coat" de manière à les rendre étanches,
- une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- une inflammabilité.

II. 2. 2. Les résines de condensation

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques.

1. 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	1200 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

Parmi les avantages, nous citerons :

- 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.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- les couleurs foncées des résines,
- une non adaptation à des utilisations alimentaires.

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques.

2. Les caractéristiques **des résines aminoplastes** sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

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

3. **Les résines furaniques** sont assez peu utilisées en France 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.

II. 2. 2. 3. Les résines époxydes

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

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

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- 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.

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- 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.

II. 2. 3. 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 œuvre 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.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication (injection, extrusion). Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide.

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m ³)	900	1140
Contrainte à la rupture (MPa)	20–35	60–85
Module d'élasticité (GPa)	1,1–1,4	1,2–2,5
Température de fléchissement sous charge (°C)	50–60	65–100

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides.

II. 2. 4. 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.

II. 3. LES CHARGES ET ADDITIFS

II. 3. 1. Introduction

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 œuvre. Nous donnons dans ce paragraphe des exemples de charges et d'additifs.

II. 3. 2. Les charges

II. 3. 2. 1. 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.

1. Charges sphériques

L'intérêt essentiel de ces charges réside dans leur 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. Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles ou microsphères. Ces sphères pleines ou creuses ont un diamètre généralement compris entre 10 et 150 µm. Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.). Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99 % des charges sphériques utilisées.

Les microbilles de verre creuses

Le principal avantage des microbilles de verre creuses réside dans une masse volumique faible (100 à 400 kg/m³), apportant une augmentation du module spécifique de la résine chargée et de sa tenue en compression.

La fabrication des microbilles de verre creuses se fait par passage dans une zone à haute température, de fines particules de verre contenant un gaz d'expansion (généralement un mélange d'azote et de gaz carbonique). Lors de l'élévation de température des particules, le gaz est expansé dans la particule de verre en fusion. Les particules sont ensuite refroidies rapidement, provoquant une solidification de la paroi des microbilles avant que la pression du gaz ne diminue.

Les microbilles ainsi obtenues ont un diamètre de l'ordre de 20 à 130 μm , avec une épaisseur de paroi de 0,5 à 2 μm . Les microbilles peuvent être ensuite sélectionnées en fonction de leurs dimensions. Les microbilles sont enfin soumises à des traitements de surface permettant d'améliorer la liaison des microbilles avec la résine.

Les microbilles de verre creuses sont le plus souvent incorporées à des résines époxydes ou polyesters. Leur usage est limité à des mises en œuvre à basse pression du fait de la faible résistance à l'écrasement des sphères creuses.

Les avantages essentiels de leur incorporation dans une résine sont :

- la diminution de la masse volumique,
- l'augmentation du module de la résine,
- l'amélioration de la tenue en compression.

Autres microbilles

Il existe d'autres microbilles creuses :

- Microbilles de carbone :
 - Masse volumique 120 kg/m^3
 - Diamètre 5 à 150 μm
- Microbilles organiques (époxyde, phénolique, etc.) :
 - Masse volumique 100 à 500 kg/m^3
 - Diamètre 10 à 800 μm

Ces microbilles sont généralement plus chères (jusqu'à 5 fois pour les microbilles de carbone) que les microbilles de verre.

Parmi les autres microbilles utilisées figurent les microbilles de verre pleines.

Par rapport aux microbilles de verre creuses, les caractéristiques des microbilles pleines sont :

- Masse volumique élevée : 2 500 kg/m^3 ,
- Prix plus faible,
- Possibilité de mise en œuvre avec les résines à des pressions élevées.

2. Charges non sphériques

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica est le matériau le plus utilisé. Il est alors incorporé sous forme d'écaillés de dimensions de 100 à 500 μm , et d'épaisseur de 1 à 20 μm . Le mica est ajouté à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables, pour des applications électriques ou électroniques.

II. 3. 2. 2. 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.

1. 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.

Les principales charges sont :

- les *carbonates* : craies ou calcites (CaCO_3). Ce sont les charges les plus utilisées,

- les *silicates* : talc, kaolin, feldspath, wollastonite,
- les *silices*, obtenues par broyage et tamisage de sable de quartz.

2. 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*.

3. 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.

II. 3. 3. Les 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.

II. 3. 3. 1. 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.

II. 3. 3. 2. Pigments et colorants

Les pigments sont des produits insolubles se présentant sous forme de poudres ou de paillettes. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. À partir de ces pigments, il est possible d'obtenir des pâtes colorantes constituées de dispersions de pigments dans une pâte (résine, plastifiant), pour une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté.

Leur emploi est limité, du fait d'une mauvaise tenue chimique et thermique.

II. 3. 3. 3. Agents anti-retrait et agents de fluage

La polymérisation des résines conduit à une diminution des distances interatomiques du monomère initial. Il s'ensuit un retrait de la résine polymérisée, qui peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. Bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait, il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques antiretrait (additifs dits "low profile" et "low shrink"), qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou en solution dans du styrène.

II. 3. 3. 4. Agents anti-ultraviolets

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines de l'action des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et d'éviter ainsi une détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation (phénomène de photo-oxydation).

II. 4. LES FIBRES ET TISSUS

II. 4. 1. Généralités

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 caractéristiques recherchées pour les renforts sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une bonne facilité de mise en œuvre, un faible coût, etc. En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. 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.).

II. 4. 2. Formes linéiques

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres (une dizaine), et ne peuvent par conséquent pas être utilisées sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes. La nomenclature générale des diverses formes linéiques est encore mal déterminée, et généralement dérivée de celle utilisée pour les fibres de verre.

