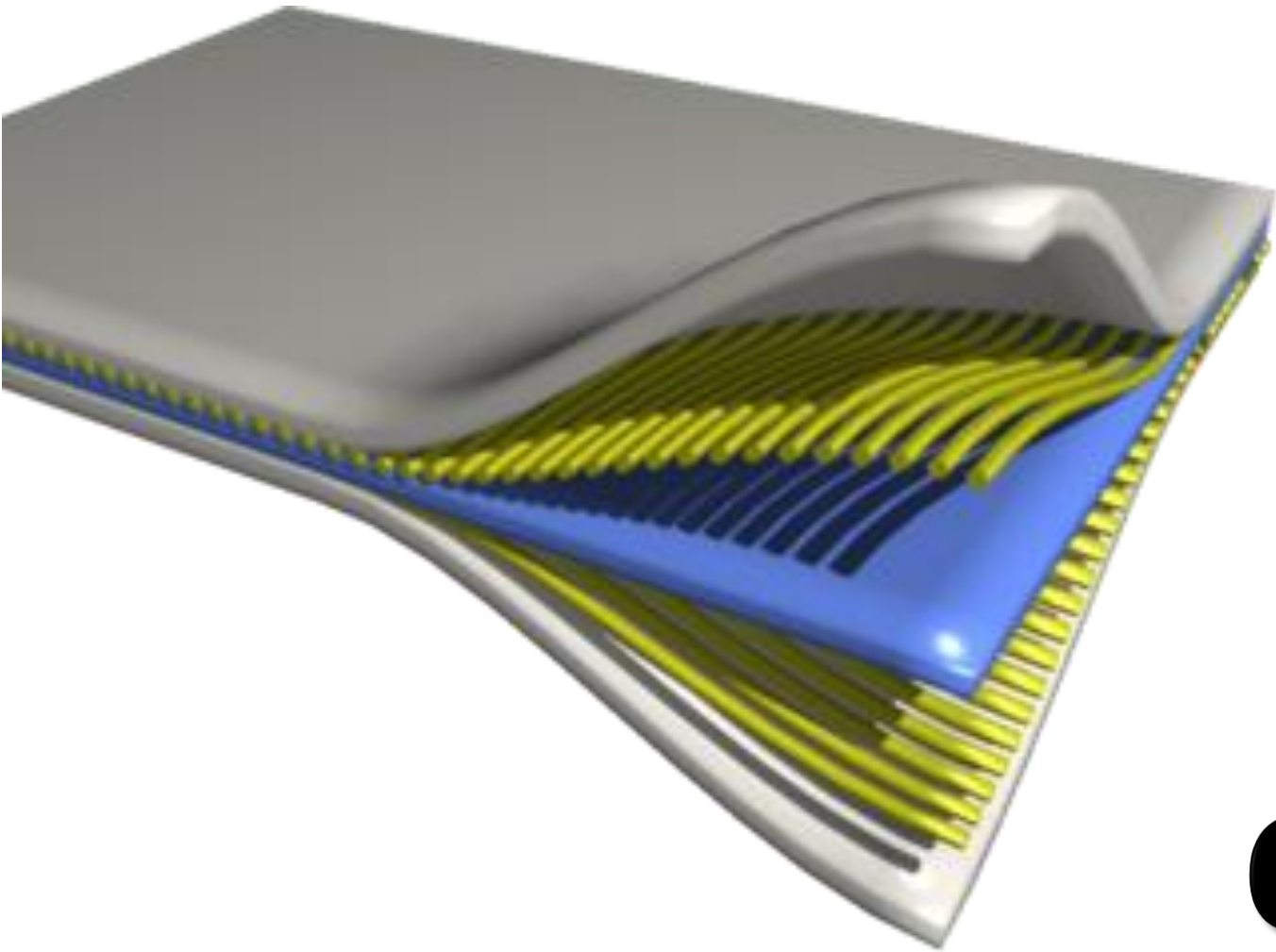




Les matériaux composites

DÉFINITION

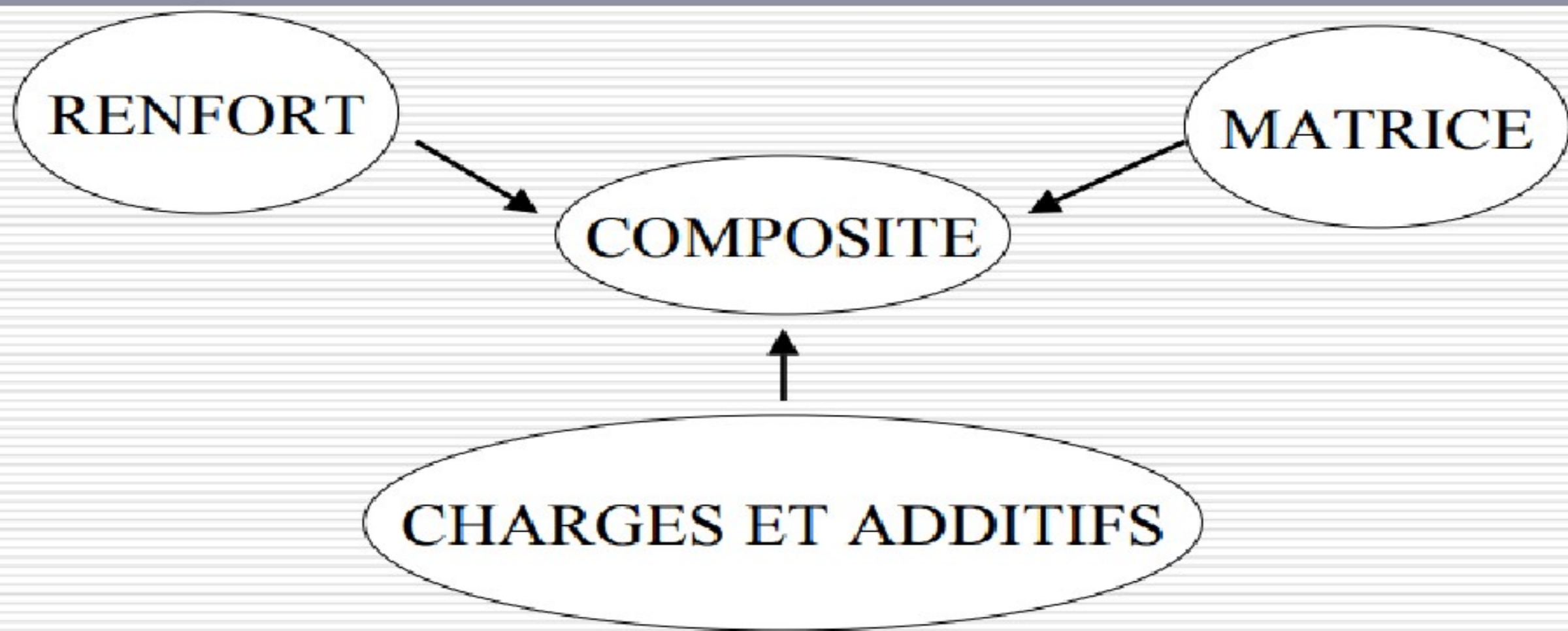
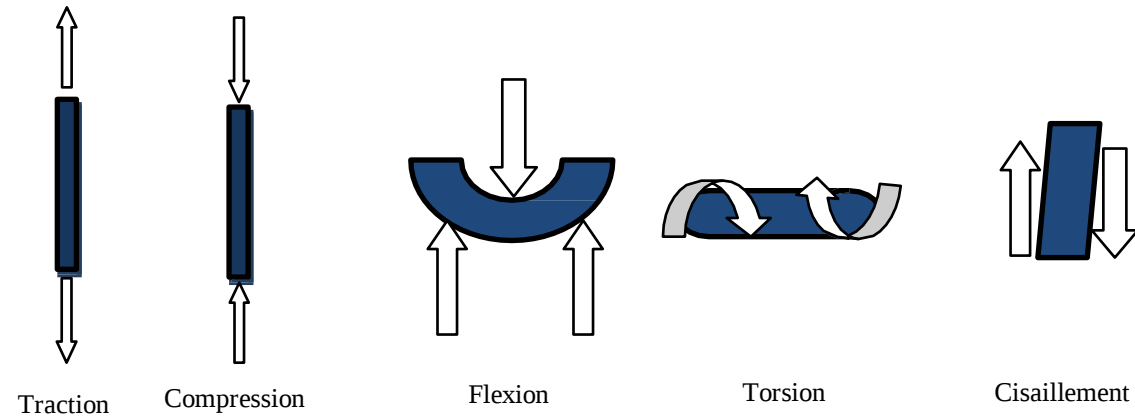
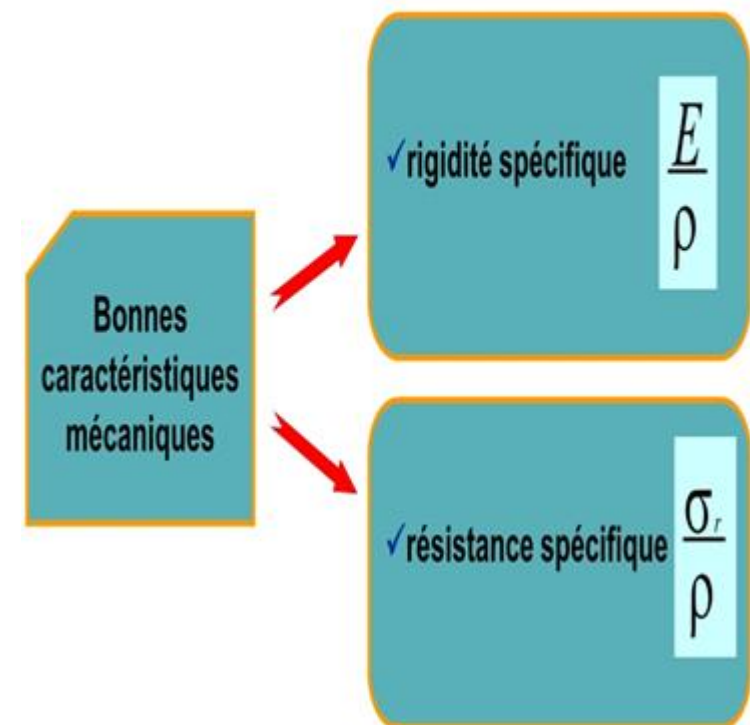


Figure : Différentes sollicitations mécaniques.



