

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun- Tiaret
Faculté des Sciences de la Matière



Polycopie de Cours

Les composites

Filière : Chimie

Spécialité: **Master I Chimie des Matériaux**

Par

Dr. Taqiyeddine MOUMENE

Ce cours est destiné aux étudiants de filière chimie spécialité chimie des matériaux. Ce document a été préparé selon le canevas de formation de Master Chimie, spécialité : Chimie des Matériaux. Il présente des généralités sur les matériaux composites.

Contenu du module :

- 1- Généralités sur les matériaux composites**
- 2- Éléments constitutants des matériaux composites (les résines, les charges et additifs, les fibres)**
- 3- Additifs**
- 4- Charges et renfort**

1. Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisés, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de **nouveaux matériaux**. En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre module.

2. Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaires et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phase discontinues réparties dans une phase continue.

La phase discontinue, appelée **renfort** ou **matériau renforçant**, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée **matrice**

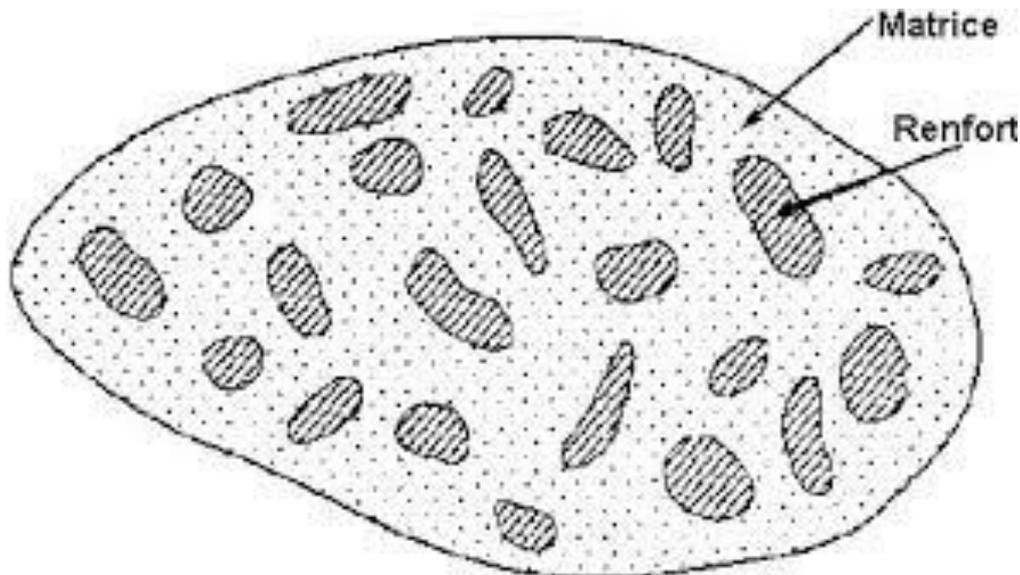


Fig.1. Schéma illustratif d'un matériau composite

Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple le Béton, le contreplaqué.....), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la figure suivante:

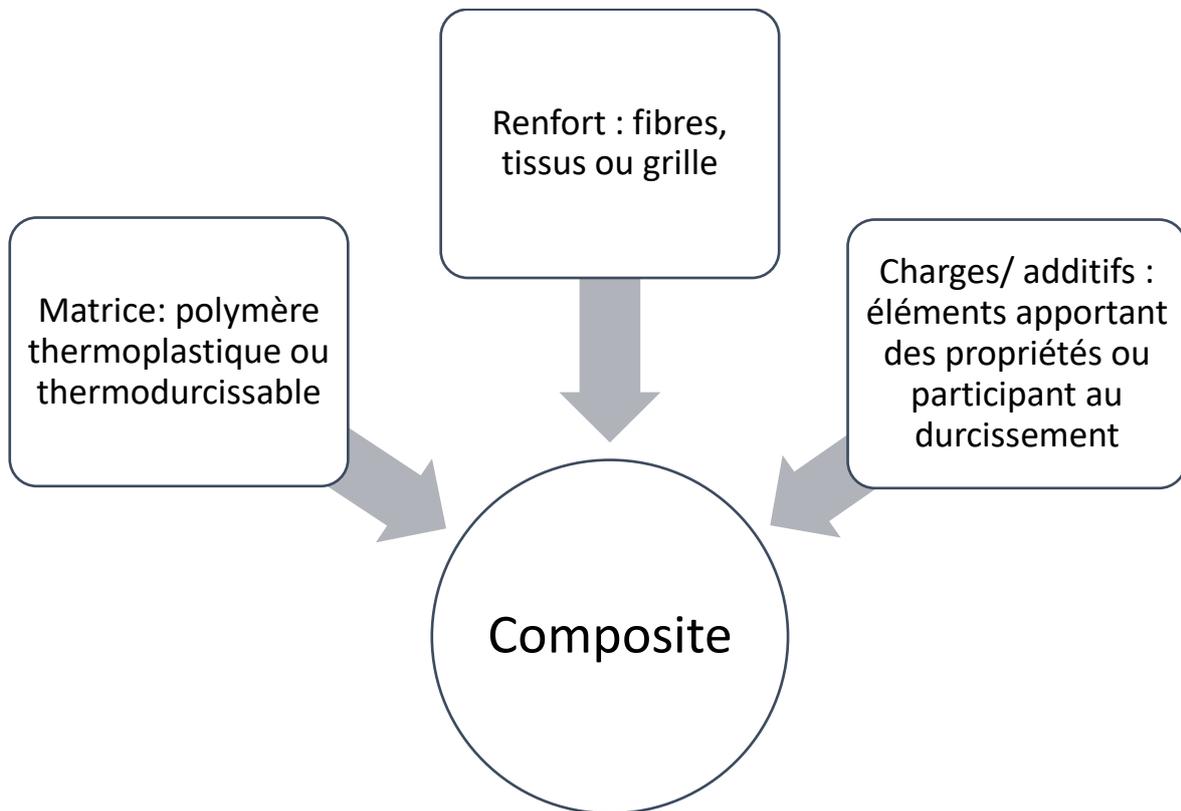


Fig.2. Composition d'un matériau composite

2.1. La matrice

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transition des efforts mécaniques vers les renforts.

La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue : les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques.

2.2. Le renfort

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine, son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres :

- Fibres longues unidirectionnelles.
- Fibres longues tissées.
- Fibres courtes réparties aléatoirement sans directions privilégiées.

En fonction de la forme des renforts, on distingue deux types de composites :

- **Les composites à fibres** : constitués de fibres continues ou discontinues (fibre coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes.

- **Les composites à particules** : les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux tels que : la dureté, la conductivité électrique.....etc.

Remarque :

- Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface.
- Des additifs, en particulier des produits chimiques, rentrent dans la composition du composite pour former des interphases...etc. Cependant ils n'interviennent pratiquement jamais, dans le calcul de structure composite.
- Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope.

3. Les Types de matériaux composites :

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances :

3.1. Les composites à grande diffusion

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30 %. Dans 90 % des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes.

Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Dans ce cas le renfort et la matrice sont à des couts voisins.

3.2. Les composites hautes performances

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un cout élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50 %, et ce sont les renforts qui influent sur le cout. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celle des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion.

4. Caractéristiques des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort.
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

* Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Le gain de masse (légèreté).
- Grande résistance à la fatigue.
- Liberté de forme.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur et de la corrosion.
- Insensible aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique.
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne.
- Très forte anisotropie.

5. Les constituants des matériaux composites

5.1. Les Matrices

Les matrices jouent un rôle important dans la structure des pièces composites :

- Elles maintiennent la dispersion géométrique des fibres.
- Elles apportent au composites ses caractéristiques chimiques et thermiques.

- Elles transfèrent les sollicitations mécaniques.

* Il existe différentes sortes de matrice que nous pouvons classer dans les catégories suivantes :

- Les matrices thermodurcissables.
- Les matrices thermoplastiques.
- Les matrices métalliques.
- Les matrices biodégradables.