La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou monofilament. Les monofilaments sont ensuite réunis en fils ou mèches. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique ou titre. Cette masse linéique est une mesure de la finesse des fils, et elle dépend du diamètre et du nombre de monofilaments. L'unité de masse linéique est le tex, masse d'un fil de longueur égale à 1 000 m. Soit :

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km.}$$

En fait, on devrait plutôt écrire :

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m.}$$

Conformément au système S.I. d'unités. La première définition est toutefois mieux adaptée à l'usage pratique.

II. 4. 3. Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

II. 4. 3. 1. Les mats

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. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

La différence entre les mats à fils coupés et les mats à fils continus se situe essentiellement au niveau de leur propriété de déformabilité. Les premiers sont peu déformables alors que les seconds permettent d'obtenir des "emboutis" profonds par un allongement régulier du mat dans toutes les directions. Une des principales applications des mats à fils continus est le moulage entre moule et contre-moule, de pièces pouvant avoir des formes complexes, par compression, injection ou moulage sous vide.

II. 4. 3. 2. Les tissus et rubans

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué (figure II.1) :

- d'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu,

- d'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

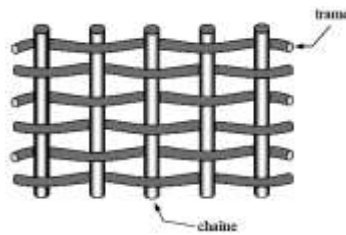


Fig. II. 1: Chaîne et trame d'un tissu.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et des fils de trame. La figure II.2 illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, sergé, satin, armure croisée, armure unidirectionnelle.

Taffetas

Dans l'armure taffetas (figure II.2), les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement, conduisant à un tissu très plat, stable, mais peu déformable. Cette armure confère au tissu des propriétés mécaniques sensiblement identiques dans les deux directions chaîne et trame (pour des fils de tissage identiques). Toutefois, l'armure taffetas conduit à un haut degré de courbure des fibres qui induit une diminution des performances mécaniques des composites.

Sergé

Pour l'armure sergé, le nombre de fils chaîne et de fils trame qui s'entrecroisent peut varier. Dans un sergé 2x1, les fils trame passent sur un fil chaîne et sous deux fils chaînes, et dans un sergé 2x2, les fils trame passent sur deux fils chaîne et sous deux fils chaîne. Ce type d'entrecroisement conduit à un motif répétitif du tissu (Figure II.16) sous forme de nervures diagonales. L'armure sergé offre l'avantage d'être à la fois souple et dense. Le tissu sergé permet ainsi un glissement entre les fils chaîne et trame et s'adapte bien à des moulages de formes complexes.

Satin

L'armure satin est assez semblable à celle du sergé, mais le nombre de fils chaîne et de fils trame qui passent les uns sur les autres avant de s'entrecroiser est plus élevé. Chaque tissu satin est caractérisé par un nombre, usuellement 4 ou 8, indiquant que les fils chaîne passent sur 4 ou 8 fils trame. Il en résulte un tissu avec une face qui contient plus de fils chaîne et une autre face plus de fils trame. L'armure satin est bien adaptée au moulage de formes complexes.

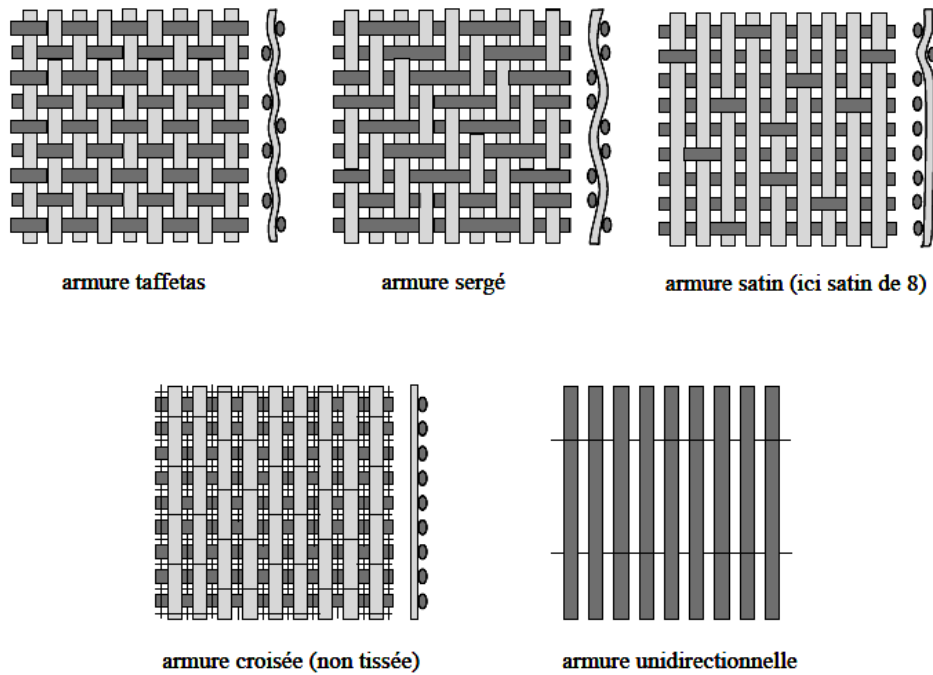


Fig. II. 2 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus.

Tissu croisé sans entrecroisement

Dans un tissu croisé, deux nappes de fils sont superposées sans entrecroisement des fils, et réunies par une chaîne et une trame de fils fins, n'intervenant pratiquement pas sur les performances mécaniques du tissu. L'absence d'entrecroisement supprime les effets de cisaillement et donne un tissu très performant mais coûteux.