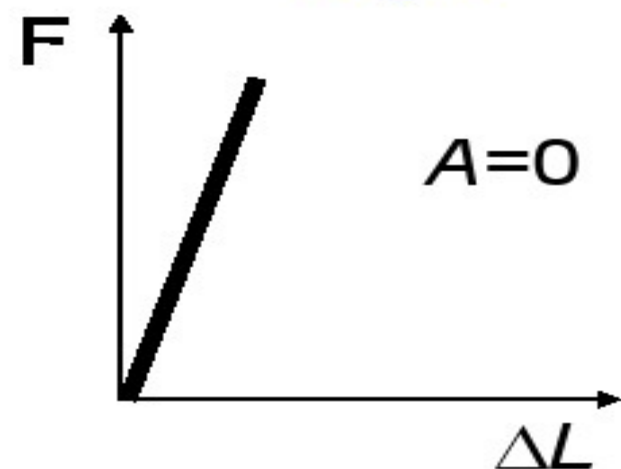
Indice de performance



CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Trois comportements possibles

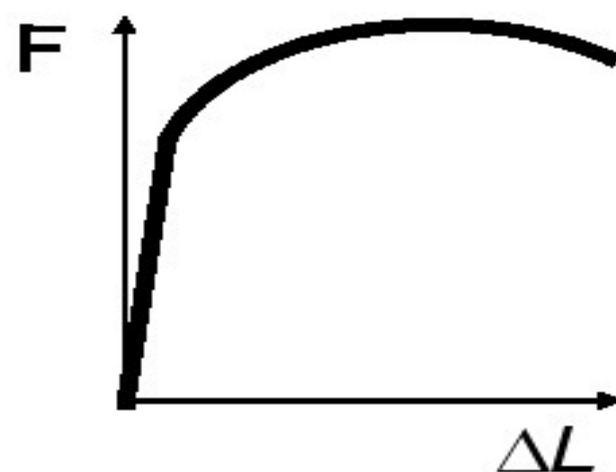
fragile



Pas de domaine
plastique

- verre
- céramique
- béton
- polymères
thermodurcissables

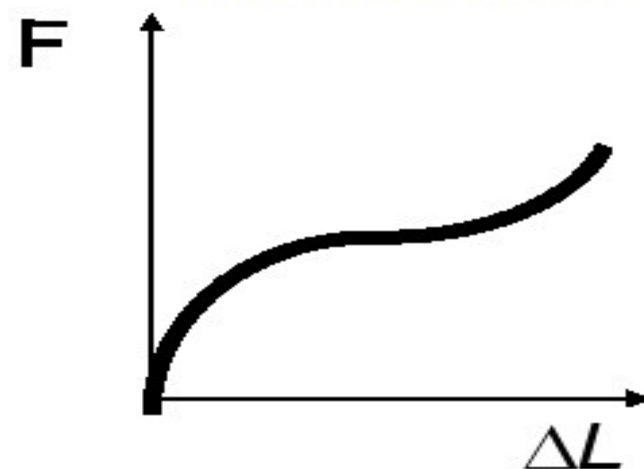
ductile



Déformation plastique
permanente

- métaux
- alliages
- polymères
thermoplastiques

non linéaire



Déformation élastique
non proportionnelle à
la charge

- caoutchouc
- élastomères..

Définitions

DANS LE DOMAINE ELASTIQUE

Pour une traction

$$\sigma = E \varepsilon$$

E : module d 'Young

ε : déformation longitudinale

Pour un cisaillement

$$\tau = G \gamma$$

G : module de cisaillement

γ : déformation en cisaillement

Un matériau idéal pour un cas ne l'est malheureusement pas dans l'autre cas.

**Plusieurs propriétés sont recherchées $\Rightarrow$ Création de matériaux composites
(béton armé, polymère avec fibres de verre, etc)**

C'est l'union qui fait la force



réalisation d'un matériau composite

Objectif : renforcer le matériau dans certaines directions
(et sans rajouter de masse ou de volume)

Moyen : ajouter des renforts dans une **matrice**

Renforts → particules ou fibres

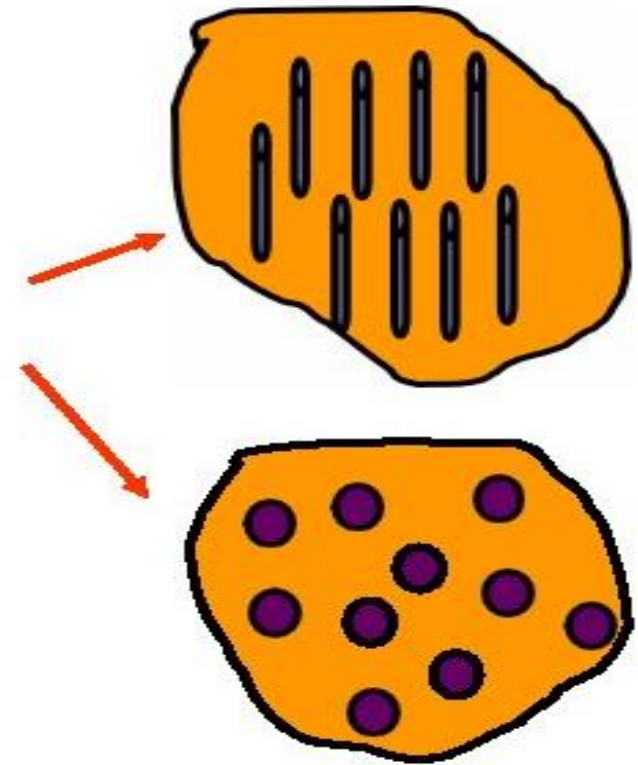


+



Lier les fibres de renforts,
Répartir les contraintes,
Protéger les renforts de
l'environnement
Donner la forme désirée
au produit final.

Améliorer les
propriétés de la
matrice



Composites

■ Notion de composite

- Mélange de constituants en vue d'obtenir des propriétés 'sur mesure' plus intéressantes que les propriétés individuelles des constituants

CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

Légende

- nombre de masse de l'isotope le plus abondant = nombre de nucléons
- masse molaire atomique en g.mol⁻¹
- symbole
- nom
- nombre atomique = nombre de protons

Période

Période	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
1	H Hydrogène 1,008	He Hélium 4,003																
2	Li Lithium 6,941	Be Béryllium 9,012											B Bore 10,811	C Carbone 12,011	N Azote 14,007	O Oxygène 15,999	F Fluor 18,998	Ne Neon 20,180
3	Na Sodium 22,990	Mg Magnésium 24,305											Al Aluminium 26,982	Si Silicium 28,086	P Phosphore 30,974	S Soufre 32,065	Cl Chlore 35,453	Ar Argon 39,948
4	K Potassium 39,098	Ca Calcium 40,078	Sc Scandium 44,956	Ti Titane 47,88	V Vanadium 50,942	Cr Chrome 51,996	Mn Manganèse 54,938	Fe Fer 55,845	Co Cobalt 58,933	Ni Nickel 58,693	Cu Cuivre 63,546	Zn Zinc 65,38	Ga Gallium 69,723	Ge Germanium 72,630	As Arsenic 74,922	Se Sélénium 78,96	Br Brome 79,904	Kr Krypton 83,80
5	Rb Rubidium 85,468	Sr Strontium 87,62	Y Yttrium 88,906	Zr Zirconium 91,224	Nb Niobium 92,906	Mo Molybdène 95,94	Tc Technetium 98,906	Ru Ruthénium 101,07	Rh Rhodium 102,905	Pd Paladium 106,905	Ag Argent 107,868	Cd Cadmium 112,411	In Indium 114,818	Sn Étain 118,710	Sb Antimoine 121,757	Te Tellure 127,6	I Iode 126,905	Xe Xénon 131,29
6	Cs Césium 132,905	Ba Baryum 137,327	La Lanthane 138,905	Hf Hafnium 178,49	Ta Tungstène 180,948	W Wolfram 183,84	Re Rhenium 186,207	Os Osmium 190,23	Ir Iridium 192,222	Pt Platine 195,084	Au Or 196,967	Hg Mercure 200,59	Tl Thallium 204,383	Pb Plomb 207,2	Bi Bismuth 208,98	Po Polonium 209	At Astatine 210	Rn Radon 222
7	Fr Francium 223	Ra Radium 226	Ac Actinium 227	Ku Kurchatovium 266	Ha Hassium 269													

Hydrogène
Métaux vrais
Métaux de transition
"Métalloïdes"
Non métaux
Gaz rares
Lanthanides
Transuraniens

Legend:
 (M) = Masse molaire atomique en g.mol⁻¹
 (Z) = Nombre atomique
 (S) = Symbole
 (N) = Nom