5.1.1. Les matrices thermodurcissables

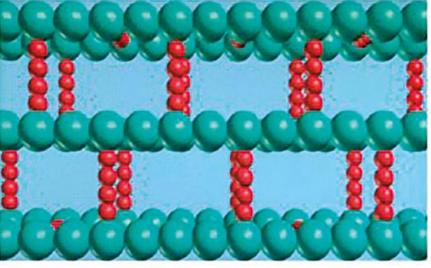
Les matrices thermodurcissables sont les plus couramment utilisées pour la fabrication de pièces en matériaux composites.

LES THERMODURCISSABLES



Liquide visqueux
Poudre

Durcissent par apport de chaleur et ne ramollissent jamais.
La transformation est exothermique et irréversible



Structure moléculaire tridimensionnelle

Elles se répartissent en différentes familles dont chacune possède une composition chimique particulière.

Parmi ces matrices, on distingue principalement :

- ✓ Les matrices polyesters (usage courant),
- ✓ Les matrices époxydes (tenue mécanique et chimique),
- ✓ Les matrices vinylesters (tenue chimique),
- ✓ Les matrices phénoliques (résistance au feu),
- ✓ Les matrices polyuréthanes (densité et dureté variables),
- ✓ Les matrices polyimides (tenue température $> 260^{\circ}\text{C}$),
- ✓ Les matrices silicones.

5.1.2. Les matrices thermoplastiques

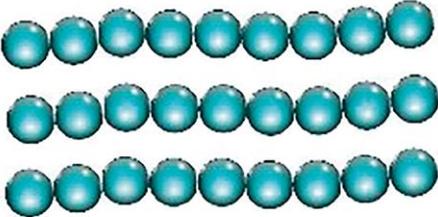
Les matrices thermoplastiques occupent une place de plus en plus importante dans la fabrication des matériaux composites.

LES THERMOPLASTIQUES



Granulés
Poudre
Plaque

**Se ramollissent sous l'effet de la chaleur
et deviennent malléables.**
Se figent après refroidissement
La transformation est réversible



Structure moléculaire linéaire

Elles sont :

Économiques et moins polluantes lors de leur transformation, elles offrent une bonne résistance à l'impact et permettent des cadences de production élevées grâce à des cycles relativement courts.

Plus facilement recyclables que les matrices thermodurcissables, leurs propriétés restent généralement plus faibles, exceptées pour quelques polymères très techniques et forcément plus onéreux (Le polyoxyméthylène (POM), Les polyaryléthercétones (PEAK).

Les principales matrices utilisées pour la fabrication de pièces en composites thermoplastiques :

- ✓ Les polyamides (bonnes propriétés mécaniques en général),
- ✓ Les polyesters saturés (rigidité élevée, bonnes propriétés diélectriques, dureté élevée),
- ✓ Les polyoléfines (excellente tenue aux solvants, excellente résistance mécanique),
- ✓ Les polycarbonates (bonne transparence, bonne résistance aux chocs),
- ✓ Les polyacétals (bonne dureté, bonnes propriétés électriques).

5.1.3. Les matrices métalliques

Les composites à matrice métallique ont été développés pour améliorer certaines caractéristiques des métaux ainsi que pour pallier certains inconvénients des composites à matrice organique (température d'utilisation limitée, vieillissement). Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet une amélioration de la rigidité, de la résistance mécanique et de la tenue à la fatigue à température ambiante (pour les métaux mous comme le plomb) mais également à température élevée (aluminium, titane). Les composites à matrice métallique actuellement étudiés ou utilisés en très faible quantité sont ceux à base d'aluminium, de magnésium ou de titane, renforcés par des fibres longues de carbone, de carbure de silicium, d'alumine ou de bore, par des fibres coupées ou des whiskers de carbure de silicium. Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques élevées et les conservent jusqu'à des températures importantes (400 °C pour l'aluminium). Ils ont une excellente tenue à l'environnement, sont insensibles aux rayons ultraviolets, présentent une bonne stabilité dimensionnelle, une bonne conductivité électrique et thermique.