Tissu à armure unidirectionnelle

Dans un tissu unidirectionnel, les fils sont alignés parallèlement à la direction chaîne, et ils sont réunis par un fil fin dans la direction trame. Ainsi, le tissu est unidirectionnel avec des performances élevées dans la direction chaîne.

Les performances mécaniques des divers tissus dépendent :

- du type de fils constituant le tissu : nature (verre, carbone, etc.), fils avec ou sans torsion, etc.
- de l'armure. Les armures unidirectionnelles et haut module donnent les meilleures performances. L'armure satin et, à un degré moindre, le sergé ont des performances supérieures à celles de l'armure toile.
- de la contexture, par le taux de renfort global et selon chacune des directions chaîne et trame du tissu.

II. 4. 4. Structures tissées multidirectionnelles

II. 4. 4. 1. Tresses et préformes

Il est possible de réaliser des tresses ou préformes par tissage cylindrique ou conique d'un tissu tubulaire. Les fils s'entrecroisent en hélice, dont la variation du pas (figure II.3) permet d'ajuster la tresse à la forme qu'elle doit recouvrir. Il est ainsi possible de réaliser une pièce de révolution ayant un diamètre variable le long de son arc. Par ce procédé, divers tissus peuvent être obtenus en forme de "chaussettes" coniques, ogivales ou hémisphériques, utilisées pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (cône de rentrée, tuyères, etc.).

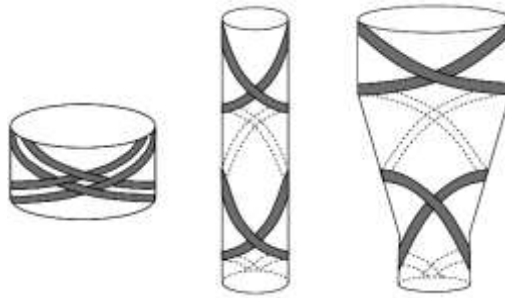


Fig. II. 3 : Tissages cylindrique et conique.

II. 4. 4. 2. Tissus multidirectionnels

Des tissages volumiques sont également utilisés, et caractérisés par le nombre de directions de tissage : 3D, 4D, etc. La structure la plus simple est celle du tissage 3D, où les fils sont disposés suivant 3 directions orthogonales (figure II.4). Dans un tissage 4D, les fils sont disposés suivant 4 directions (figure II.5). L'objectif est d'obtenir des matériaux composites isotropes.

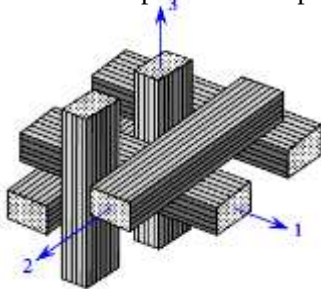


Fig. II. 4 : Tissage 3D orthogonal.

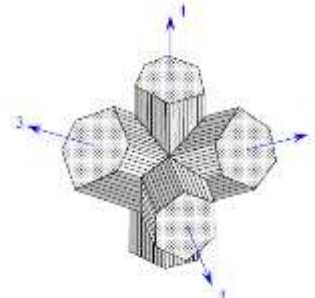


Fig. II. 5 : Tissage 4D.

II. 5. 2.5 LES PRINCIPALES FIBRES

II. 5. 1. Les fibres de verre

II. 5. 1. 1. Généralités

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. Suivant leurs compositions, différents types de verres filables peuvent être obtenus (tableau II.1). Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentant globalement une faible quantité (environ 1 %), sont réservés à des applications spécifiques :

- 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.

Type	Caractéristiques générales
E	à usage général; bonnes propriétés électriques
D	hautes propriétés diélectriques
A	haute teneur en alcali
C	bonne résistance chimique
R, S	haute résistance mécanique

Tableau. II. 1: Différents types de verres filables.

Nous ne considérerons par la suite que les fibres de verre de type E et de type R, dont les compositions sont reportées au tableau II. 2. Il est à noter la très faible proportion ou l'absence d'oxydes alcalins à la différence des verres d'usage courant. Ce fait conduit à des températures de transformation élevées, avec des conséquences techniques et économiques.

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	22-23	
Fluor	F	0-0,7		
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	} < 1	0,1-0,2	
Oxyde de titane	TiO ₂			
Oxyde de sodium	Na ₂ O	} < 1	1,3	
Oxyde de potassium	K ₂ O		1,5	

Tableau. II. 2 : Compositions des verres de type E, D et R.

II. 5. 1. 2. Élaboration des fibres de verre

Les fibres de verre sont élaborées par filage du verre fondu (figure II. 6) à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2 mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées par effet Joule, aux environs de 1250 °C. À cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. À la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir des fibres discontinues de diamètres différents (généralement de 5 à 15 µm).

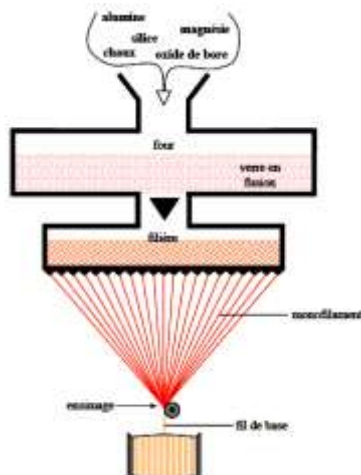


Fig. II. 6 : Schéma de principe du procédé d'étirage mécanique ou silionne.

Les monofilaments sont ensuite rassemblés sans torsion pour constituer un fil de base (appelé fil sillionné), qui est enroulé sur une bobine ou sous forme de pelote. Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts verre dans les matériaux composites.

Des fibres de verre discontinues peuvent également être élaborées et assemblées suivant un assemblage appelé verranne. Les fils verranne se distinguent des fils continus par un aspect pelucheux.