Notes:
 (P) = Période
 (G) = Gaz rare
 (L) = Lanthanide

Potentiellement, toutes les combinaisons de matériaux

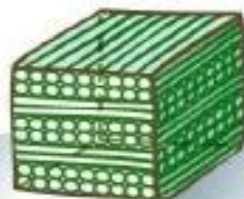
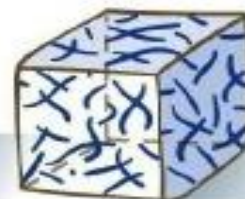
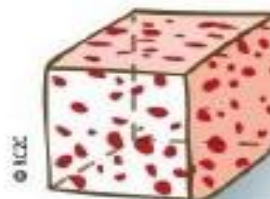


Formats des renforts

Composites à particules

Composites à fibres courtes

Composites stratifiés



Composite

=

Matrice

+

Renfort

Protège le renfort ;
Transmet les efforts
mécaniques au renfort ;
Donne la forme voulue
au produit réalisé

Généralement en matière plastique
(Thermoplastique / Thermodurcissable)

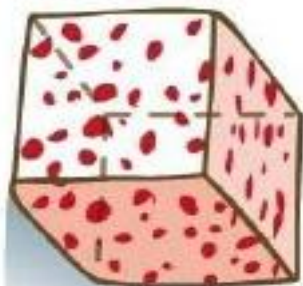
Ossature (ou « squelette »)
assurant la tenue mécanique

Généralement sous
forme de fibres
(longues / courtes)

Composites

■ « Multi-Architecture » du composite

© RC2C



Composites à particules

- **Matière** = Matrice métallique / céramique / polymère + particules céramiques / charges creuses
- **Mise en œuvre** = injection / coulage (+ frittage); fab. additive
- **Réalisations** = Sous-ensemble résistant aux températures et au frottement;
- **Secteurs** = transport, énergie, santé; Forte valeur ajoutée



NASA-space vehicle X-38



Composites à fibres courtes

- **Matière** = Matrice polymère avec fibres courtes de verre, de bois, ...
- **Mise en œuvre** = injection / compression
- **Réalisations** = Sous-ensemble peu travaillant;
- **Secteurs** = tous secteurs avec grandes séries; bon marché



Composites à fibres longues – stratifiés / tissés / tricotés

- **Matière** = Matrice polymère avec fibres longues hautes performances
- **Mise en œuvre** = injection / infusion
- **Réalisations** = Sous-ensemble fortement sollicités;
- **Secteurs** = transport, énergie, santé;
- **Forte valeur ajoutée**



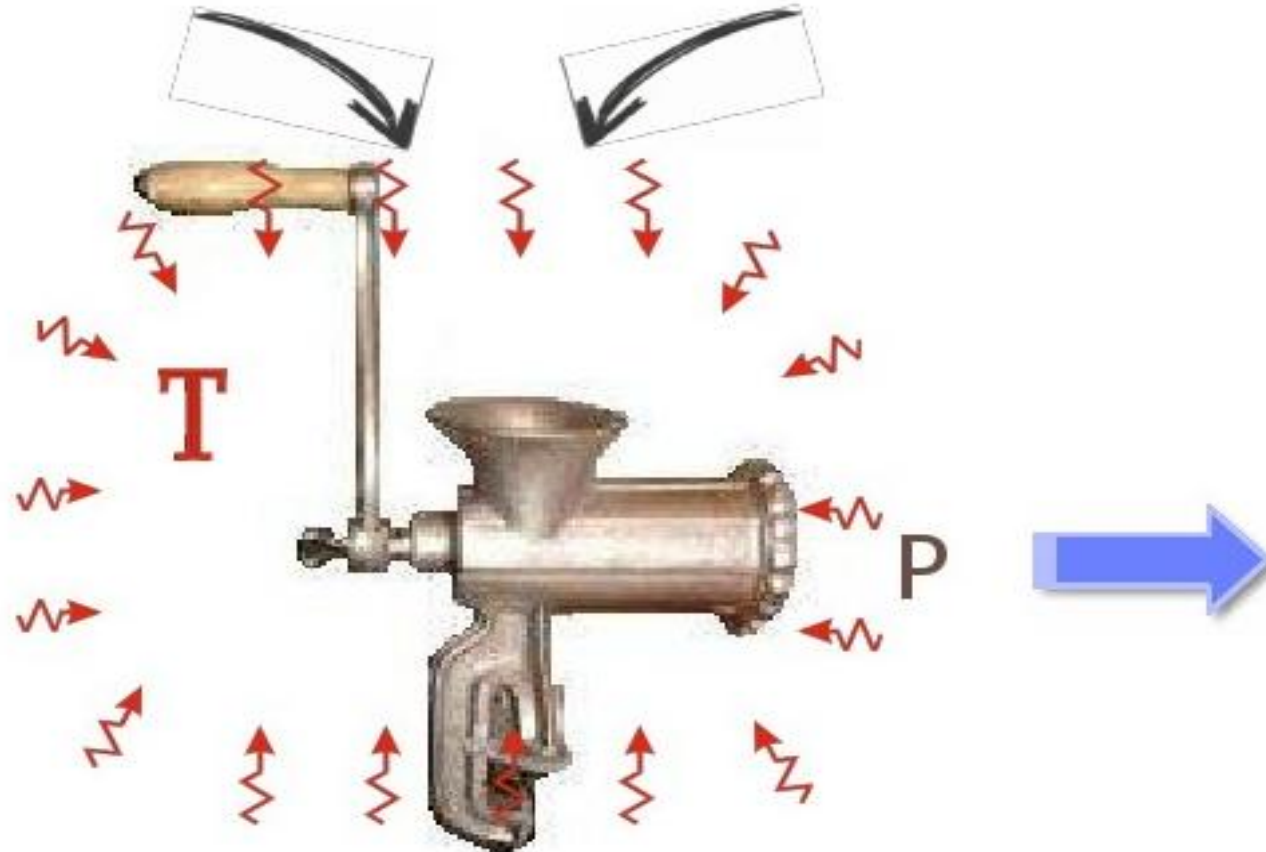
Composites = une *histoire d'échelle*



Liant



Renforts



Renfort: Ossature souvent filamenteuse à très hautes caractéristiques mécaniques, qui assure la tenue mécanique du composite.

Matrice: Phase continue qui assure la cohésion de la structure, transfère et répartit les contraintes et protège les renforts des agressions extérieures.

Charges et additifs : adhérence fibre/matrice, pigments de coloration, ...

Matériaux composites

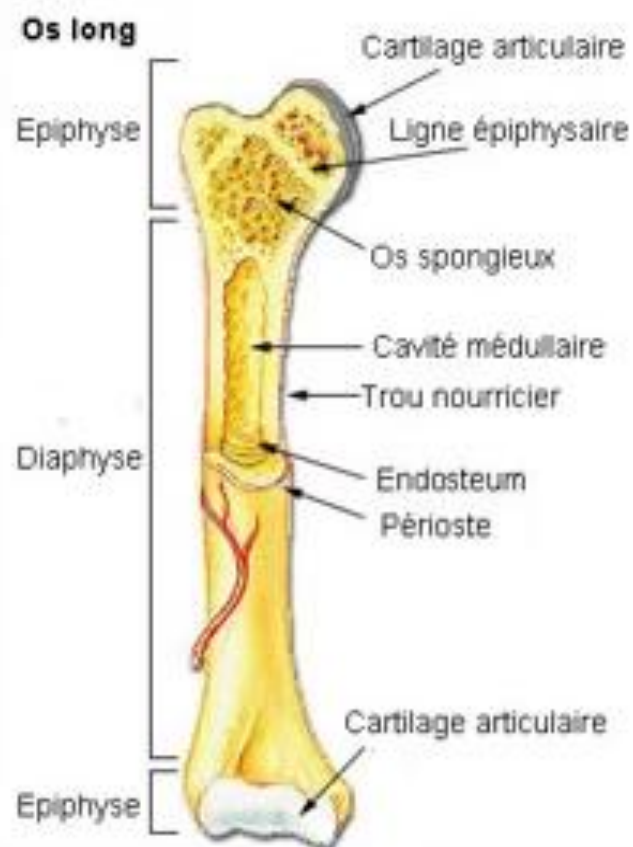
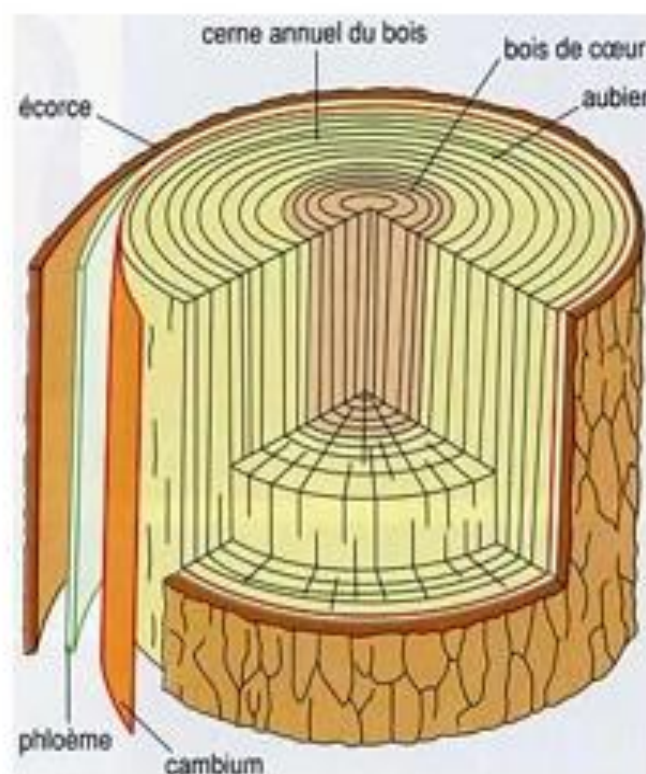
```
graph TD; A([Matériaux composites]) --> B([Naturels]); A --> C([Artificiels]);
```

The diagram illustrates the classification of composite materials. At the top, a light blue oval with an orange border contains the text 'Matériaux composites'. Two green arrows point downwards from this oval to two separate white ovals with black borders. The left oval contains the word 'Naturels' in green text, and the right oval contains the word 'Artificiels' in blue text.

