

Module : *Matériaux Composites*

- **Chapitre 1** : Généralités sur les matériaux composites et leurs applications
- **Chapitre 2** : Procédés d'élaboration des composites et des constituants
- **Chapitre 3** : Propriétés mécaniques des composites
(comportement micro-mécanique)
- **Chapitre 4** : Comportement élastique d'un composite unidirectionnel
(comportement macro-mécanique)
- **Chapitre 5** : comportement thermomécanique d'un composite unidirectionnel
- **Chapitre 6** : Comportement mécanique des stratifiés composites
- **Chapitre 7** : Ruptures et endommagement des composites

Quelques ouvrages de référence

- Matériaux Composites - Comportement mécanique et analyse des structures, 3ième édition, J.-M. Berthelot, Éd. Tec & Doc 1999
- Matériaux Composites, 5ième édition révisée, Daniel Gay, Lavoisier, 2005
- Mechanics Of Composite Materials 2nd Edition; Robert M. Jones
- Cours du Pr. Anh Dung NGÔ (Internet)

Chapitre 1

Généralité sur les matériaux composites

Définitions; Classification; Caractéristique; Elaboration;
Avantages et inconvénients; Applications

Objectifs : informations les plus courantes pour appréhender ces matériaux.

1. Préliminaire

Les matériaux !

4 Types :

- Métaux
- Céramiques
- Polymères
- **Composites**

Métaux

Métaux ferreux et non ferreux ;

Alliages ;

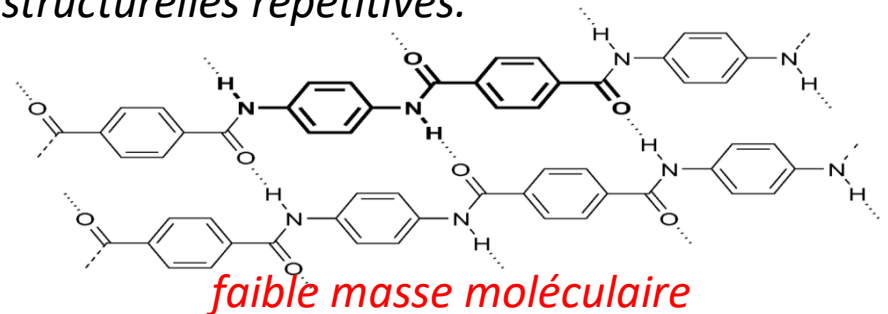
Céramiques

Les propriétés particulières de ces matériaux ont conduit les ingénieurs à imaginer des applications industrielles aux céramiques. On parle alors de céramiques techniques. Elles sont utilisées comme supports d'éléments chauffants, comme billes de roulement, comme outils de coupe, comme isolants électriques ou encore comme renfort aux matériaux composites métalliques.

Polymères

- les matières plastiques ;
- les caoutchoucs naturels (latex) et synthétiques ;
- les colles ;
- les peintures ;
- les résines.

Chimie : macromolécules constituées d'unités structurales répétitives.



Quelques définitions élémentaires.

- **Isotrope** : qui présente les même propriétés dans toutes les directions;
- **Homogène** : un matériau est dit homogène lorsque ses propriétés sont uniformes, c'est-à-dire ont la même valeur partout dans le matériau considéré;
- **Anisotrope** : Les propriétés physique varient selon la direction considérée;
- **Hétérogène** : Qui est composé d 'éléments de nature différente;

Le composites est : anisotrope Hétérogène

2. Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément.

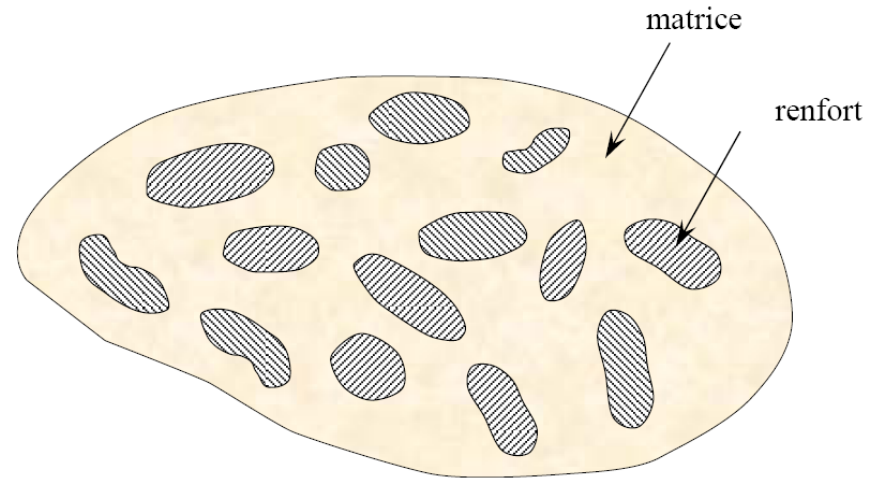


Fig. 1 : Matériau composite

Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple, le béton, la boue, le contreplaqué...), ce terme s'adresse ***plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux.***

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1. <i>Composites à matrice organique</i> Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés	Résine/charges/fibres cellulose-siques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
2. <i>Composites à matrice minérale</i> Béton Composite carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques	Génie civil Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc. Pièces thermo-mécaniques
3. <i>Composites à matrice métallique</i>	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace
4. <i>Sandwiches</i> { Peaux Ames	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

Tableau 1 :
Exemple de matériaux composites

Caractéristiques générales

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants,
- de leur distribution géométrique,
- de leurs interactions, etc.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort, sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort.

3. Éléments constitutants d'un matériau composite

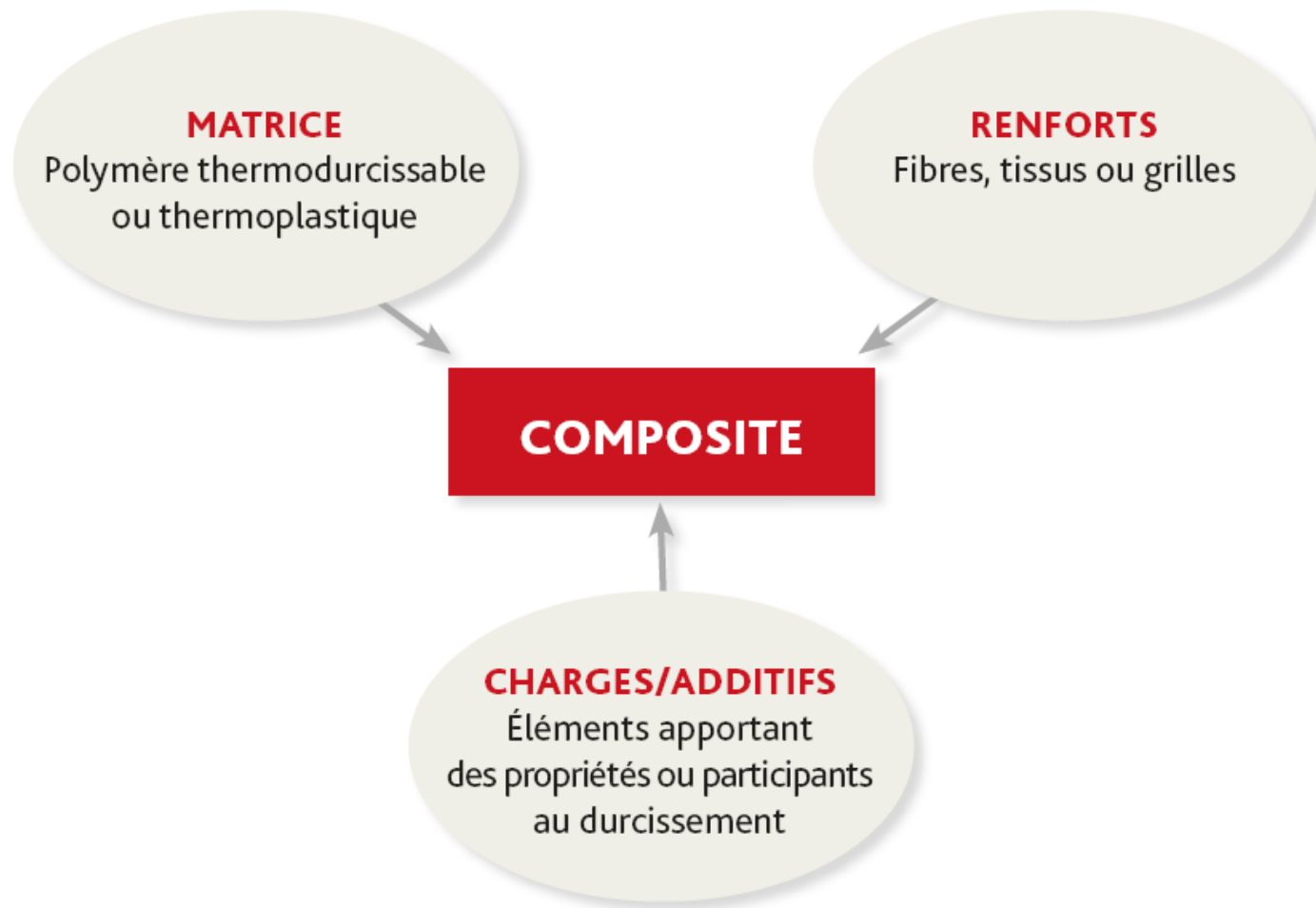


Fig.2 - Composition d'un matériau composite

Qu'est – ce – qu'un matériaux composite ?