II. 5. 1. 3. Ensimage des fibres de verre

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons :

- l'absence de cohésion entre les filaments, qui s'oppose à la constitution de fils;
- la sensibilité du verre à l'abrasion, conduisant à une détérioration lors des manipulations postérieures au fibrage;
- la sensibilité à l'attaque de l'eau;
- la création de charges électrostatiques consécutive aux divers frottements.

Pour pallier ces défauts, on réalise à la sortie de la filière une opération dite d'ensimage, qui consiste à déposer à la surface des filaments de verre un produit d'ensimage de composition complexe. A la lumière des défauts évoqués ci-avant, les diverses fonctions de l'ensimage sont :

- établir une certaine cohésion entre les filaments;
- donner une plus ou moins grande raideur aux fils (un fil destiné à être coupé doit être raide, un fil destiné au moulage ou au tissage doit être souple);
- protéger les filaments contre l'abrasion;
- éviter l'apparition de charges électrostatiques;
- faciliter l'imprégnation des filaments par la résine (mouillage superficiel et pénétration au cœur des filaments);
- favoriser la liaison verre-résine dont dépendent les performances mécaniques du composite, mais également le comportement du matériau au vieillissement, la sensibilité à l'humidité, à la corrosion, etc.

2. 5. 1. 4 Propriétés mécaniques des fibres de verre

Il est de coutume de donner comme caractéristiques mécaniques de référence les caractéristiques mesurées sur monofilaments prélevés à la sortie de la filière. Le tableau II. 3 donne les valeurs usuelles de ces grandeurs.

Caractéristiques			Verre E	Verre R
Masse volumique	ρ	kg/m ³	2 600	2 550
Module d'Young	E_f	GPa	73	86
Contrainte à la rupture	σ_m	MPa	3 400	4 400
Allongement à la rupture	ε_m	%	4,4	5,2
Coefficient de Poisson	ν_f		0,22	—

Tableau II. 3. Caractéristiques mécaniques des verres types E et R, mesurées sur filaments à la sortie de la filière.

À la suite du fibrage, les filaments de verre sont soumis à diverses sollicitations mécaniques (abrasion, etc.), chimiques (humidité, etc.) qui réduisent leurs caractéristiques mécaniques initiales. Le tableau II.4 donne les valeurs de la contrainte à la rupture, mesurée sur monofilaments et fils de base ayant subi un ensimage. Les valeurs obtenues semblent indiquer une chute des caractéristiques lorsque le nombre de filaments augmente. En fait, les valeurs mesurées sur les fils ne sont pas réellement significatives en raison des difficultés à charger simultanément et uniformément tous les filaments constituant le fil. Dans les matériaux composites, la liaison verre-résine par l'intermédiaire de l'ensimage assure une répartition assez homogène de la charge. Les mesures, déduites de la rupture de matériaux composites unidirectionnels, conduisent aux valeurs des contraintes et allongement à la rupture des fibres reportées au tableau II. 5.

Ces valeurs, voisines de celles mesurées sur monofilament prélevé sur fil industriel (tableau II.4), doivent être considérées comme étant représentatives des caractéristiques à la rupture des fibres de verre.

Enfin, il est intéressant de noter que les fibres de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, de l'ordre de 200 °C pour le verre E et de 250 °C pour le verre R. Ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des résines à tenue thermique élevée.

	Verre E	Verre R
Monofilament prélevé à la sortie de la filière	3 400	4 400
Monofilament prélevé sur fil sillionne industriel	2 000–2 400	3 600
Fil sillionne industriel comportant un grand nombre de filaments	1 200–1 550	1 700–2 000

Tableau II. 4. Contraintes à la rupture mesurées sur monofilaments et fils de base (en MPa).

	Verre E	Verre R
Contrainte à la rupture (MPa)	2 400–2 600	3 000–3 600
Allongement à la rupture (%)	3,4	4

Tableau II. 5. Caractéristiques à la rupture d'un fil sillionne industriel, déduites des caractéristiques mesurées sur un composite unidirectionnel résine époxyde/fil de verre.

II. 5. 1. 5. Produits industriels en verre textile

1. 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 sillionne), 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 : sillionne (C : continu) ou verranne (D : discontinu),
- le diamètre nominal des filaments,
- la masse linéique du fil exprimée en tex.

Nous aurons par exemple, le fil de base EC 9 34 : fil sillionne de verre E, diamètre des filaments : 9 µm, masse linéique du fil : 34 tex. Cette désignation est conforme à la norme ISO 2078.

2. 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.

3. Fils de base coupés

Les fils de base coupés sont obtenus par coupe des fils de base sillionne. 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.

4. Stratifil

Le stratifil (ou "roving" en anglais) est obtenu par assemblage sans torsion de fils de base sillionne, et présenté en pelotes (sans tubes) ou en bobines (sur tubes) (figure II.7).

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.

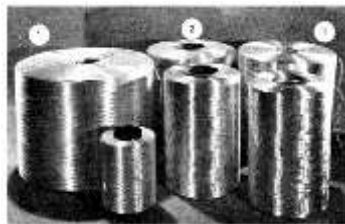


Fig. II. 7: Différentes présentations des stratifils : 1. Pelotes – 2. Bobines (sur tubes)

Les utilisations du stratifil sont nombreuses :

- coupe pour la fabrication de mats, pour le moulage par projection;
- tissage pour la fabrication de tissus ;
- imprégnation en continu : enroulement filamentaire, pultrusion.

Chez le fournisseur de verre textile, le stratifil constitue une étape dans la fabrication des tissus stratifils et mats à fils coupés. En excluant cette part, le reste du marché stratifil (moulage, imprégnation, etc.) représente plus de 40 % de l'ensemble du marché du verre textile, tous produits confondus.