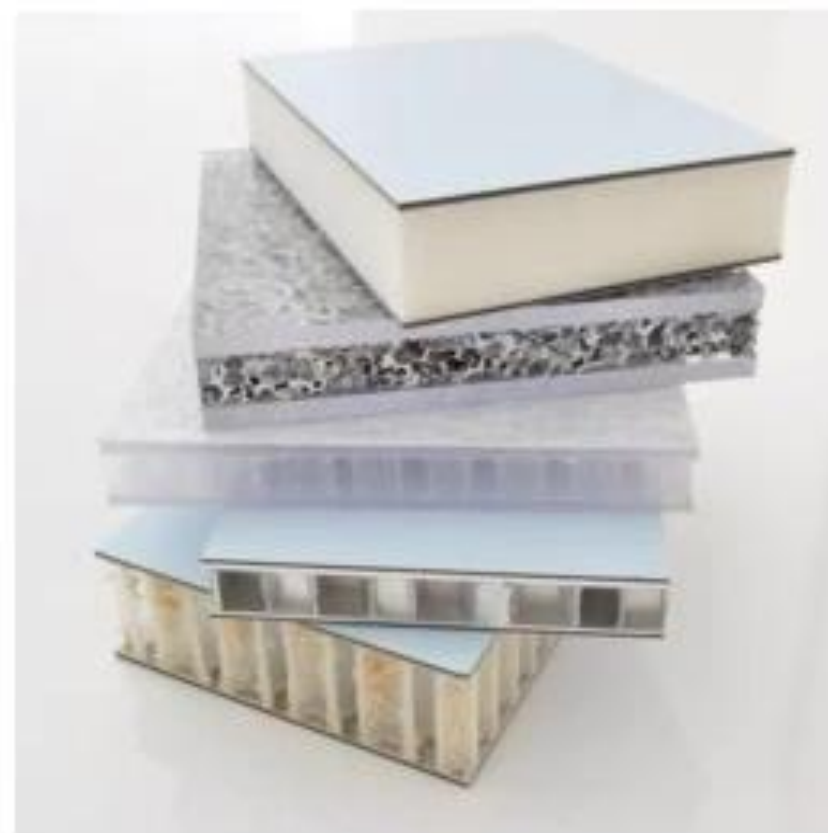
Naturels

Artificiels

Les composites



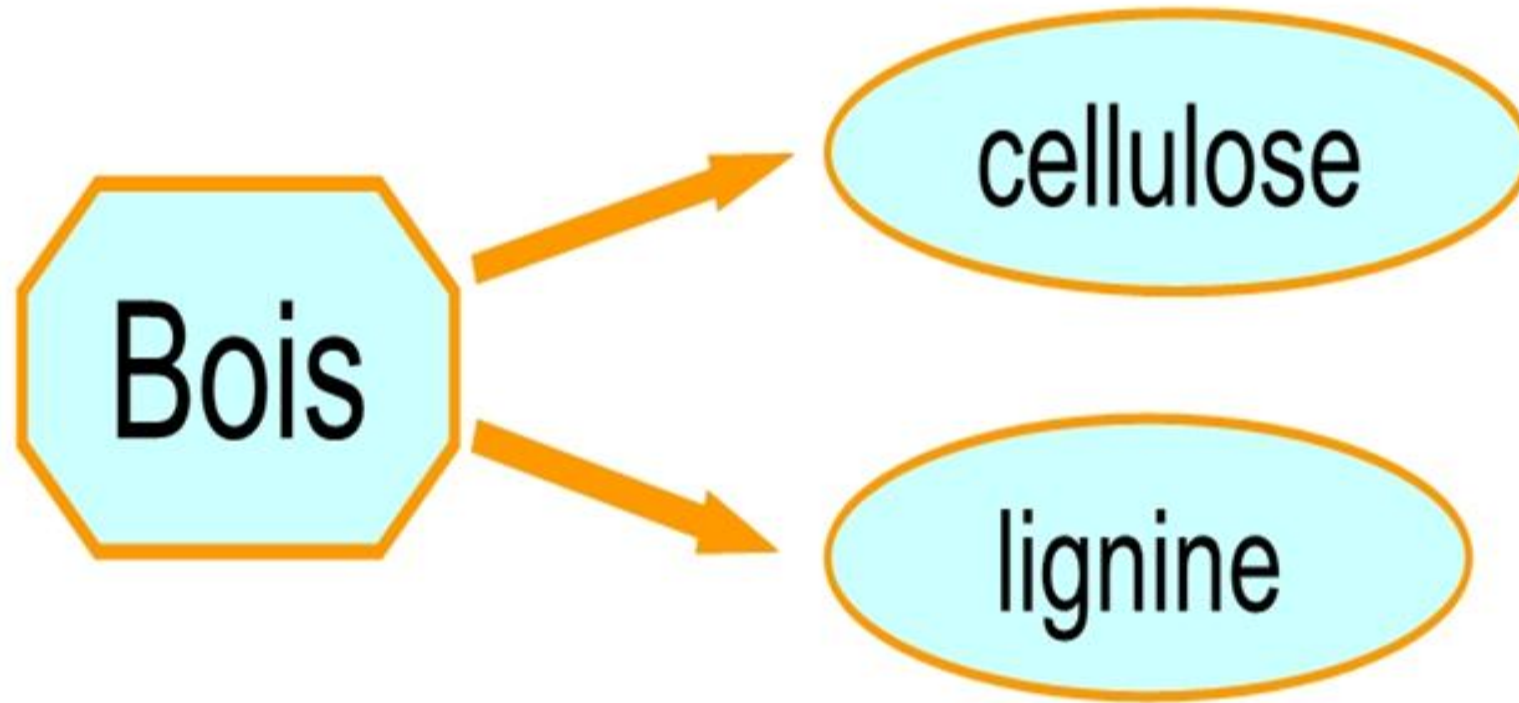
Composites naturels



Composites synthétiques

- Le bois

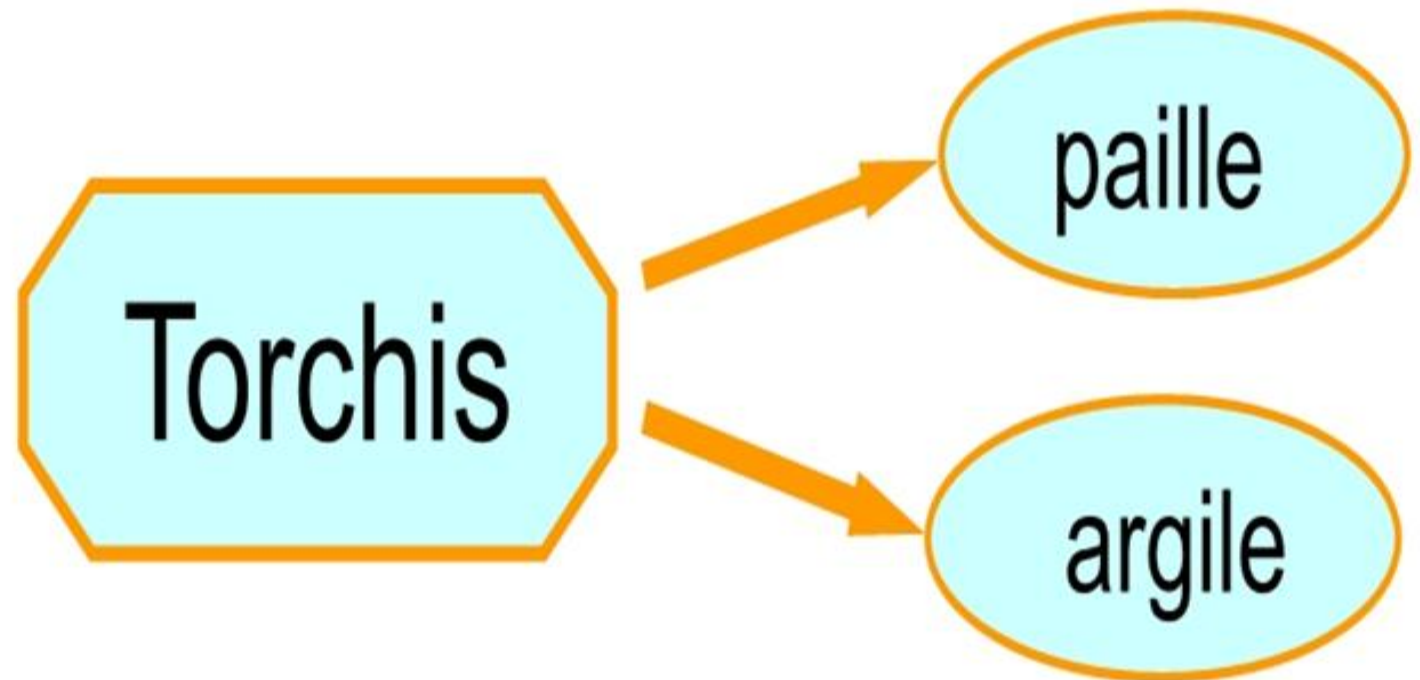
⇒ Le bois est un matériau composite à base d'une matrice en lignine et de renforts en fibre de cellulose.