5.2. Les charges et additifs

Les charges et additifs sont des matières d'origine minérale, végétale, synthétique ou organique se présentant sous forme pulvérulente ou fibreuse chimiquement pures et inertes vis-à-vis des résines. Mélangées à une résine, elles apportent de nouvelles propriétés et modifient les caractéristiques du produit fini.

	influencent	améliorent
Les charges	<ul style="list-style-type: none"> - l'aspect du produit - la viscosité - la densité - l'opacité - le temps de gel - le prix de revient 	<ul style="list-style-type: none"> - la résistance à l'humidité - la résistance aux agents chimiques - la résistance au feu - la résistance à la chaleur - la résistance aux chocs

Exemple :

- Carbonate de calcium : augmente la viscosité, réduit le cout.
- Hydrate d'alumine : augmente la tenue au feu.
- Oxyde de titane : coloration ultra-blanche.
- Poudre de Quartz : Augmente la dureté, augmente la résistance à l'abrasion, augmente la résistance à la rayure, confère des propriétés diélectriques.

5.3. Les Gelcoats

Un gelcoat est une couche de surface à base de résine spécialement étudiée pour assurer certaines fonctions telles que :

- ❖ Aspect de surface.
- ❖ Brillance.
- ❖ Coloration.
- ❖ Dureté.
- ❖ Résistance à la corrosion.
- ❖ Résistance aux chocs.
- ❖ Résistance au feu.
- ❖ Résistance à la rayure.

Les gelcoats se présentent sous forme de liquide homogène, ils se composent :

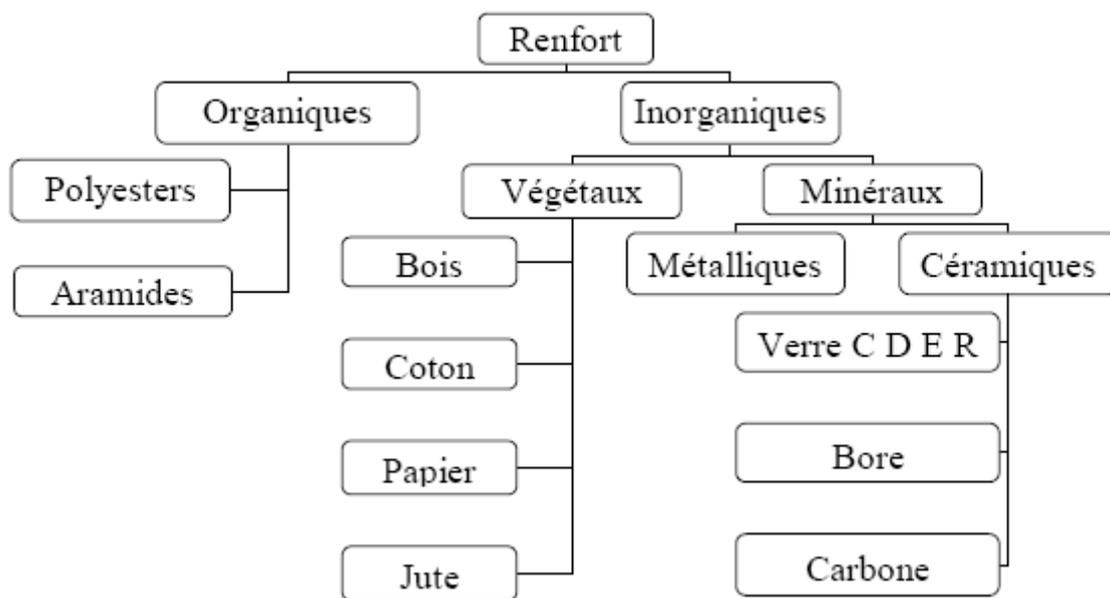
- D'une résine de base.
- De charges diverses.
- De pigments.
- De différents additifs.

Les gelcoats s'appliquent généralement en fond de moule soit à la brosse soit en pulvérisation avec des épaisseurs de 0,4 à 0,6 mm.

Dans le secteur automobile, les gelcoats sont principalement utilisés dans la fabrication de carrosseries de véhicules industriels ou de chantier.

5.4. Les renforts

Les renforts assurent les performances mécaniques du matériau composite. Un grand nombre de fibre sont disponible sur le marché en fonction des propriétés et des couts de revient recherchés pour la structure réalisée. Ils se caractérisent par la nature des fibres qui les composent et leur présentation commerciale.



Différentes familles du renfort.