5. Stratifil bouclé

Le stratifil bouclé (figures II.8 et II.9) est constitué par assemblage de fils silionne “bouclés”. Du fait de sa structure, le stratifil bouclé donne des possibilités de renforcement dans la direction transverse (ou voisine) de l'axe des fils. Le stratifil bouclé est essentiellement utilisé dans le tissage des tissus lourds.

Ce tissu permet une amélioration de la tenue des stratifiés, en cisaillement interlaminaire entre couches de tissus.

6. Mats à fils coupés

Les mats à fils coupés (figures II.10 et II.11) se différencient les uns des autres par :

- les caractéristiques du fil de base: type de verre, diamètre nominal, masse linéique, ensimage ;
- les caractéristiques du liage, quelquefois mécanique (aiguilletage), mais généralement chimique. Le taux de liant varie alors d'environ 3 à 15 %, et confère au mat une plus ou moins grande souplesse.

La longueur de coupe du fil de base est généralement de 50 mm. La masse surfacique est couramment de 300, 450 et 600 g/m². Pour des besoins spécifiques, il est possible d'obtenir des produits de masses surfaciques inférieures à 300 g/m², ou supérieures à 600 g/m², par exemple 900, 1 200 g/m².

7. Mats à fils continus

Les mats à fils continus (figures II.12 et II.13) sont caractérisés (paragraphe II.4.3) par une meilleure déformabilité que les mats à fils coupés. Généralement, les mats à fils continus sont élaborés à partir de fils de base ayant une masse linéique faible, de l'ordre de 25 tex, et un diamètre nominal supérieur à celui des fils utilisés pour les mats à fils coupés.

8. Tissus (figures II.14 à II.18)

Nous avons présenté (paragraphe II.4.3) les divers types de tissus dans le cas général. Les tissus de verre textile sont présentés en rouleaux :

- soit de grande largeur (figures II.14 à II.16), voisine du mètre pour les tissus "silionne" ou "verranne" ou jusqu'à environ 3 m dans le cas des tissus stratifils ;
- soit de largeur réduite sous forme de rubans (figure II.17).

Les masses surfaciques sont fonction de la référence du fil et des paramètres de tissage. Elles s'échelonnent couramment:

- de 50 à 500 g/m² pour les tissus silloné ou verranne,
- de 150 à 1 000 g/m² pour les tissus stratifils.

Il existe également des complexes mats-tissus (figure II.18) mis au point pour répondre à des exigences particulières. Leur principale application est le renforcement de pièces de formes planes ou à grands rayons de courbure, et plus particulièrement de grandes dimensions. Dans de telles pièces sollicitées en flexion, le tissu est disposé dans la zone sollicitée en traction, et le mat dans la zone sollicitée en compression, compte tenu de leurs bonnes adéquations respectives à ces deux types de sollicitations.



Fig. II. 8: Stratifil bouclé : présentation commerciale



Fig. II. 9: Stratifil bouclé : vue de détail

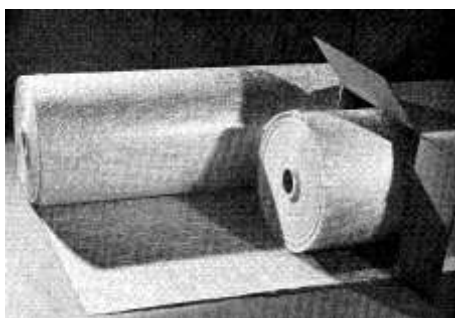


Fig. II. 10 : Présentation commerciale d'un mat à fils coupés



Fig. II. 11 : Vue de détail d'un mat à fils coupés

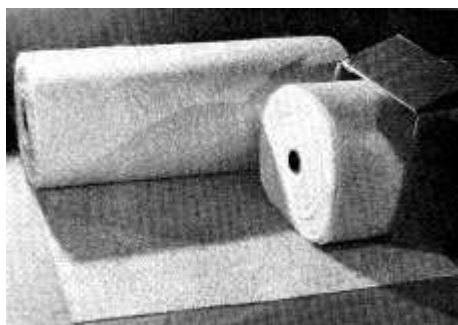


Fig. II. 12 : Présentation commerciale d'un mat à fils continus



Fig. II. 13 : Vue de détail d'un mat à fils continus



Fig. II. 14 : Exemples de trois tissus, armure toile, réalisés à partir de stratifils de masses linéiques



Fig. II. 15 : Tissu verranne, armure toile

différente : 2 400, 1 200 et 320 tex

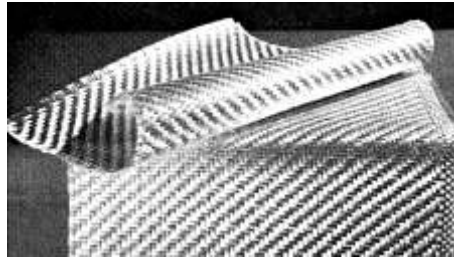


Fig. II. 16 : Tissu stratifié, armure sergé

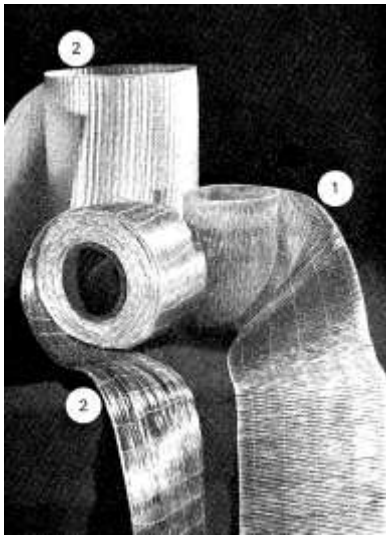


Fig. II. 17 : Tissus stratifiés, armures unidirectionnelles:

1. Tissu unidirectionnel, sens trame,
2. Tissu unidirectionnel, sens chaîne

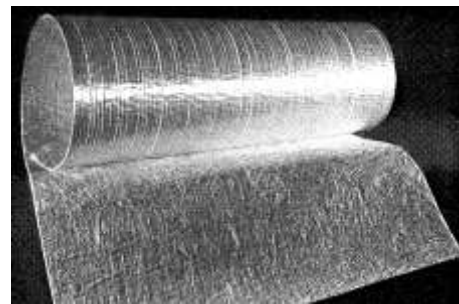


Fig. II. 18 : Complexe mat-tissu stratifié unidirectionnel, avec liage chimique

II. 5. 2. Les fibres de carbone

II. 5. 2. 1. Généralités

Le graphite a une structure hexagonale d'atomes de carbone, disposés en plans cristallographiques parallèles (figure II.19). Ces plans sont décalés de telle sorte qu'un atome de carbone se projette au milieu d'un hexagone des plans voisins. Les liaisons entre atomes de carbone de plans voisins sont faibles, et confèrent au graphite de bonnes propriétés de conduction thermique et électrique. Par contre, les liaisons entre atomes voisins d'un même plan sont fortes, et donnent au graphite des propriétés mécaniques élevées dans la direction parallèle aux plans cristallographiques. L'étude théorique des liaisons prévoit dans cette direction un module d'Young de 1200 GPa et une résistance à la rupture de 20000 MPa.

D'autre part, la masse volumique faible (inférieure à 2000 kg/m³) conduit à des propriétés mécaniques spécifiques théoriques remarquablement élevées. Ces faits expliquent les nombreux développements de différents procédés d'élaboration, permettant d'obtenir des fibres de carbone les plus parfaites possibles, et dont la direction des plans cristallographiques soit le plus parallèle possible à l'axe des fibres. Les fibres industrielles n'atteignent toutefois pas les valeurs mécaniques théoriques, du fait des imperfections des structures cristallines obtenues. Les caractéristiques des fibres élaborées restent cependant élevées et peuvent atteindre aujourd'hui pour les fibres les plus performantes de l'ordre de 650 GPa pour le module d'Young et de 4000 MPa pour la contrainte à la rupture.

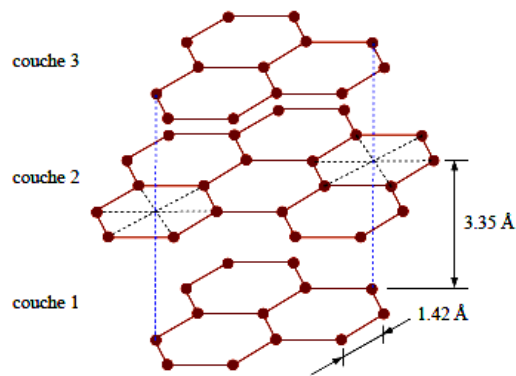


Fig. II. 17 : Structure cristalline du graphite.

II. 5. 2. 2. Élaboration des fibres de carbone

1. 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.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation dans laquelle on retrouve la structure initiale des fibres. Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion (généralement 500, 1000, 6000, 10000, etc. filaments), et leur font subir quatre traitements successifs: une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface (figure II. 20).

L'oxydation. 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 :

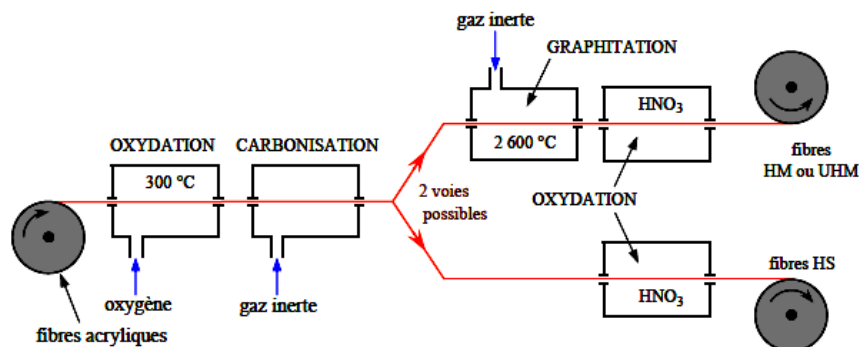
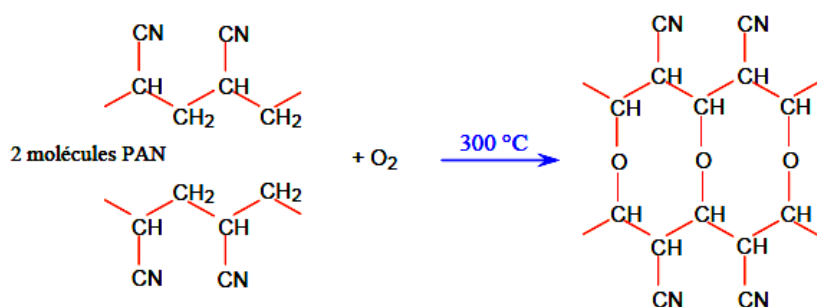
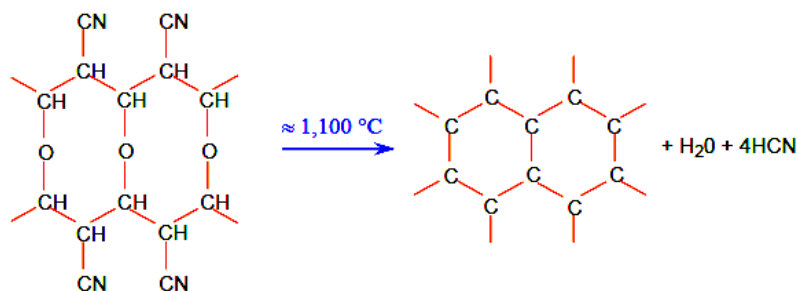


Fig. II. 20 : Élaboration des fibres de carbone.