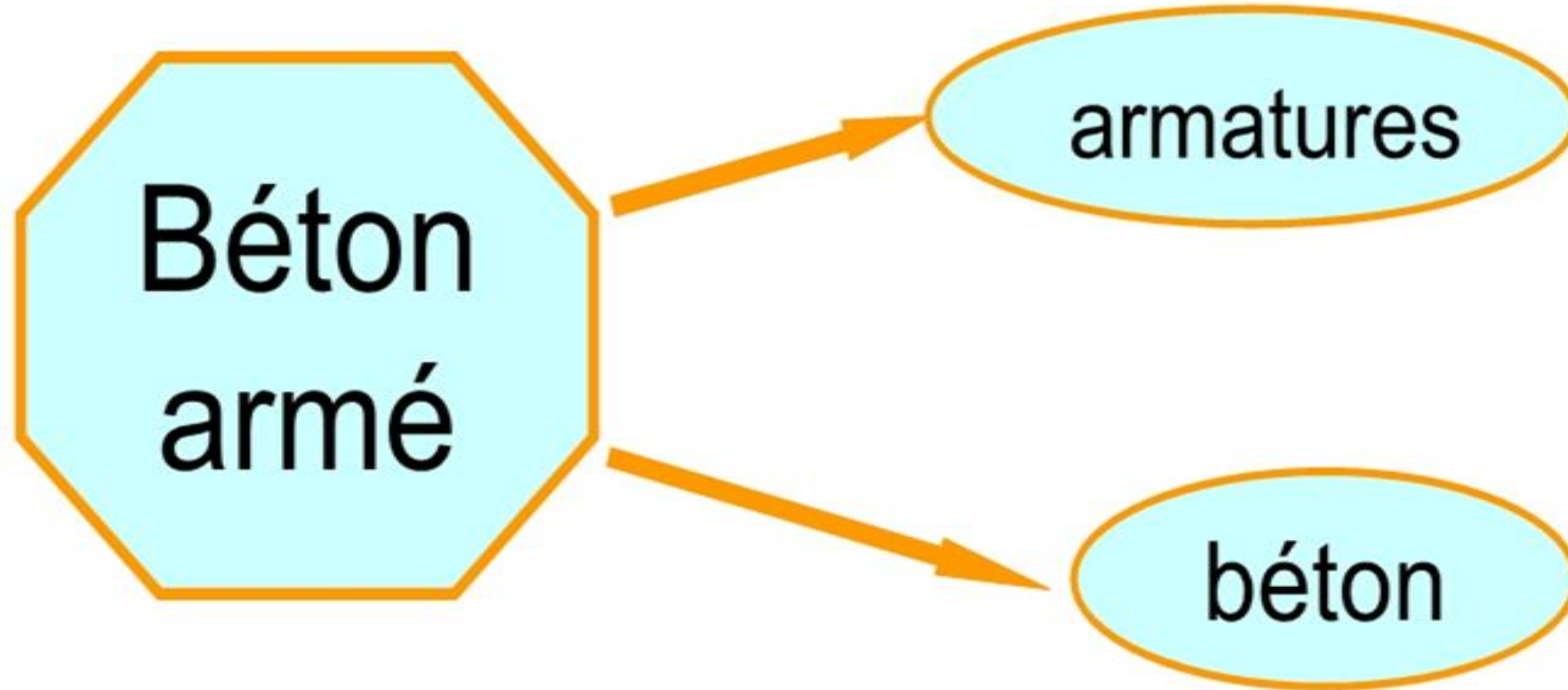
• Le torchis: matériau d'hier

⇒ Le torchis est considéré comme le 1er matériau composite de l'histoire; il est composé d'une matrice plastique argile (terre) et de renforts (paille). Le torchis était le matériau de construction d'habitation, techniquement répandue dans beaucoup de pays de sud.



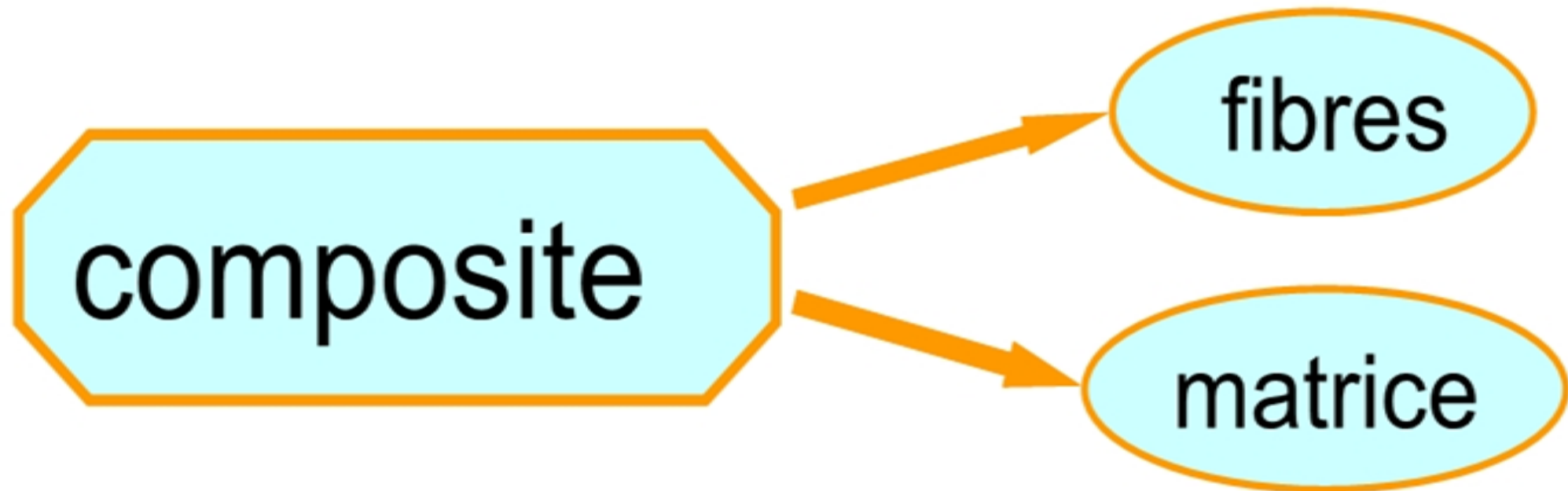
• Le béton armé: matériau d'aujourd'hui

⇒ Le béton armé est un matériau composite constitué de ciment et de barres d'acier; Il est utilisé comme matériau de construction, notamment pour le génie civil.



- **Matériau composite (MC)**

⇒ Un MC est une association de deux ou plusieurs phases solides dont l'union forme un matériau plus performant. Le MC que nous allons étudier est à base de fibres (continues ou discontinues) noyées dans une matrice résineuse.

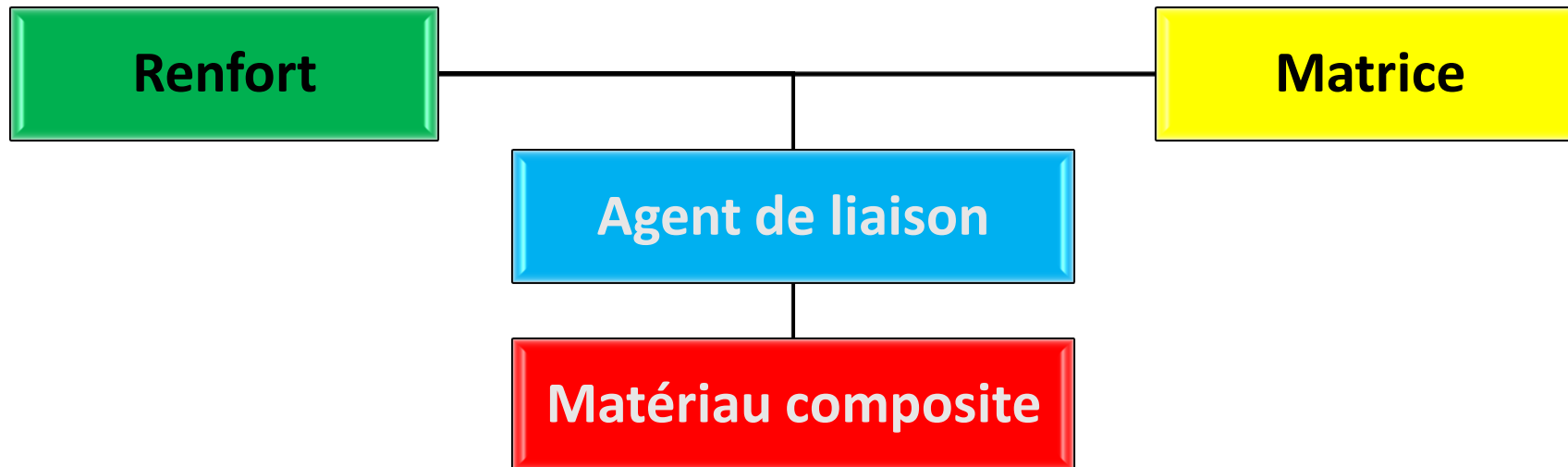


1. Un composites... c'est quoi ?

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux ou plusieurs matériaux (métalliques, minéraux et organiques), pour obtenir une combinaison de propriétés à partir des ces matériaux.

2. Composition d'un matériau composite:

La composition d'un matériau composite est à la base d'au moins deux composants: **le renfort** et la **matrice**, qui doivent être **compatibles** entre eux, ce qui nécessite l'introduction d'un **agent de liaison** à l'interface.