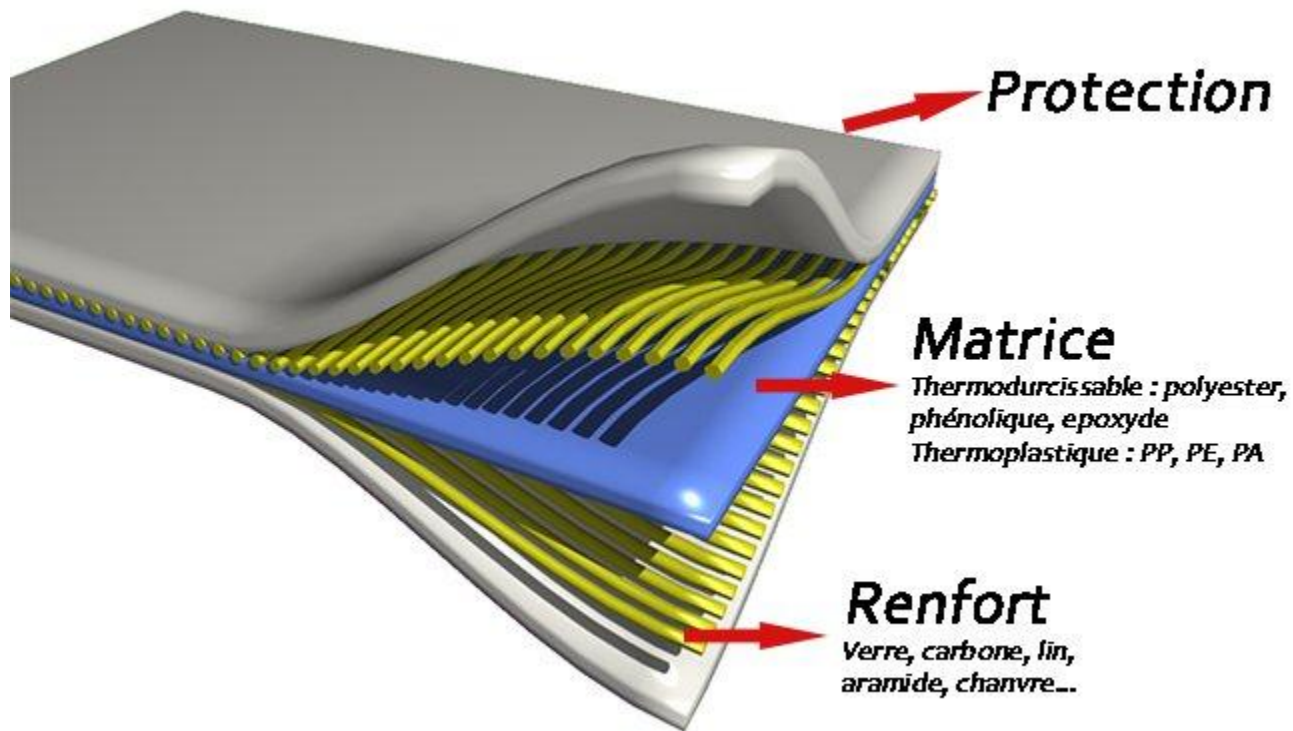


Fig.3 – Exemple de conception d'un composite

3.1 Classification des matériaux composites ?

3.1.1 Matrices :

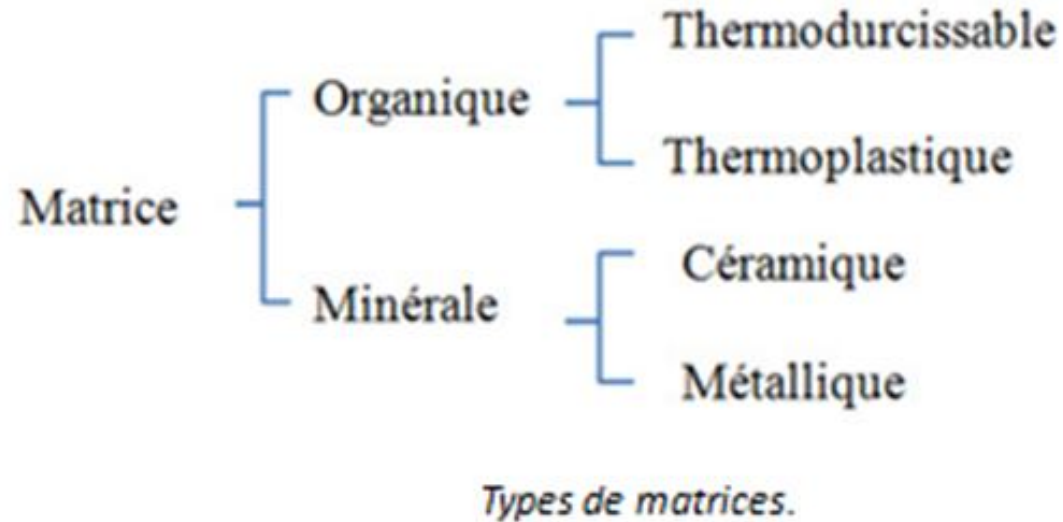


Fig.4 – Classification des matrice

Le rôle de la matrice est double : elle conserve la disposition des fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce.

Les matrices résineuses :

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.

Masses volumique faible ➡ Caractéristiques mécaniques élevées du composite

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
- les résines époxydes.

Les thermoplastiques

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils ramollissent et se déforment à la chaleur. Ils peuvent être refondus et remis en œuvre un grand nombre de fois.



Les thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés, il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.



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).

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.

3.1.2 Le Renfort

Le renfort est en principe plus dur que la résine ; son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance. Il se présente, généralement, sous forme de fibres. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 4.

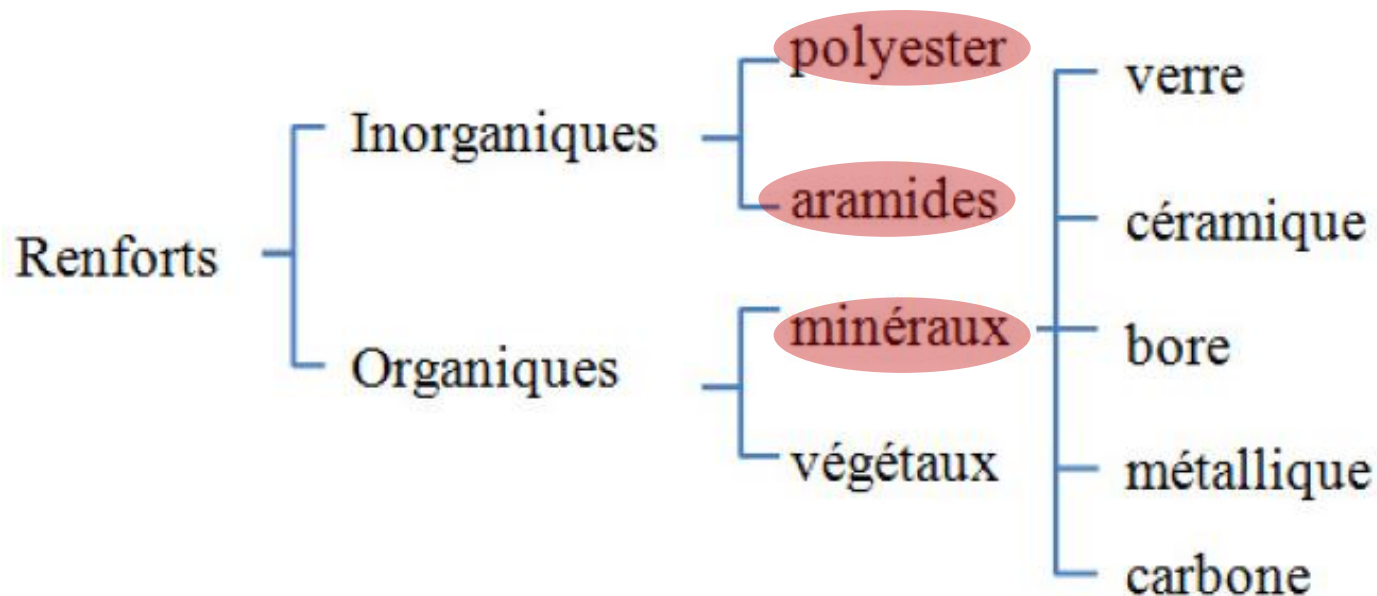


Fig. 5: Types de renfort

Les Fibres et tissus

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.).