La carbonisation. La deuxième phase consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées de 300 °C à 1100 °C environ, en atmosphère inerte. Il y a alors élimination de l'eau et de l'acide cyanhydrique, seuls les carbones étant conservés dans la chaîne :



Les fibres obtenues après cette phase ont de bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent être utilisées après traitement de surface (figure 2.20). Les fibres sont alors dénommées fibres HR (haute résistance) ou fibres HT (haute ténacité).

La graphitisation. 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 2600 °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).

Le traitement de surface. – 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.

2. 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 carbonisés, 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.

II. 5. 2. 3. Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000 kg/m³). Le tableau II. 6 compare les caractéristiques des fibres de carbone à celles des fibres de verre E. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température, en atmosphère non oxydante. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusée, les plaquettes de freins (camions, formule 1, avions), les éléments de fours, etc. Ces matériaux, revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial : bords d'attaque, tuiles, etc.

II. 5. 2. 4. Produits industriels

Le produit de base est le fil continu ou stratifil carbone, constitué de monofilaments de carbone (par exemple: 500, 1 000, 3 000, 6 000, 10 000, etc. filaments) assemblés sans torsion. Ces stratifils peuvent être utilisés directement pour les procédés de fabrication de composites par pultrusion ou par enroulement filamentaire. Les stratifils peuvent être également tissés pour obtenir des rubans, des tresses, des tissus unidirectionnels ou multidirectionnels, des tissus hybrides (verre-carbone, Kevlar-carbone).etc.

Ces diverses formes peuvent éventuellement être préimprégnées. Les stratifils peuvent également être coupés à des longueurs de quelques millimètres et utilisés pour l'élaboration de résines chargées.

Caractéristiques	Verre E	Carbone HR	Carbone HM	Carbone THM	Carbone HM (base)
Masse volumique ρ (kg/m ³)	2 600	1 750	1 810	1 950	2 000
Diamètre (μ m)	10 à 20	5 à 7	5 à 7	5 à 7	12
Module d'Young E_f (GPa)	73	230	400	600	280
Module spécifique E_f/ρ (MNm/kg)	28	130	210	310	140
Contrainte à la rupture σ_{fu} (MPa)	3 400	3 000–4 000	2 800	2 000	2 000–2 400
Contrainte spécifique σ_{fu}/ρ (kNm/kg)	1 300	1 710–2 290	1 550	1 030	1 000–1 200
Prix de revient rapporté aux fibres de verre E	1*	10–15	30–50	200–400	50–100

Tableau II. 6 : Caractéristiques des fibres de carbone, comparées à celles des fibres de

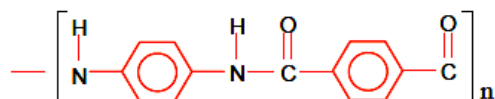
II. 5. 3. Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées

II. 5. 3. 1. Généralités

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de “Kevlar”, nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours (USA), et commercialisée en 1972.

D'autres groupes élaborent également des fibres aramides, en particulier le groupe AKZO (Allemagne-Hollande) qui produit des fibres aramides sous la désignation de fibres “Twaron”, et le groupe japonais Teijin Ltd les fibres “Technora”.

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 ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité.

II. 5. 3. 2. Caractéristiques

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau 2.7 pour des monofilaments. Sur fils multifilaments, les caractéristiques sont généralement plus faibles. Le tableau montre une contrainte spécifique à la rupture élevée, du même ordre de grandeur que les fibres de carbone haute résistance HR (tableau 2.6), toutefois avec un prix de revient 4 à 6 fois moindre. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides :

- résistances faibles à la compression, à la flexion, au flambement;
- sensibilité au cisaillement interlaminaire.

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibrematrice. Pour y remédier, des ensimages adaptés sont développés. Des composites hybrides (verre-Kevlar, carbone-Kevlar) sont également utilisés.

II. 5. 3. 3. Utilisations industrielles

Les fibres aramides sont disponibles sous forme de stratifils, de tissus, de tresses et de rubans. L'une de leurs premières utilisations grand public a été de remplacer les armatures d'acier dans les pneumatiques, les courroies et les tuyaux.

Compte tenu de leur légèreté et de leur bonne résistance au choc, à l'impact et à l'abrasion, les fibres aramides sont utilisées pour la fabrication de certains articles de sports (skis, raquettes de tennis, etc.) et pour la fabrication de protections contre les projectiles (blindages, gilets pare-balles, casques, gants, etc.), de produits de friction et de joints, de renforcement de câbles, etc.

Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron	Technora
Masse volumique ρ (kg/m^3)	1 440	1 450	1 470	1 440	1 390
Diamètre (μm)	12	12	12	12	12
Module d'Young E_f (GPa)	60	120	160	60	90
Module spécifique E_f/ρ (MNm/kg)	42	83	110	42	65
Contrainte à la rupture σ_{fu} (MPa)	3 000	3 000	2 400	2 600	2 800
Contrainte spécifique σ_{fu}/ρ (kNm/kg)	2 080	2 070	1 630	1 800	2 010
Allongement à la rupture (%)	3,6	1,9	1,5	3	4

Tableau II. 7: Caractéristiques mécaniques de monofilaments aramides.