• Les fibres (renforts)

⇒ Parmi les fibres artificiels, on peut citer:

- Les fibres de verre
- Les fibres de carbone
- Les fibres d'aramide (kevlar nomination commerciale)
- Les fibres de bore

⇒ Parmi les fibres végétales (écologiques), on peut citer:

- Les fibres de chanvre
- Les fibres de lin

• Les matrices

⇒ Parmi les matrices organiques couramment employés, on peut citer:

Résines thermodurcissables

- époxy
- polyester insaturé (PU)
- vinylester
- polyuréthane (PUR)
- résine phénolique
- résine acrylique

Résines thermoplastiques

- polypropylène (PP)
- polyester thermoplastique (PET, PBT)
- polyamide (PA)
- polyétheréthercétones (PEEK)
- sulfure de polyphénylène (PPS)
- polyéther-imide (PEI)

⇒ Parmi les matrices métalliques, on peut citer:

- Aluminium
- Magnésium
- Zinc
- ...

composites

matrice

renfort

organique

résine phénolique
" apoxyde
" polyester
" polymide
" époxyde
" polysulfone
élastomère
.....

métallique

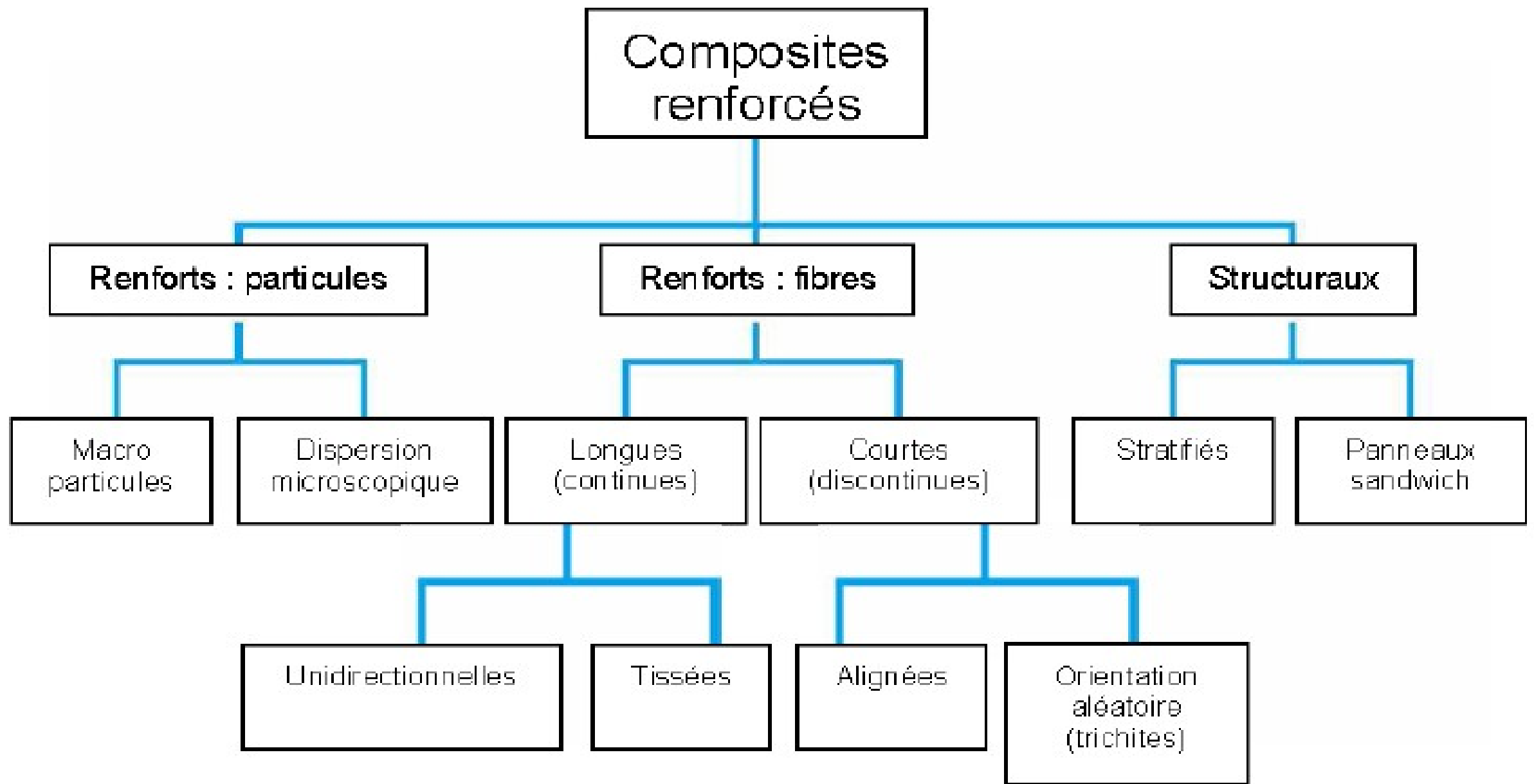
magnésium
aluminium
titane
.....

céramique minérale

carbone
graphite
carbure
silice
alumine
.....

verre
aramide
carbone
métaux
carbure
alumine
silice
bore
.....

fil
tissus
fils coupés
(whiskers)
poudre
armature
.....



Architecture du renfort dans les composites renforcés

(a)



chanvre



jute



sisal



coton



coco



lin

(b)



chanvre



jute



sisal



coton



coco



lin

Fibres naturelles végétales : (a) origine – (b) produit fini tissé



Cotton



Lin



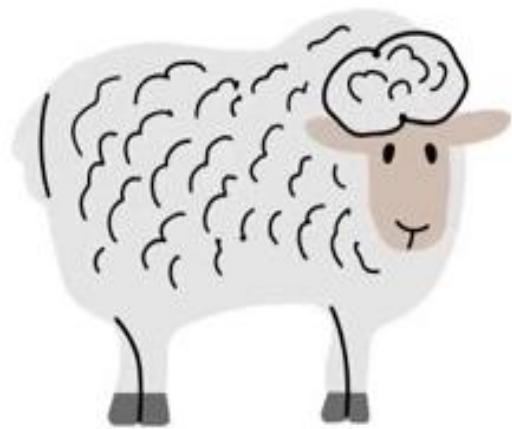
Chanvre



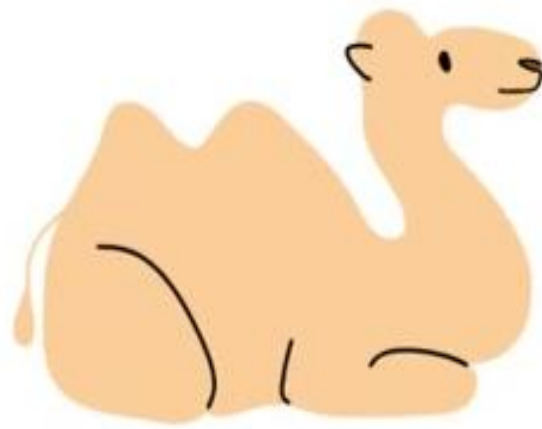
Soie



Angora



Mouton



Chameau



Cachemire

Fibres et filaments

Fibres naturelles
(d'origine végétales ou animale)



Coton



Lin



Chanvre



Soie



Angora



Mouton



Chameau



Famille des Alpagas/Lamas



Cochemire

Fibres chimiques
(d'origine artificielle)



Bambou



Bois

Viscose
(Rayonne)

Lyocell
(Tencel)

Cupro

Modal

Fibres chimiques
(d'origine synthétique)



Polyester

Nylon

Acrylique

Elasthanne
(Lycra/Spandex)

Fils textiles



Tissus



Velour

Oxford

Tartan

Tricot Brossé
(Polar)

Flanelle

Dentelle

Les raisons de l'utilisation des composites

Le développement des composites modernes est dû essentiellement aux besoins de plus en plus poussés de l'industrie, surtout dans les secteurs :

- Aérospatial
- Aéronautique
- Défense
- Sport
- Biomécanique

Dans tous ces secteurs les impératifs de **légèreté**, **rigidité** et **résistance** rendent les composites indispensables

Qu'est-ce que c'est qu'un matériau composite?

- **Composite** : matériau composé de l'union d'au moins deux matériaux constituants (les phases), généralement distingués en :
 - **Matrices**
 - **Fibres**
 - **Charges**
- Caractéristiques mécaniques fondamentales des composites sont:
 - **L'hétérogénéité**
 - **L'anisotropie** (*pas toujours*)
- Les composites sont employés depuis longtemps : briques en argile et paille, arcs en bois et tendons d'animaux, épées en alliages différents...