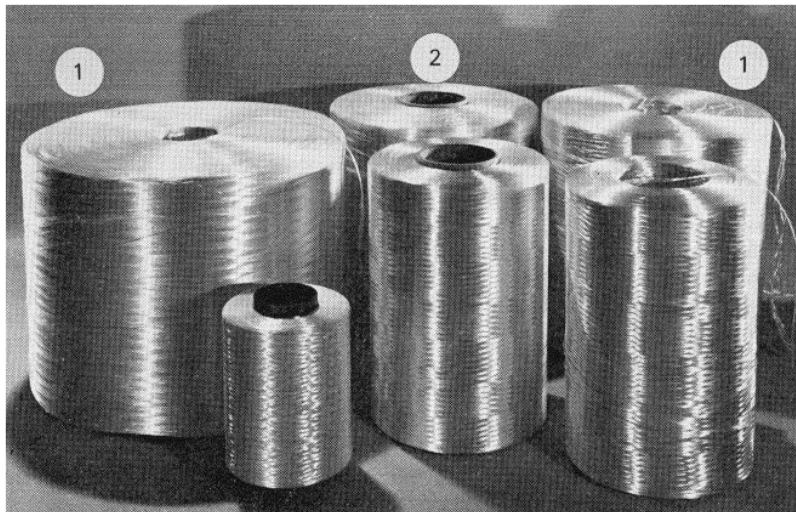


Fig.6 Différentes présentations des stratifils :
1. Pelotes – 2. Bobines (sur tubes)

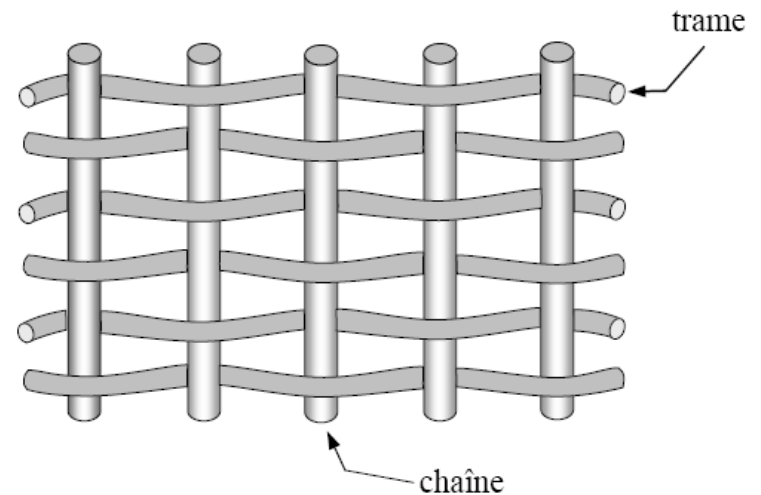
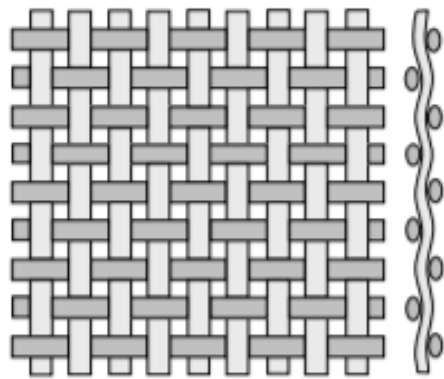
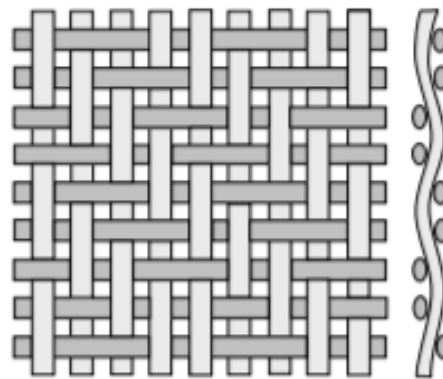


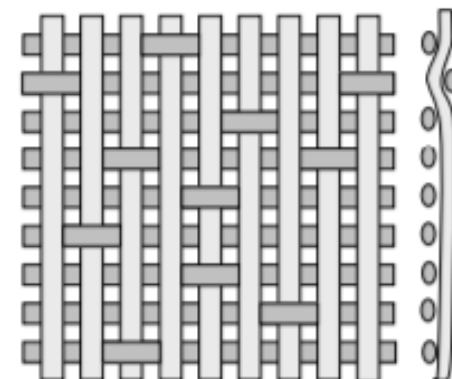
Fig.7 – Chaîne et trame d'un tissu



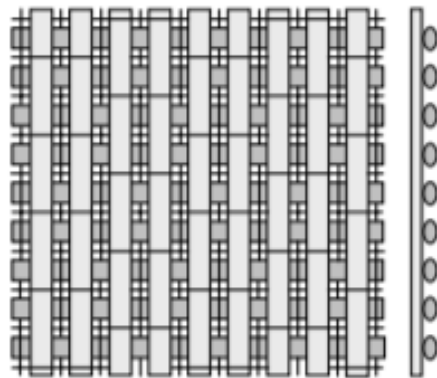
armure taffetas



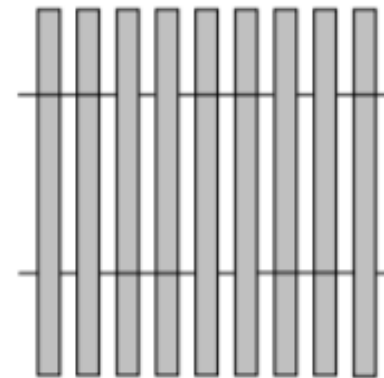
armure sergé



armure satin (ici satin de 8)

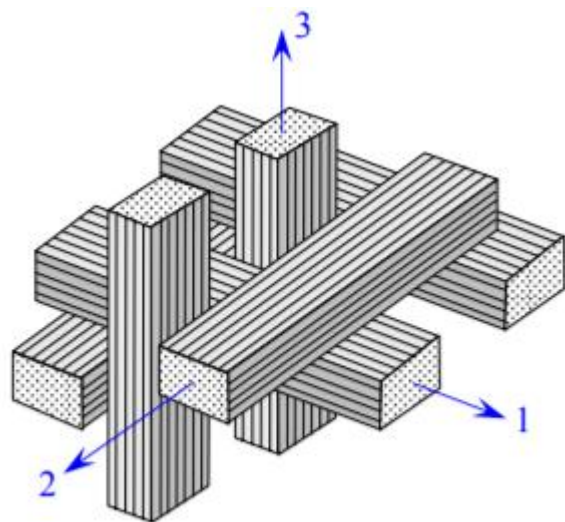


armure croisée (non tissée)

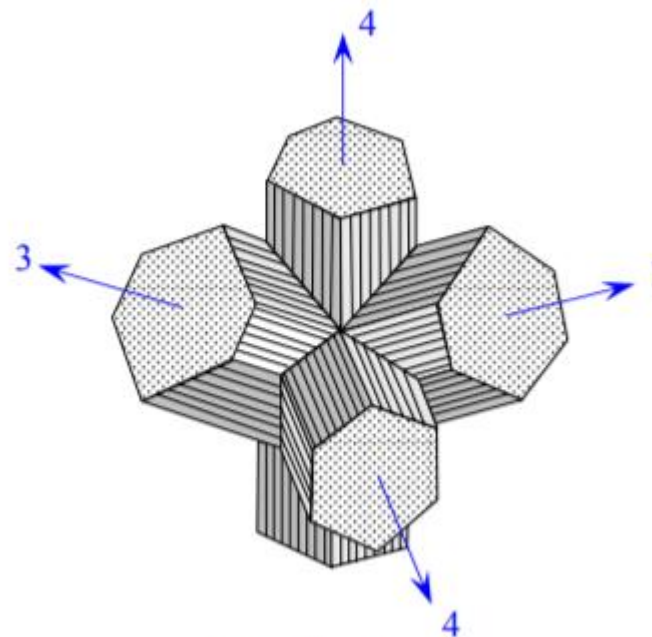


armure unidirectionnelle

Fig.8 – Principaux types d'armatures pour le tissage



Tissage 3D orthogonal.



Tissage 4D.

Fig.9 – Tissus multidirectionnel

3.2 Les charges et additifs

Les charges

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.

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.

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.



Microbille phénolique



Microbille de verre

Charges

Charge et additifs



Isopropanol (Alcool)
Agent de nettoyage



Catalyseur

Additifs

3.3 Les principales fibres

Les fibres de verre

Elaborées à partir d'un verre filable, composé de silice alumine chaux, magnésie. Peux couteux et possèdent de très bonne caractéristique mécanique.

Les fibres de carbone

Très fortes propriétés mécaniques ; élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur.

Les fibres aramides (Kevlar)

Propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones, résistance à la compression faible, matériaux résistant à la chaleur.

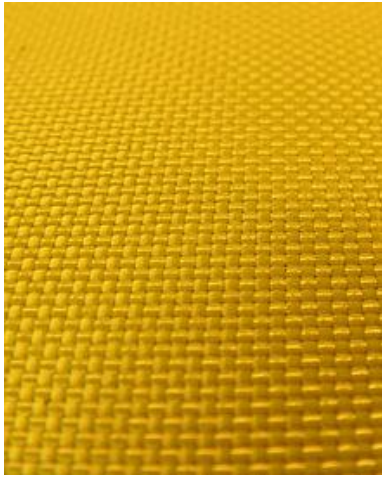
Les fibres céramiques

Applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Notamment dans les parties chaudes des moteurs. Exemples:

– les fibres de Carbure de Silicium, – les fibres de Bore.