5.4.1. Les fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les place au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Elles constituent le renfort essentiel des composites de *grande diffusion*. Elles sont obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

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

Le tableau suivant représente quelques propriétés des fibres de verre:

Densité	2,54
Module en traction	72 GPa
Résistance à la rupture	2800 MPa
Allongement %	2

5.4.2. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

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

La qualité des fibres de carbones finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Le tableau suivant représente quelques propriétés des fibres de carbone :

Densité	1,76
Module en traction	230 GPa
Résistance à la rupture	3290 MPa
Allongement %	1,4

5.4.3. 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.
- Fibres de Bore.
- Fibres de Bore carbure de silicium.

5.4.4. Les fibres de basalte

Trois fois plus chère que la fibre de verre, la fibre de basalte est une fibre naturelle issue de la roche volcanique. Cette roche formée à partir de magma refroidi confère des

propriétés exceptionnelles à la fibre de basalte. Elle est plus légère est plus résistante que la fibre de verre. Très utilisée dans l'automobile pour ses propriétés thermiques, elle est incombustible, possède de bonnes propriétés mécaniques et couvre une large plage de température qui lui confère un réel avantage en matière d'isolation thermique : $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. D'autre part, elle est imperméable et résiste aux radiations, aux acides ainsi qu'aux rayonnements ultraviolets.

6. Les grandes familles de composites

Comme nous l'avons vu précédemment, un matériau composite résulte de l'association d'une matrice, d'un élément renforçant et de différents additifs. Les matrices peuvent être de différentes sortes permettant ainsi de différencier plusieurs types de composites:

- Les composites à matrice thermoplastique,
- Les composites à matrice thermodurcissable,
- Les composites à matrice élastomère,
- Les composites à matrice et renfort métalliques,
- Les bio-composites.

6.1. Les composites à matrice organique

Les composites à matrice organique, regroupent les composites à matrice thermoplastique, thermodurcissable et élastomère.

6.1.1. Les composites à matrice thermoplastique

Dans l'automobile, ces matrices sont généralement associées à différents types de fibres telles que la fibre de verre, la fibre de carbone ou encore les fibres végétales comme le lin :

- Composite thermoplastique utilisé dans le secteur automobile : les TRE (Thermoplastique Renforcé Estampable à base de polypropylène et de fibre de verre) pour la fabrication de pare-chocs. Ils se présentent sous forme de plaque semi-rigide qui une fois ramollie sous infrarouge à 195°C , se met en forme par estampage sous une presse réglée à 60°C . Les Temps de cycle très courts permettent une production à grand volume de l'ordre de 60 pièces à l'heure.

6.1.2. Les composites à matrice thermodurcissable

Les composites réalisés à partir de ces matrices peuvent être renforcés avec toutes sortes de fibres mais les plus communes restent la fibre de verre et la fibre de carbone.

Exemple de pièces fabriquées en matériaux composites thermodurcissables : élément de carrosserie :