Exemples typiques de composites

Classe	Exemple	Composantes	Applications
Composites à matrice organique	carton pneus stratifiés	cellulose caoutchouc, acier résines organiques, fibres de verre, carbone, bore etc.	emballages etc. transports structures légères
	plastiques renforcées	résines, fibres courtes	diverses
Composites à matrice minérale	béton	ciment, sable, additifs	génie civil
	composites C-C composites céramiques	C, fibres de C céramiques et fibres céramiques	aérospatial, aviation, sport, biomécanique composantes thermomécaniques
Composites à matrice métallique		Al/fibres de B Al/fibres de C	aérospatial
Alliages	aciers Alliages d'Al cuivres	C, Fe, Mn, Cr, Al, Cu, Sn etc.	diverses

Les concepts clés des composites

- Réunir en un seul deux ou plusieurs matériaux à caractéristiques différentes, qui n'ont pas, séparés, des caractéristiques de valeur, mais qui ensemble forment un matériau avec des propriétés importantes: **c'est l'union qui fait la force!**
- Les fibres utilisées comme renfort ont des propriétés mécaniques **nettement meilleures** (résistance et rigidité) du même matériau en forme massive: la diminution des dimensions caractéristiques implique, souvent, une amélioration des prestations mécaniques car la fibre a, par le procédé de fabrication, **une structure plus parfaite du matériau massif** et parce que **la probabilité de trouver des défauts importants diminue avec les dimensions**

Les raisons de l'utilisation des composites

- Le développement des composites modernes est dû essentiellement aux besoins de plus en plus poussés de l'industrie, surtout dans les secteurs
 - Aérospatial
 - Aéronautique
 - Défense
 - Sport
 - Biomécanique
- Dans tous ces secteurs les impératifs de **légèreté, rigidité et résistance** rendent les composites indispensables

Types de matériaux composites structuraux

- **Composites à fibres courtes** : fibres dispersées dans une matrice isotrope, généralement sans orientation préférentielle; comportement macroscopique **isotrope**
- **Composites à fibres longues** : fibres longues noyées dans une matrice isotrope avec orientation établie; comportement macroscopique **anisotrope**
- **Stratifiés** : superposition de plis en composite diversement orientés; **le comportement macroscopique doit être conçu selon les besoins**
- **Sandwiches**: panneaux ou coques conçus pour des sollicitation de flexion; généralement, le comportement dans le plan est **isotrope**

Constituants principaux des composites à matrice organique

- **Matrices:**

- Résines époxydiques
- Résines polyuréthanes
- Résines polyamides
- Résine phénoliques

- **Fibres:**

- Verre
- Carbone
- Bore
- Kevlar (aramide)

Qualités générales des composites

- **Les qualités principales sont :**
 - Légèreté
 - Résistance
 - Rigidité
 - Bon comportement à la fatigue
 - Possibilité de concevoir le matériau selon la nécessité
- **Les défauts principaux sont :**
 - Sensibilité aux agents atmosphériques (rayons UV, humidité, température)
 - Faible tenue au feu
 - Coût
- Les paramètres synthétiques d'évaluation des performances mécaniques d'un composite sont les rapports **E/ρ** et **σ_{lim}/ρ**

Produits industriels de base

- **Fibres**
- **Tissus**
- **Plis pré-imprégnés**
- **Stratifiés**
- **Sandwiches**

Données typiques

	Materiau	ρ	E	σ_u	E/ ρ (A)	σ_u/ρ (B)	ρ/ρ_{ac}	E/E _{ac}	$\sigma_u/\sigma_{u\ ac}$	A/A _{ac}	B/B _{ac}
		kg/m ³	MPa	MPa	MN m/kg	kN m/kg					
Forme massive	Acier	7850	210000	360	26,75	45,86	1	1	0,171	1	1
	Acier haute rés.	7850	210000	2100	26,75	267,52	1	1	1,000	1	5,83
	Alliages d'Al	2700	70000	620	25,93	229,63	0,34	0,33	0,295	0,97	5,01
	Bois	500	30000	15	60,00	30,00	0,06	0,14	0,007	2,24	0,65
	Verre	2500	70000	2100	28,00	840,00	0,32	0,33	1,000	1,05	18,32
	Tungstène	19300	350000	4100	18,13	212,44	2,46	1,67	1,952	0,68	4,63
	Berillium	1830	300000	700	163,93	382,51	0,23	1,43	0,333	6,13	8,34
	Tytane	4610	115000	1900	24,95	412,15	0,59	0,55	0,905	0,93	8,99
Fibres	Verre E	2540	72400	3500	28,50	1377,95	0,32	0,34	1,667	1,07	30,05
	Verre S	2480	85500	4600	34,48	1854,84	0,32	0,41	2,190	1,29	40,45
	Carbone	1380	190000	1700	137,68	1231,88	0,18	0,90	0,810	5,15	26,86
	Carbone HM	1900	390000	2100	205,26	1105,26	0,24	1,86	1,000	7,67	24,10
	Carbone HR	1850	240000	3500	129,73	1891,89	0,24	1,14	1,667	4,85	41,25
	Kevlar	1500	130000	2800	86,67	1866,67	0,19	0,62	1,333	3,24	40,70
	Bore	2630	385000	2800	146,39	1064,64	0,34	1,83	1,333	5,47	23,22
	Berillium	1830	300000	1700	163,93	928,96	0,23	1,43	0,810	6,13	20,26
Matrices	Polyester	1200	3000	80	2,50	66,67	0,15	0,01	0,038	0,09	1,45
	Phénoliques	1200	3000	60	2,50	50,00	0,15	0,01	0,029	0,09	1,09
	Epoxydes	1500	5000	100	3,33	66,67	0,19	0,02	0,048	0,12	1,45
	Polyamides	1140	2500	85	2,19	74,56	0,15	0,01	0,040	0,08	1,63

Constituants des matériaux composites :

Les matériaux composites sont constitués principalement :
d'une matrice, d'une charge, d'un renfort et d'une interface.

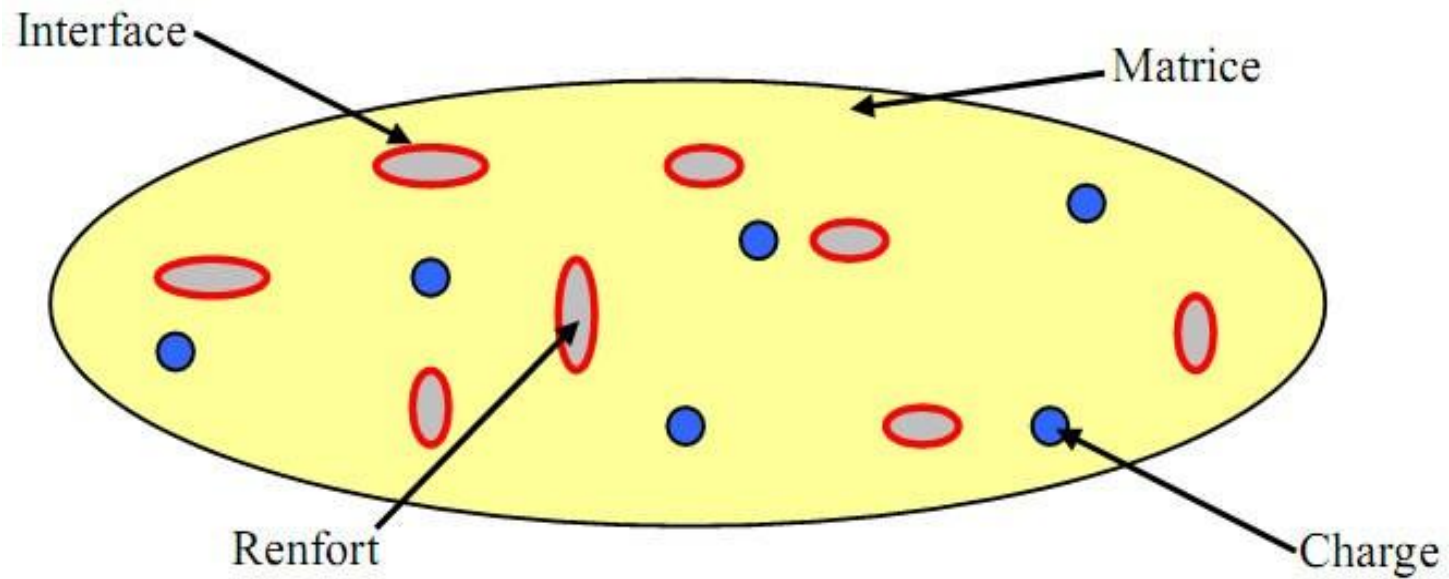
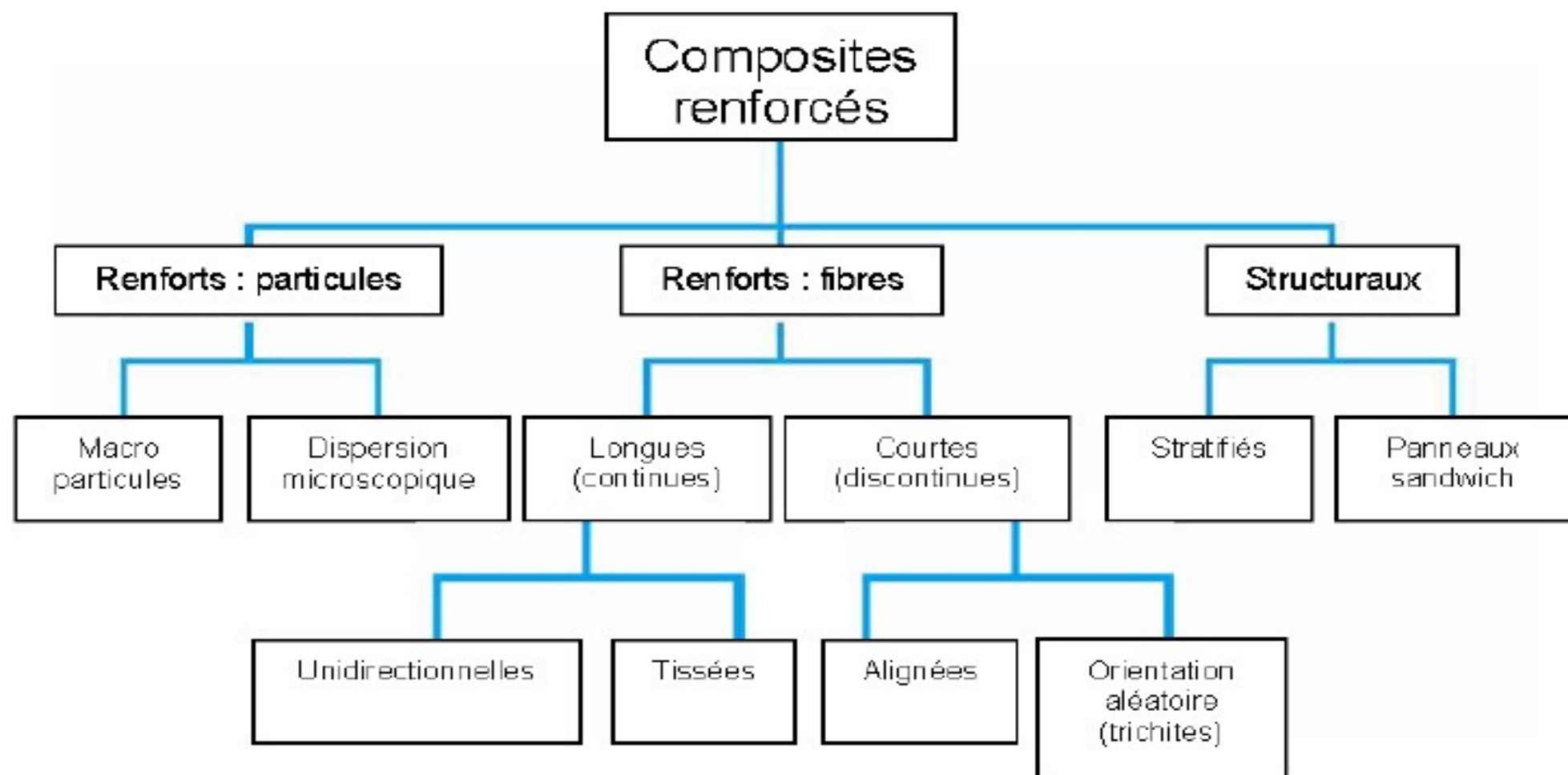