Les fibres de basalte

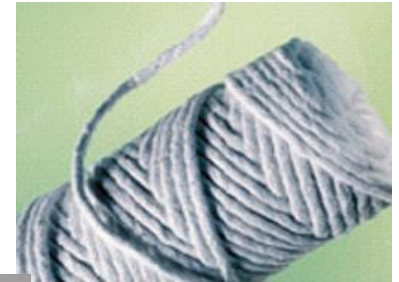
Trois fois plus chère que la fibre de verre, c'est une fibre naturelle issue de la roche volcanique. Cette roche formée à partir de magma refroidi lui confère des propriétés exceptionnelles. Elle est plus légère et plus résistante que la fibre de verre. Très utilisée dans l'automobile pour ses propriétés thermiques, incombustible, bonnes propriétés mécaniques, couvre une large plage de température qui lui confère un réel avantage en matière d'isolation thermique : -260°C à + 1 200° C.



Les fibres aramides



Les fibres céramique



**Les fibres de bore
(filaments de tungstène)**



Les fibres de verre

Fig.9 – Exemples de structures de fibres

Quelque exemples de structures en matériaux composites





Résumé sur la classification des matériaux composites

Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale.

Voir Tableau 1

Important

Composites à matrice métallique

Pour des applications plus haute température, on fait appel aux composites à matrice métallique (C.M.M) jusqu'à 600°C. Les métaux ou alliages métalliques utilisés dans la fabrication des C.M.M., sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques dans l'état non renforcé.

L'aluminium, le **titane** et le **magnésium** sont les métaux les plus couramment utilisés.

Les C.M.M. présentent de bonnes caractéristiques mécaniques spécifiques, une bonne résistance en température et aux chocs thermiques ainsi qu'une bonne résistance à l'usure et à l'abrasion.



Fig. 19- Exemples d'applications des composites à matrice métallique.

4. Intérêts des matériaux composites

- Avantages par rapport aux matériaux usuels;
- Pourquoi les matériaux composites?

Caractéristiques mécaniques spécifiques

Le terme E/ρ est appelé le module *spécifique* d'Young du matériau.

Caractéristiques mécaniques des matériaux

Exemple type :



Souci des avionneurs



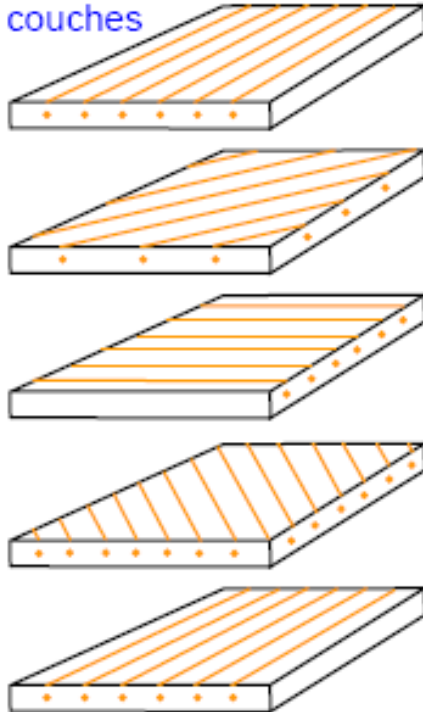
Performance et économie

5. Différentes architectures de matériaux composites

Stratifiés

Les stratifiés sont constitués (figure 6) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Nous examinons les divers types de stratifiés.

Plis unidirectionnels ou
couches



Exemple de désignation :

$[30/90_2/45/0/45]$

stratifié

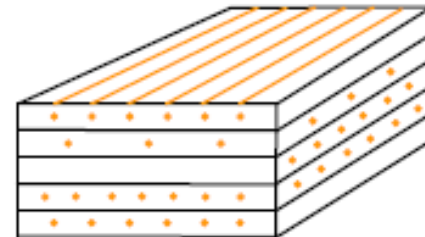
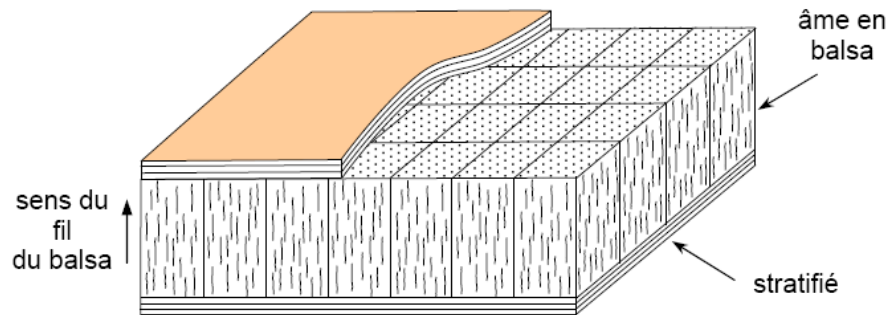
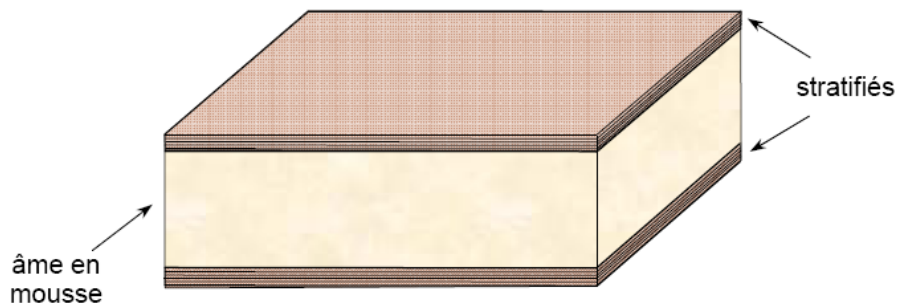
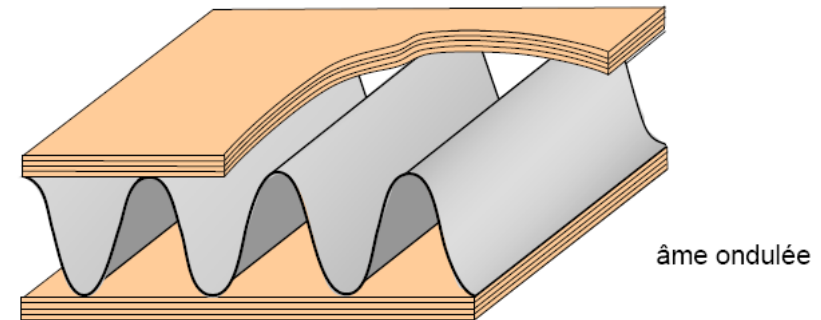
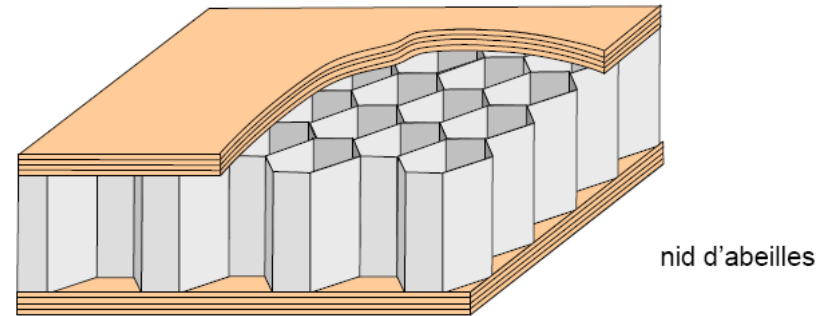


Fig.10 – Composite stratifié

Les Sandwiches



Matériaux sandwiches à âmes pleines.



Matériaux sandwiches à âmes creuses.