a) Toit de camion



Toit de camion

b) face avant de la Peugeot 207

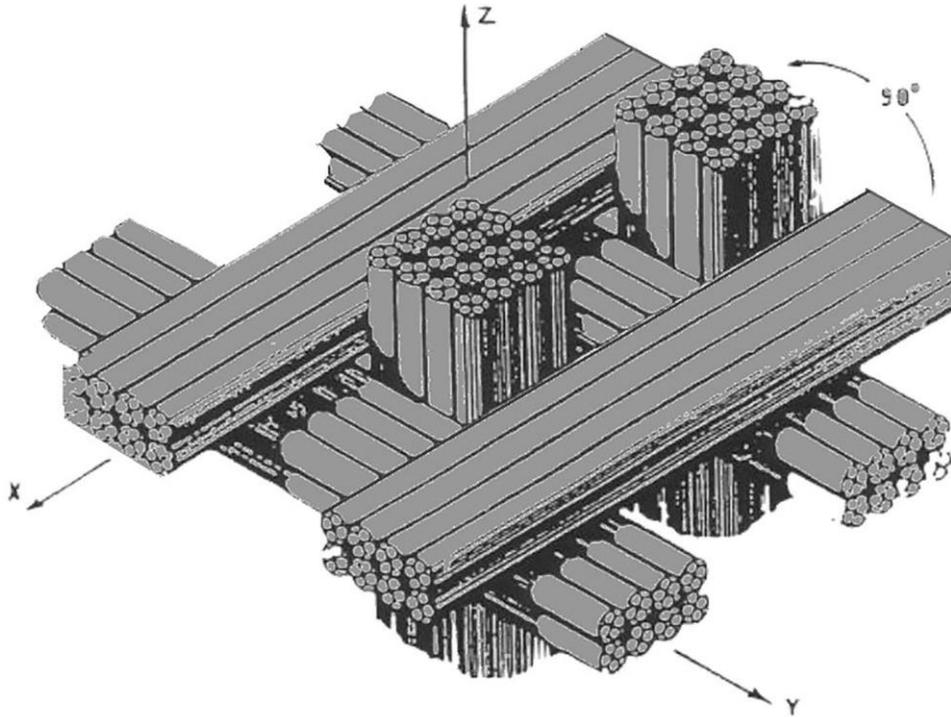


Face avant Peugeot 207

6.1.3. Les matériaux composites thermodurcissables carbonés-carbonés

Le carbone-carbone est un matériau composite d'une matrice en carbone et d'un renfort de carbone. Il appartient à la famille des composites à haute performances thermiques ou composites thermo-structuraux.

Il est composé d'une matrice en carbone renforcé de fibres de carbone. Cette composition lui confère des qualités de résistance mécanique exceptionnelles même lorsqu'il est soumis à de très hautes températures.



Disposition des fils dans un composite 3 D à structure carbone-carbone.

- Sur les voitures de formule 1, ces disques carbonés sont capable d'absorber et de dissiper une quantité de chaleur de plus de 1,5 million de joules et stopper un véhicule à plus de 250 Km/h. Cette quantité passe à plus de 1 milliard de joules pour un airbus 340 lors de l'atterrissage.



Disque de frein carbone pour formule 1.

6.2. Les composites à matrice et renfort métalliques

Par définition, un composite à matrice métallique est constitué d'une matrice métallique et d'un renfort métallique ou céramique.

Développé à partir des années 1960- 1965, ce type de composite était destiné vers l'aéronautique et l'espace car le cout des fibres était très élevés. Dans les années 80, l'apparition des fibres céramiques a permis d'élargir leur champ d'application à l'automobile.

- La matrice peut être :

- Monophasé (métal pur ou solution solide : magnésium, Titane.....).
- Multiphasé (alliage durci par précipitation : Aluminium et ses alliages, acier.....).

- Les renforts utilisés peuvent être de deux types :

- Soit des particules ou des fibres courtes (carbure de silicium, nitrure de silicium, titanate de potassium,...), qui apportent des propriétés mécaniques légèrement supérieures à celles du métal formant la matrice, et pouvant être utilisées dans les procédés de mise en forme des métaux.
- Soit des fibres longues céramiques ou métalliques (carbone, bore, aluminium, céramique, tungstène,...) générant des propriétés bien supérieurs à celles de la matrice, mais avec des procédés de mise en forme plus couteux (Infiltration de métal fondu autour d'un renfort libre).

Comparativement aux matrices organiques, les matrices métalliques présentent plusieurs avantages :

- Meilleure tenue en température permettant de reculer les limites d'utilisation en environnement moteur,
- Meilleures propriétés mécaniques intrinsèque de la matrice, permettant l'utilisation de renforts localisés ou unidirectionnels,
- Meilleure tenue au vieillissement et au feu,
- Ductilité élevée de la matrice,
- Meilleure étanchéité aux gaz (herméticité)....

6.3. Les composites à base d'élastomère

Très utilisés dans le secteur de l'automobile, ces composés élastomériques servent notamment pour la réalisation de pneumatiques, tuyaux renforcés pour le transport des fluides sous pression (circuit de freinage, alimentation turbo...), durites, tuyaux d'alimentation en essence, conduite d'air conditionné, chauffage, etc.

6.4. Les biocomposites

L'apparition des fibres végétales dans les applications des composites révolutionne peu à peu le paysage industriel, notamment dans l'automobile où le facteur environnement est une valeur forte. Les biocomposites envahissent peu à peu l'espace confort de nos véhicules à l'image de Mercedes qui équipe déjà ses Class A, M et R d'éléments en fibre naturelle comme les panneaux de porte ou les capots de roue de secours.