II. 5. 4. Les fibres céramiques

II. 5. 4. 1. Généralités

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Actuellement, les fibres obtenues par ce procédé, et faisant l'objet d'une production, sont :

- les fibres de bore (B),
- les fibres de bore (B)-carbure de bore (B_4C),
- les fibres de carbure de silicium (SiC),
- les fibres de bore-carbure de silicium, appelées BorSiC.

Les fibres sont en réalité de gros filaments (diamètre de l'ordre de 100 μm), formés d'une âme (le fil support) en tungstène ou en carbone d'un diamètre d'environ 10 μm , recouverts :

- d'une couche de bore d'épaisseur environ 40 μm (fibres de bore),
- d'une couche de bore d'épaisseur 40 μm et d'une couche de carbure de bore de 4 μm d'épaisseur (fibres B- B_4C),
- d'une couche de carbure de silicium (fibres SiC),
- d'une couche de bore et d'une couche de carbure de silicium (fibres BorSiC).

II. 5. 4. 2. Caractéristiques mécaniques et utilisation

Les caractéristiques mécaniques des diverses fibres sont assez voisines (par exemple, tableau 2.8). Ces caractéristiques sont maintenues jusqu'à des températures pouvant aller de 500 à 1000 °C.

Du fait d'un prix de revient élevé, l'utilisation de ces fibres est limitée. Actuellement, les fibres SiC et BorSiC sont essentiellement utilisées avec des matrices métalliques (aluminium, par exemple) ou des matrices céramiques, conduisant à des matériaux composites de coûts très élevés, utilisés pour les aubes de compresseur, les turbines, etc.

Les fibres de bore et les fibres bore-carbure de silicium sont disponibles sous forme :

- de fils continus constitués de monofilaments parallèles,
- de rubans préimprégnés pour enroulement filamentaire,
- de tissus unidirectionnels.

Ces fibres associées avec des résines époxydes, avec lesquelles l'adhérence est très bonne, ou avec d'autres résines thermoplastiques ou thermodurcissables, sont utilisées dans les domaines des sports et des loisirs.

Caractéristiques		Bore	Bore + B_4C	SiC
Masse volumique	ρ (kg/m ³)	2 600	2 600	3 000
Diamètre	(μm)	100–150	100–150	100–150
Module d'Young	E_f (GPa)	430	430	410
Module spécifique	E_f/ρ (MNm/kg)	165	165	140
Contrainte à la rupture	σ_{fb} (MPa)	3 800	4 000	3 900
Contrainte spécifique	σ_{fb}/ρ (kNm/kg)	1 460	1 540	1 300

Tableau II. 8 : Caractéristiques mécaniques des fibres de bore, bore-carbure de bore et carbure de silicium.

II. 5. 4. 3. Autres générations de fibres céramiques

D'autres générations de fibres céramiques en carbure de silicium (SiC) ou carbotitanate de silicium (SiCTi) sont obtenues par la voie précurseur, suivant un procédé comparable à celui de l'élaboration des fibres de carbone via le polyacrylonitrile.

Cette voie précurseur conduit, contrairement au procédé précédent, à des fibres céramiques de faibles diamètres. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont reportées dans le tableau II. 9. Ces fibres présentent une bonne stabilité de leurs propriétés jusqu'à des températures de 1200 °C à 1600 °C.

Des fibres céramiques à base d'alumine sont également développées, telles des fibres d'alumine (Al_2O_3), des fibres d'aluminosilicate (Al_2O_3 , SiO_2), des fibres de boro-alumino-silicate (Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3). Les caractéristiques mécaniques de ces fibres, obtenues par voie sol-gel, sont reportées dans le tableau II. 10.

Caractéristiques			SiC Nicalon	SiNC HPZ	SiCTi Tyranno
Masse volumique	ρ	(kg/m ³)	2 550	2 350	2 400
Module d'Young	E_f	(GPa)	180–200	170	200
Module spécifique	E_f/ρ	(MNm/kg)	70–80	70	85
Contrainte à la rupture	σ_{fu}	(MPa)	3 000	2 400	3 000
Contrainte spécifique	σ_{fu}/ρ	(kNm/kg)	1 200	1 000	1 250

Tableau II. 9. Caractéristiques mécaniques des fibres SiC, SiNC et SiCTi.

Caractéristiques			Alumine Al ₂ O ₃	Alumino- silicate Al ₂ O ₃ ,SiO ₂	Borosilico- aluminate Al ₂ O ₃ ,SiO ₂ , B ₂ O ₃
Masse volumique	ρ	(kg/m ³)	3 400– 3 950	3 100– 3 200	2 700– 3 100
Module d'Young	E_f	(GPa)	300–390	190–250	150–200
Module spécifique	E_f/ρ	(MNm/kg)	90–100	60–80	55–65
Contrainte à la rupture	σ_{fu}	(MPa)	1 500– 2 000	2 100– 2 200	1 700– 1 800
Contrainte spécifique	σ_{fu}/ρ	(kNm/kg)	440–500	685	580–630

Tableau II. 10. Caractéristiques mécaniques des fibres céramiques à base d'alumine.

II. 5. 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.

II. 5. 6. Autres fibres

Il existe diverses autres fibres utilisées pour des applications particulières. Ces fibres sont généralement à faibles module et contrainte à la rupture, excepté les fibres métalliques. Généralement, leur utilisation est réservée à une recherche de :

- produits à bas prix de revient,
- produits à haute isolation thermique,
- produits à bonne conductibilité thermique ou électrique,
- produits à haute absorption acoustique,
- etc.

Parmi ces fibres nous avons:

1. Les fibres d'origine végétale, telles que le bois utilisé sous forme de fibres orientées, le sisal, le jute, le lin, etc.

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

3. 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.