Fig.11 – Composite Sandwiches

6. Mises en œuvres des matériaux composites

Formage par Moulage

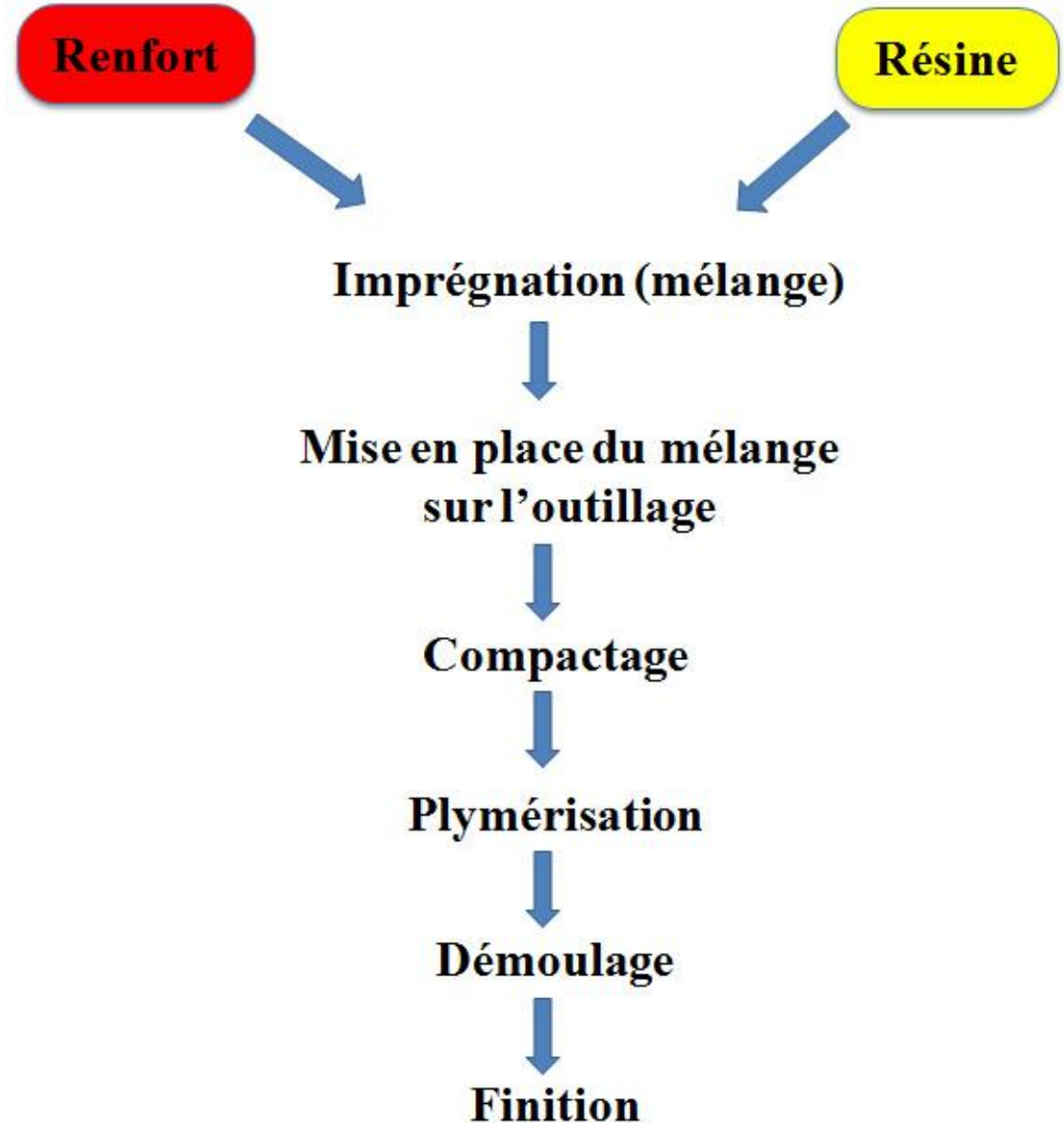
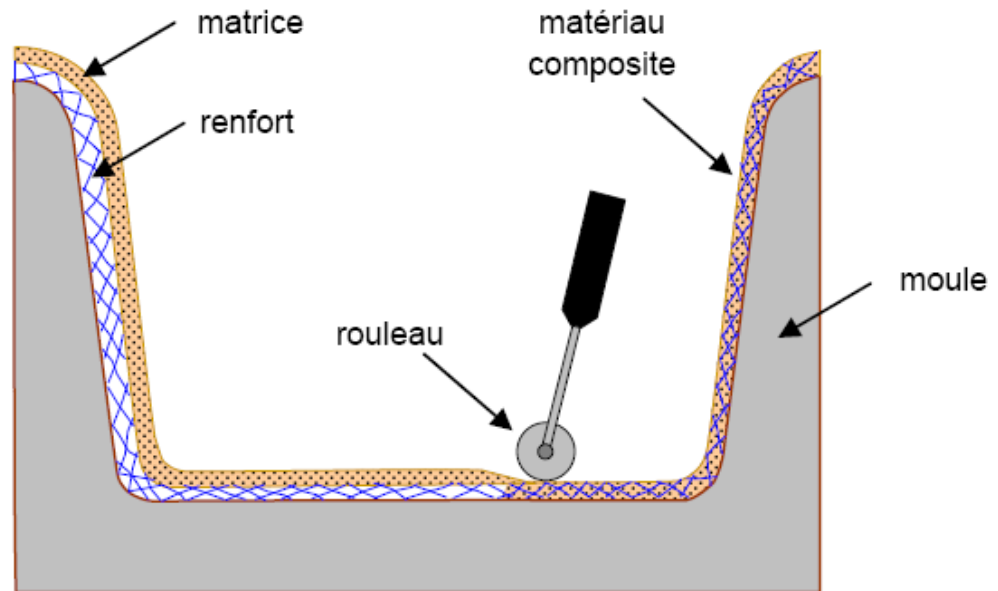


Fig.13 – Suite des opérations de formage par moulage

Moulages sans pression

Moulage au contact



Principe du moulage au contact.

Fig.12 – Principe du moulage au contact

Moulage par projection simultanée

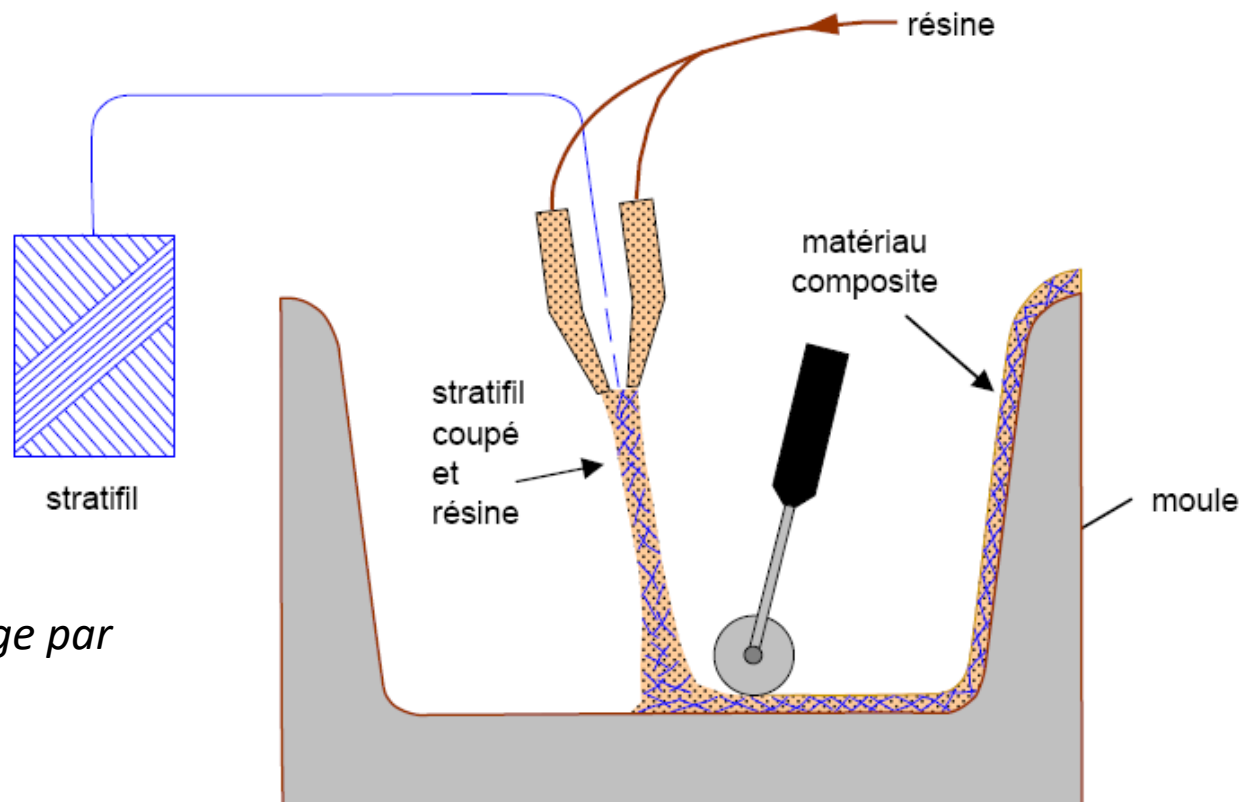


Fig.14 – Principe du moulage par projection simultanée

Principe du moulage par projection simultanée.