Panneau de port Mercedes Class-M et Class-R en fibres naturelles.

7. La mise en œuvre des matériaux composites

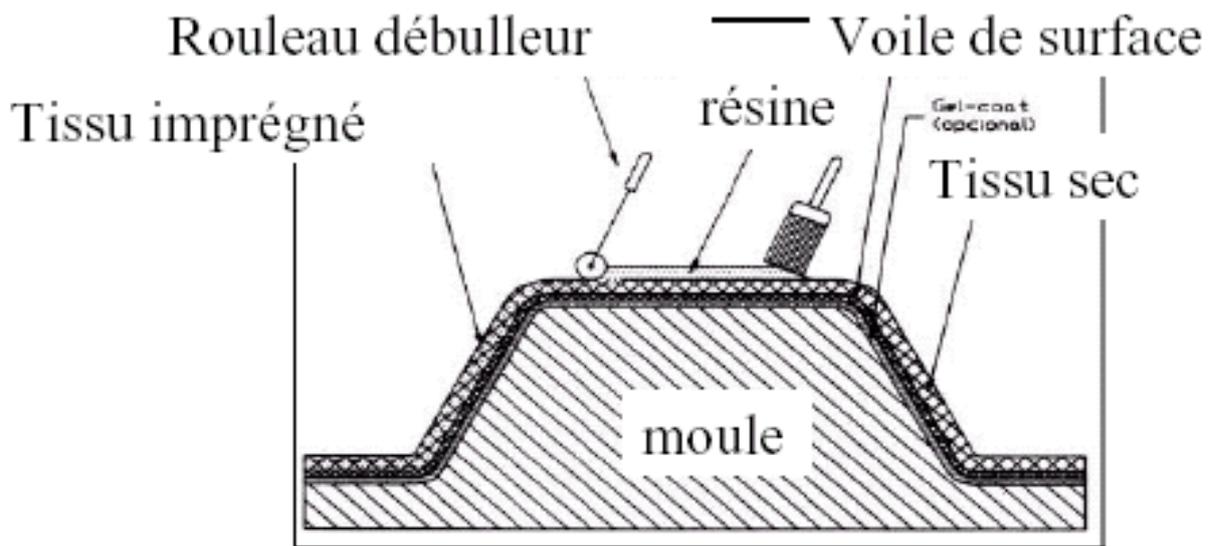
Les procédés les plus importants sont :

1. Moulage par contact
2. Moulage par projection simultanée
3. Injection thermdurcissable (Bulk Molding Compound BMC)
4. Compression thermdurcissable (Sheet Molding Compound SMC)
5. Enroulement filamentaire (ou bobinage).

7.1. Moulage par contact

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermdurcissable.

Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

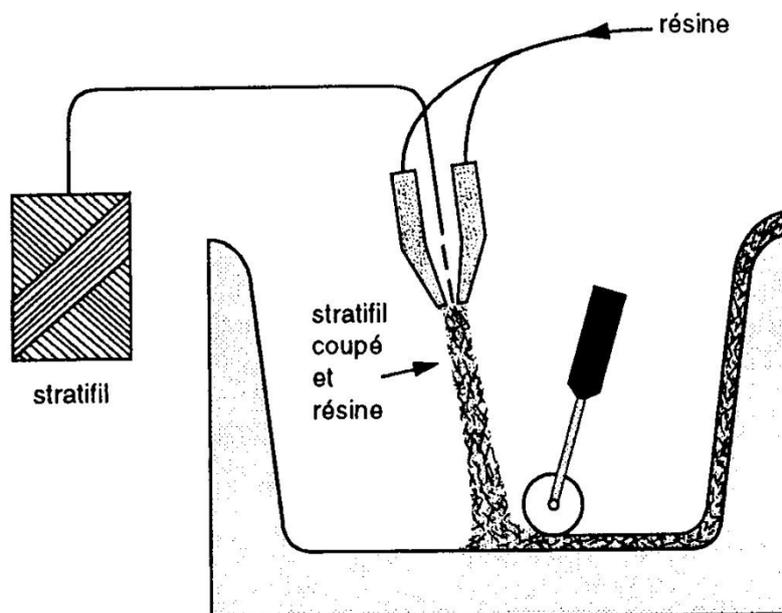


Moulage par contact

7.2. Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifile et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et ébullée au rouleau cannelé.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient.