Moulage par injection de mousse

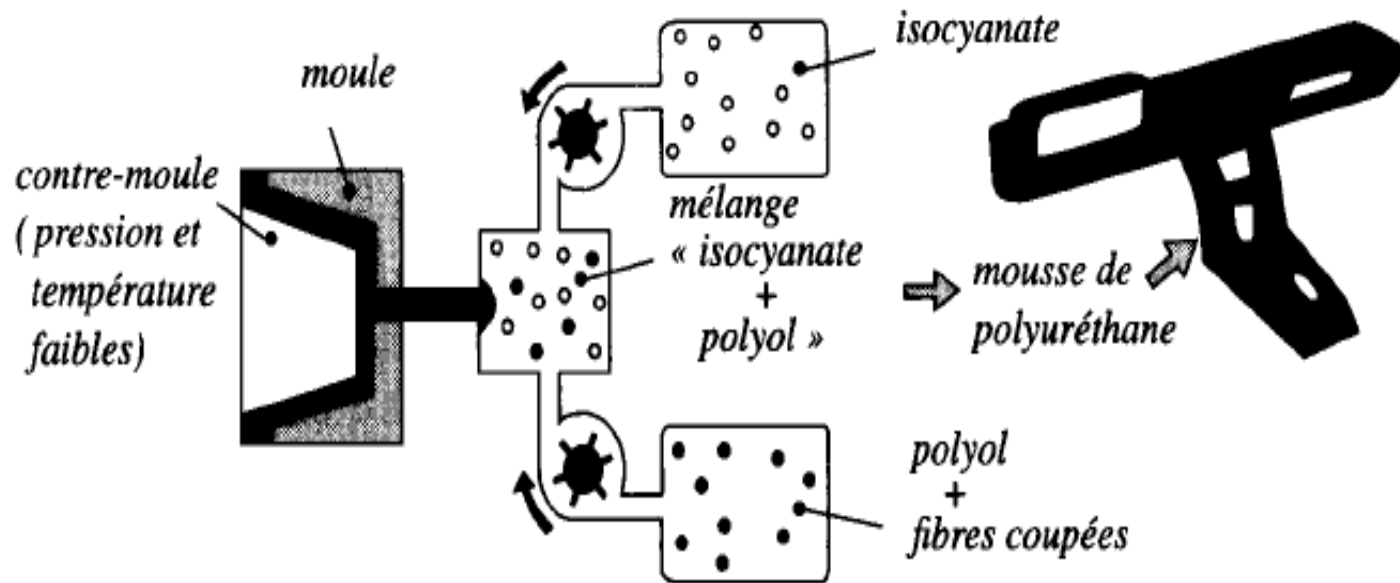


Fig.15

Moulage sous vide

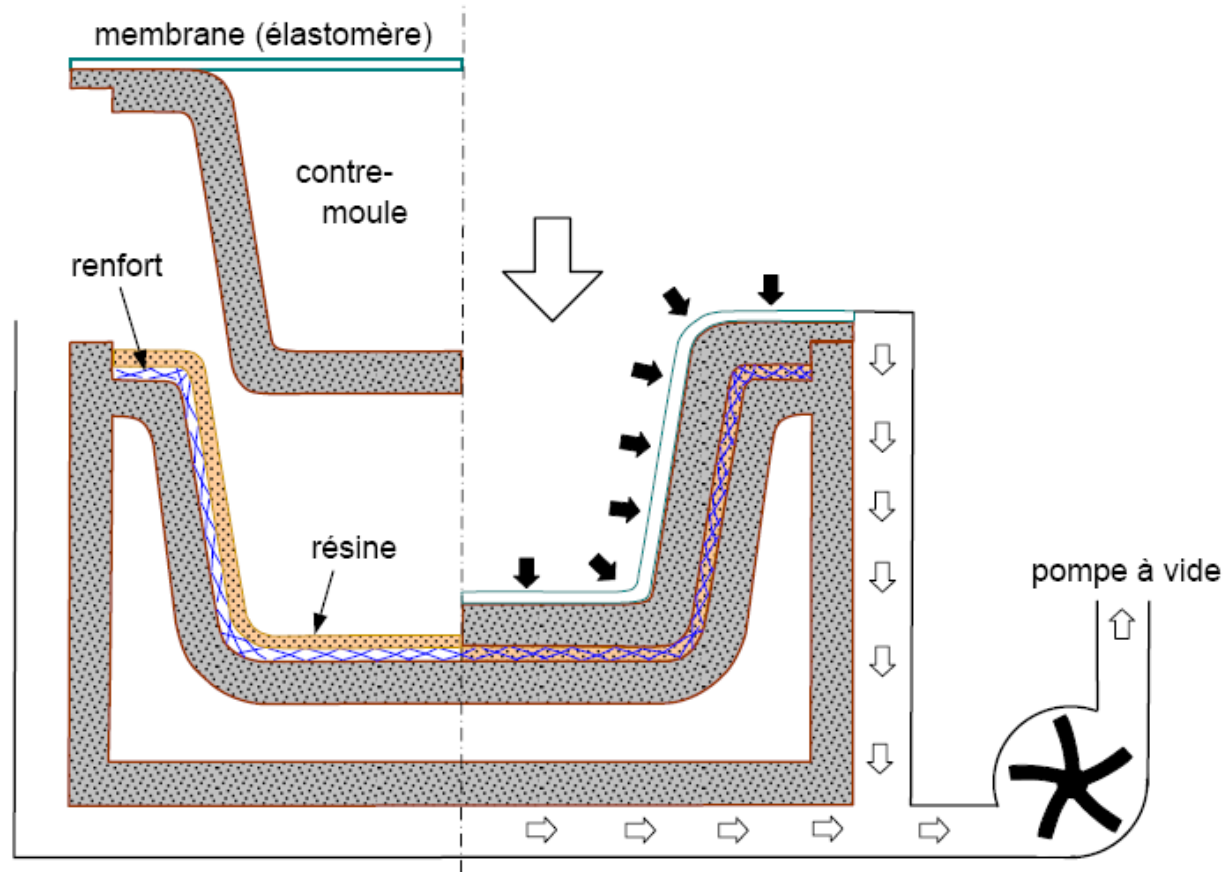
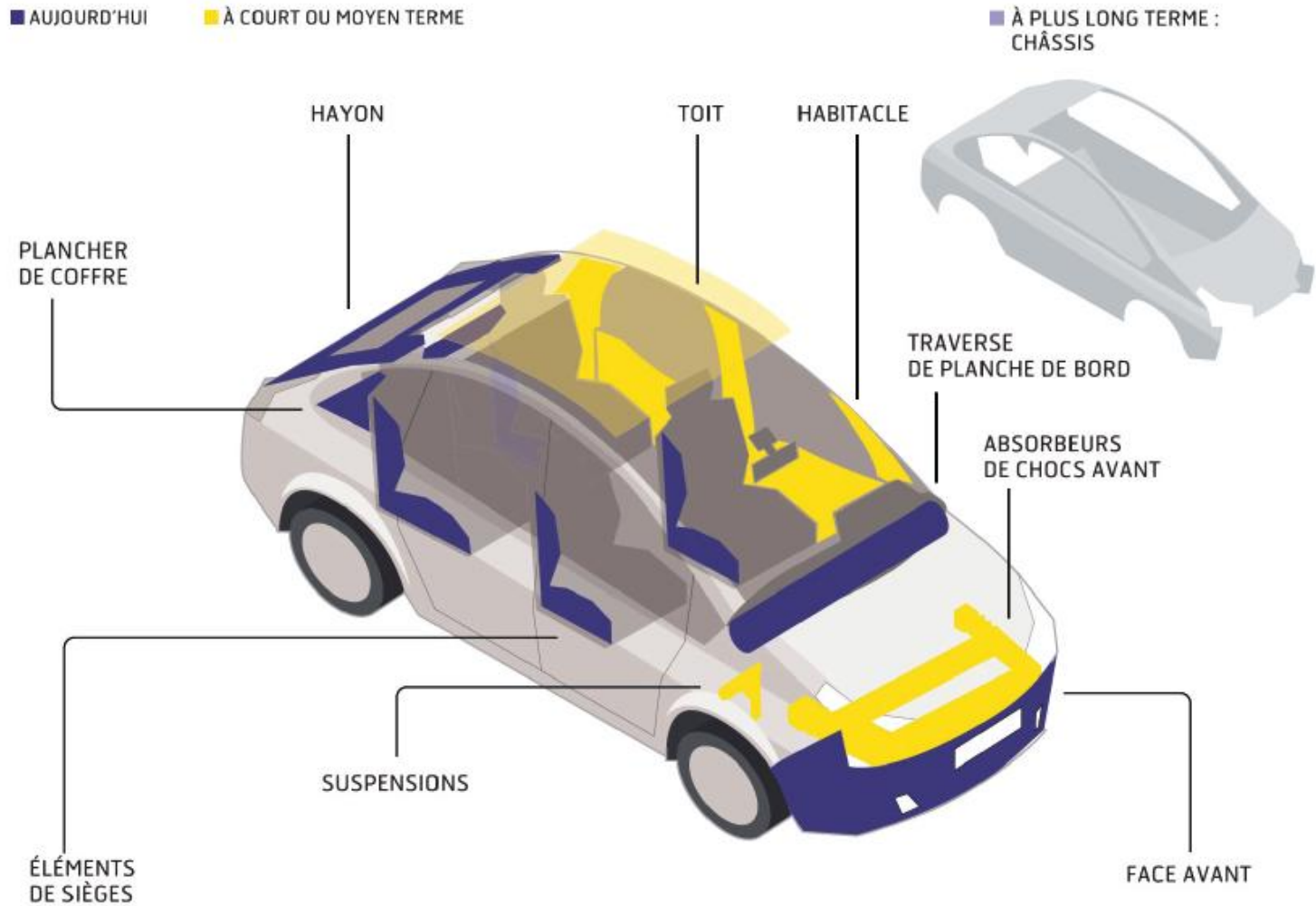
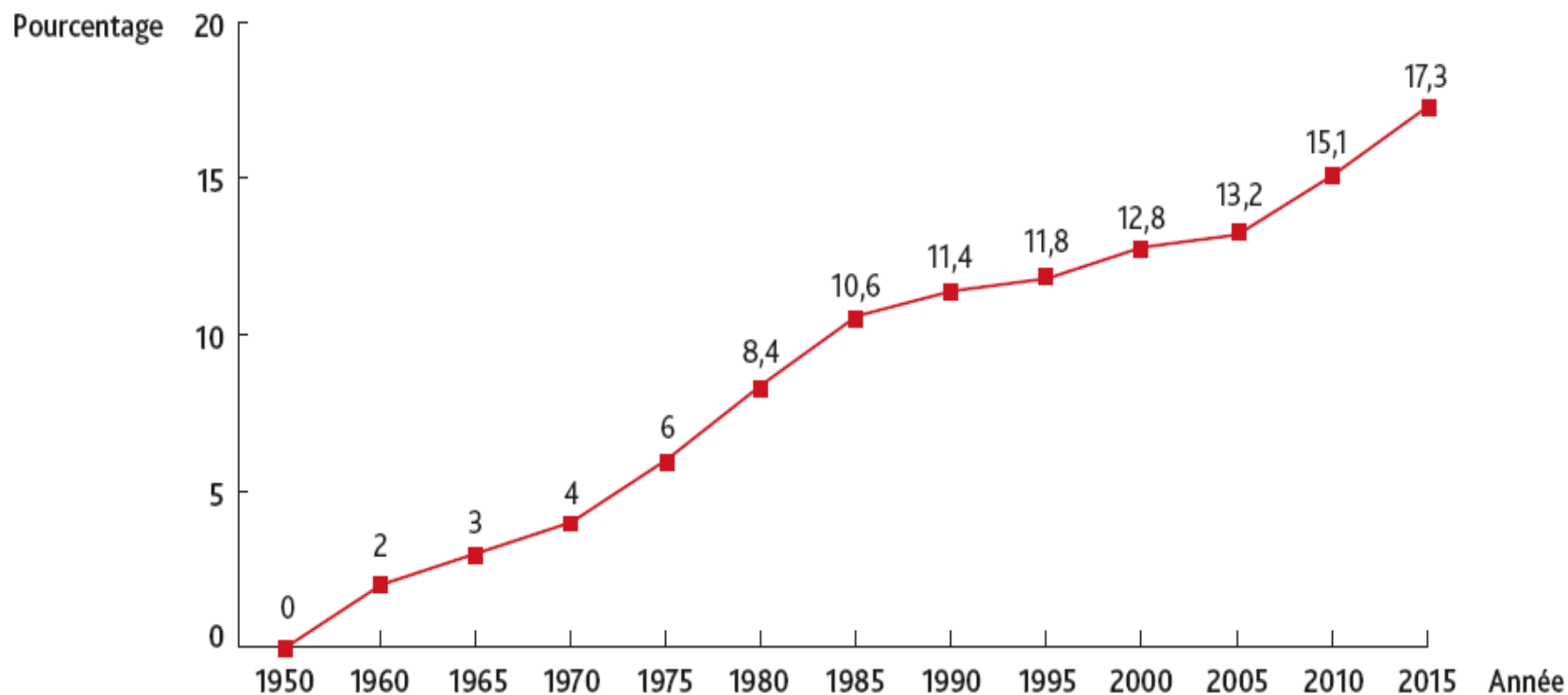


Fig.16

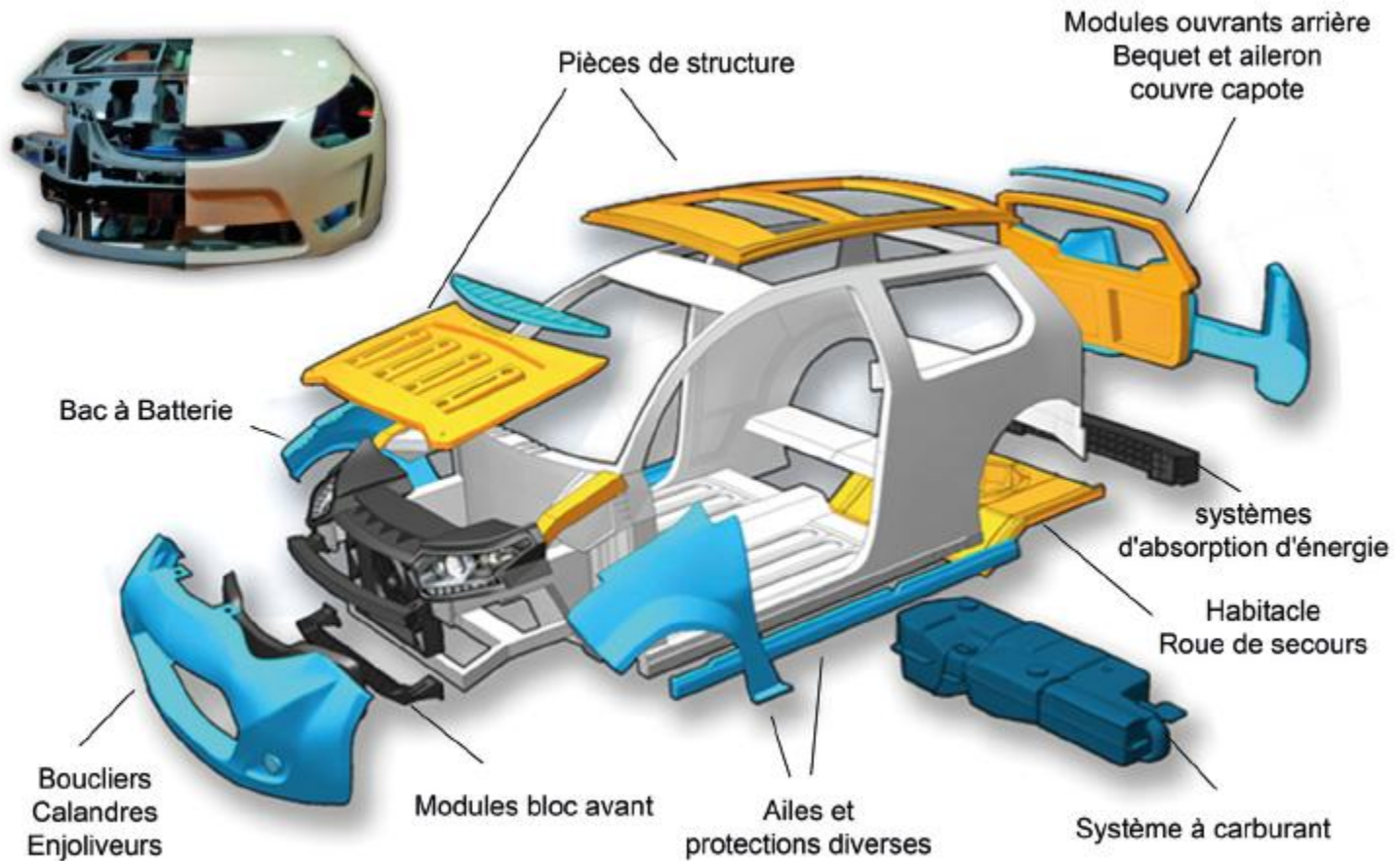
7. Applications

Fig.17-Industrie automobile





L'évolution moyenne de la part pondérale des plastiques présents dans les véhicules au fil des ans