Moulage par projection simultanée

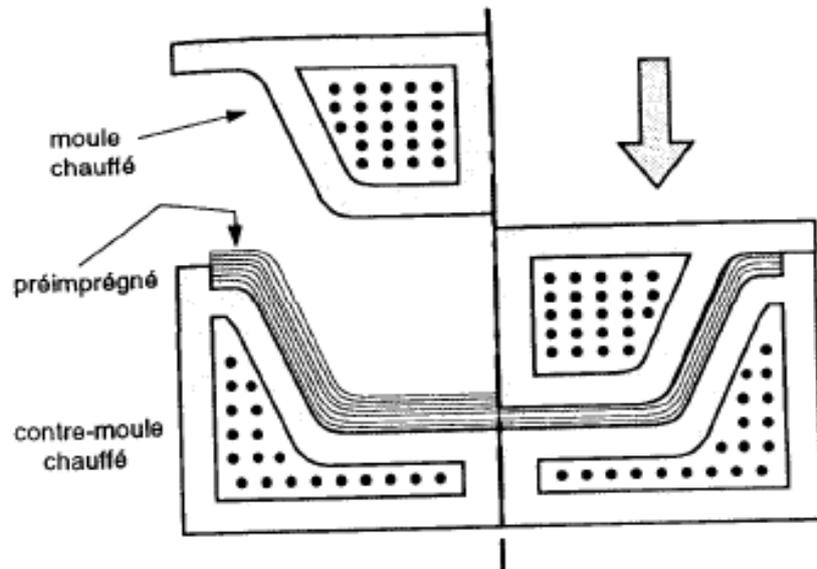
7.3. Injection thermodurcissable: (Bulk Molding Compound BMC)

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 et 170°C sous une pression de 50 à 100 bars.

Les avantages :

- Réalisation de grandes séries,

Le compound : c'est de la résine, de la fibre coupée et de la charge.



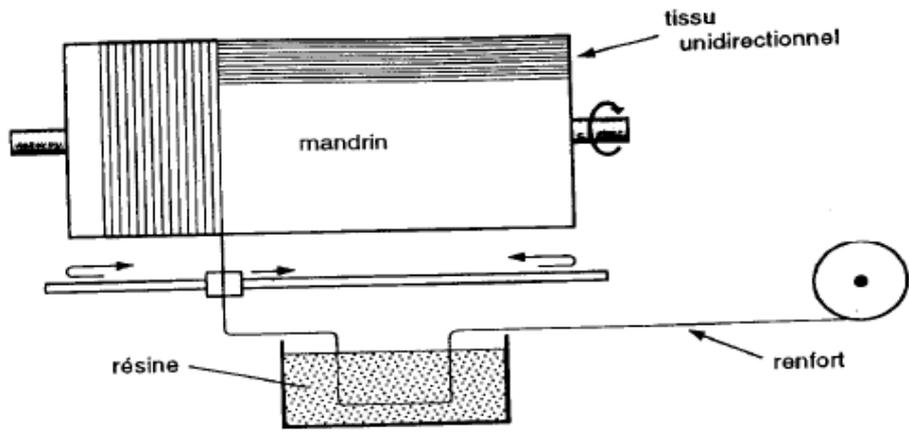
Injection thermodurcissable BMC.

7.4. Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.

Les avantages sont :

- La disposition optimale des renforts,
- Très bonnes propriétés mécaniques,
- Possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.



Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Références

1- *Traité des Matériaux*, PPUR

vol.1:Introduction à la Science des Matériaux, 3^e éd.

vol.15 : Matériaux Composites à Matrices Organiques.

2- *Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. France.2008. cel- 00470296v2.*

3- *BERTHELOT, Jean-Marie. Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures, 1999, vol. 4.*

4- *Marzano, M., & Celle, P. (2014). Les matériaux composites. Rapport technique, Association Nationale pour la Formation Automobile.*