Source : Plastic Omnium

Fig. 18-Les matières plastiques dans l'automobile

Aéronautique

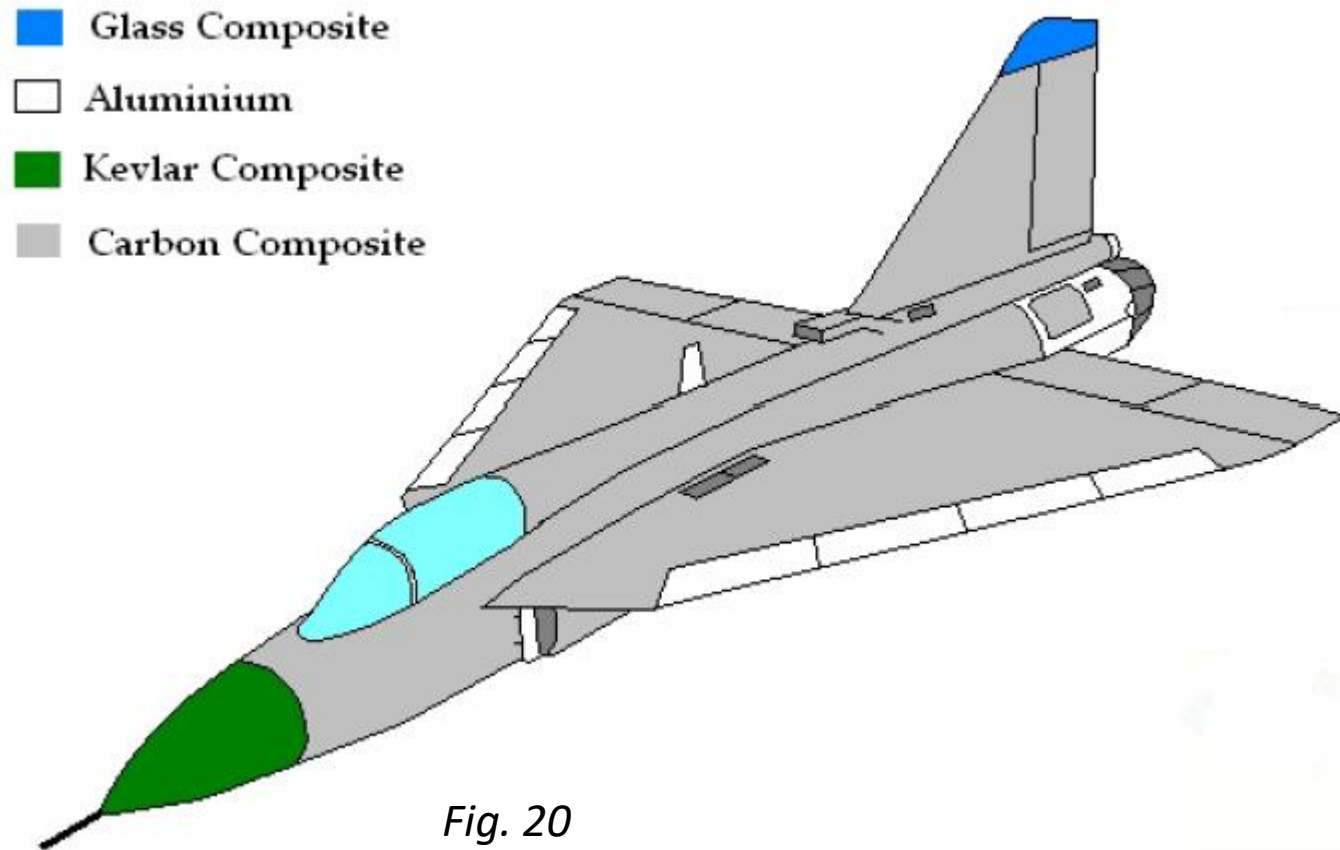


Fig. 20



Fig. 21

Energies renouvelables

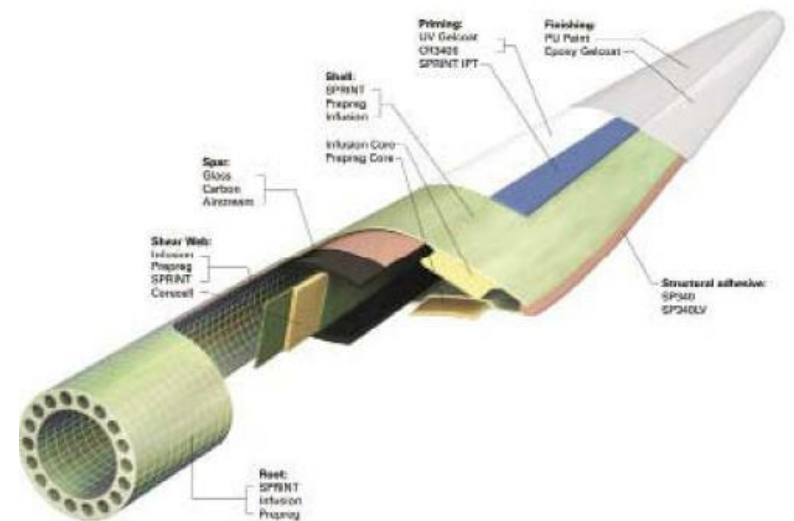


Fig. 22- Éolienne

Médecine

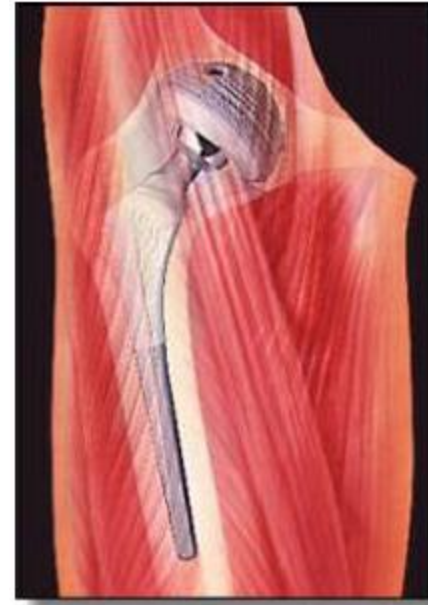


Fig. 23

Sports:



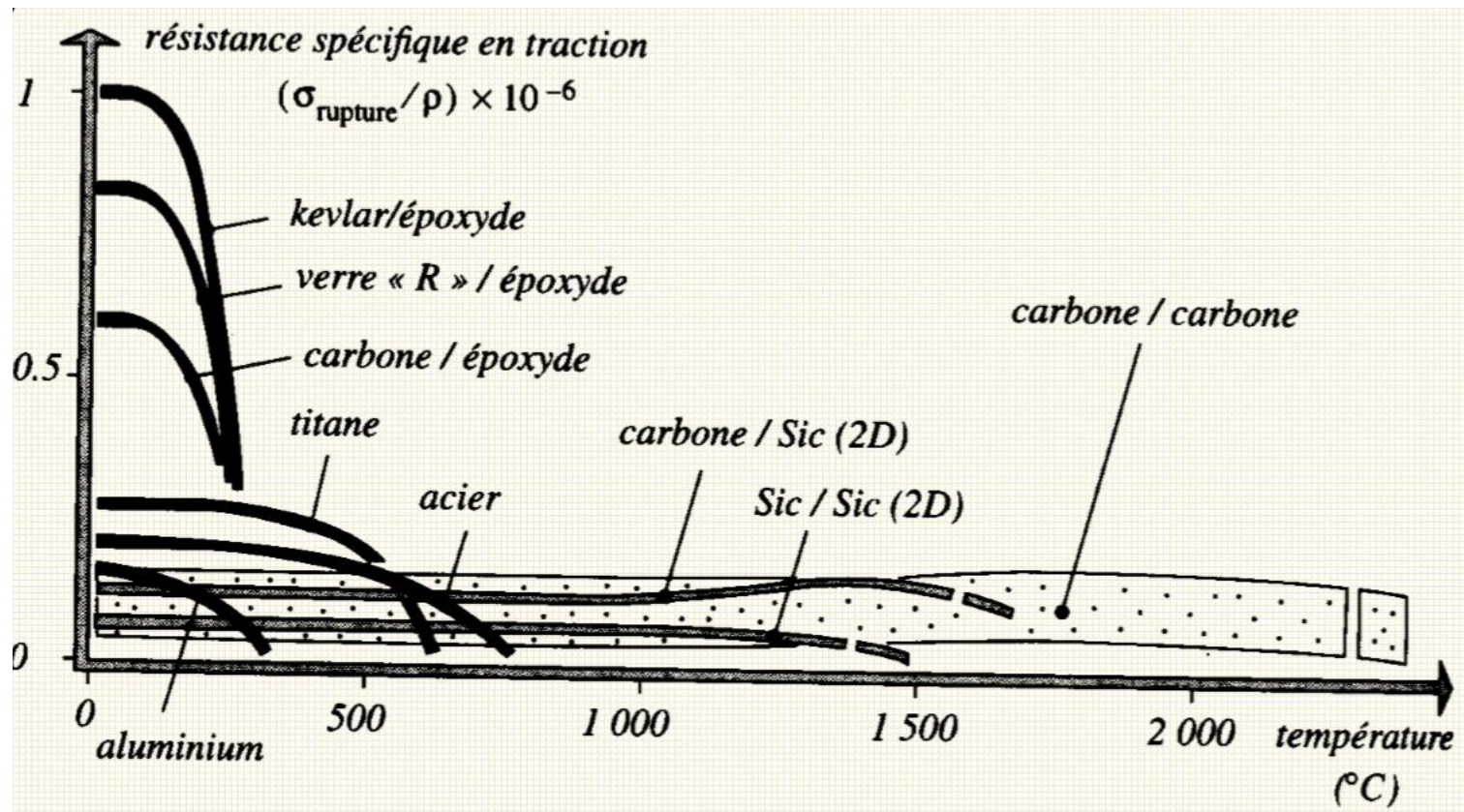


Fig. 24 : Performances des composites vs Matériaux usuels

8. Avantages & Inconvénients des Matériaux Composites

A discuté !

Mini - Projets

1. Procédés d'élaboration des pièces en matériaux composites;
2. Différents types de fibres et procédés d'élaboration;
3. Conception et assemblage des pièces en matériaux composites;
4. Pourquoi les matériaux composites?
5. Essais mécaniques pratiqués sur les matériaux composites
6. Les matériaux composites Stratifiés;
7. Les matériaux composites Sandwichs;
8. Domaines d'application des matériaux composites

Avantages & Inconvénients