Figure : matériau composite

Classification selon le renfort :

mode de classification des composites : particules, fibres ou assemblages de composites renforcés.



Architecture du renfort dans les composites renforcés

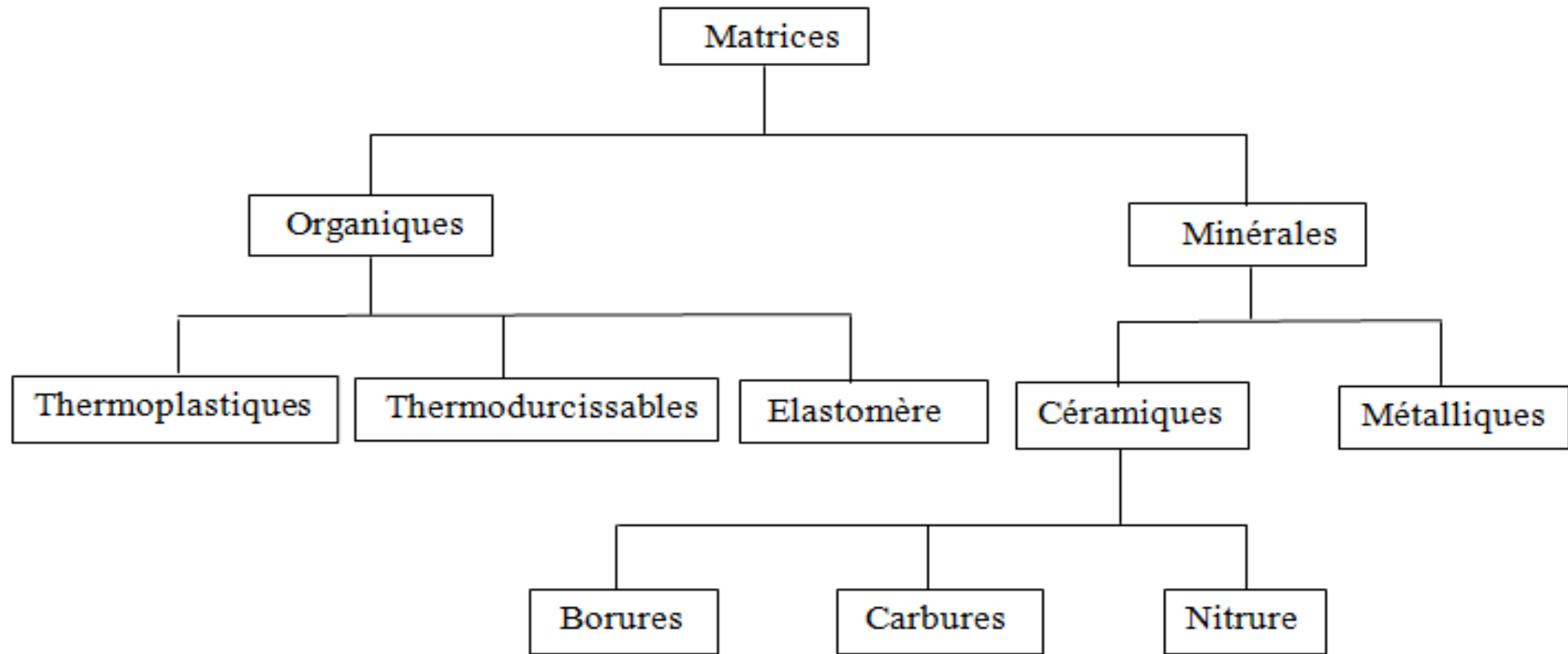


Figure : Différentes familles de matrices

Matrices	Thermoplastiques	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	difficile	Aisée
Moulage	Chauffage+refroidissement	Chauffage continu
Cycle	long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	réduite	Meilleure
Chute et déchets	recyclables	Perdus

Tableau : Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques

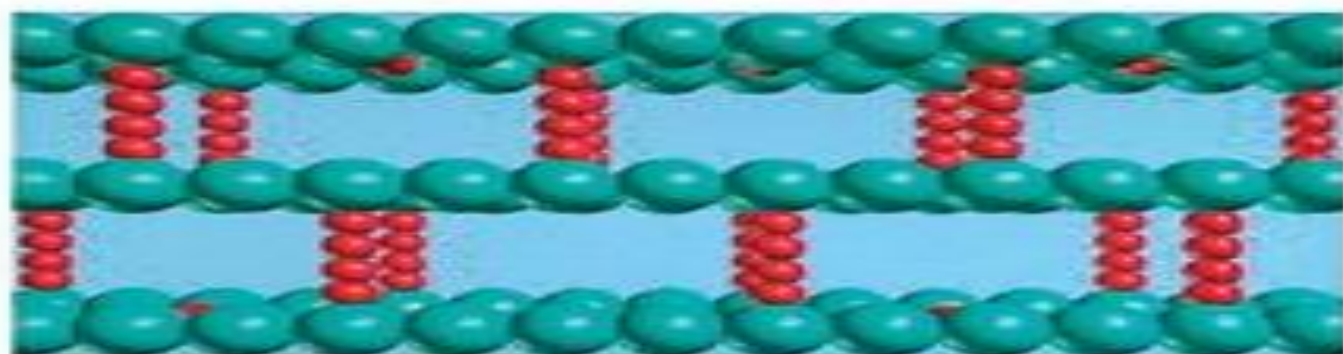
LES THERMODURCISSABLES



**Liquide visqueux
Poudre**

**Durcissent par apport de chaleur et ne
ramollissent jamais.**

**La transformation est exothermique et
irréversible**



Structure moléculaire tridimensionnelle

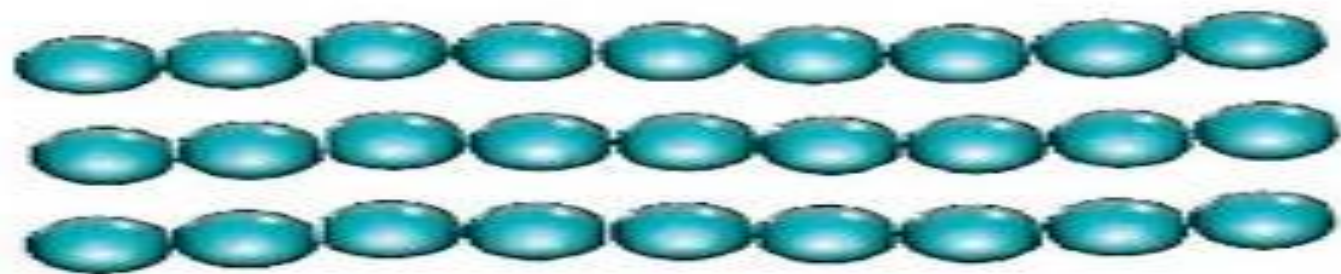
LES THERMOPLASTIQUES



**Granulés
Poudre
Plaque**

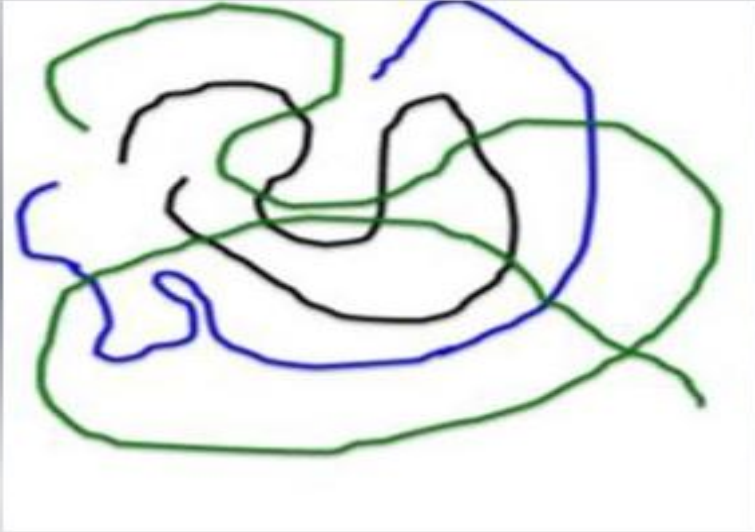
**Se ramollissent sous l'effet de la chaleur
et deviennent malléables.**

**Se figent après refroidissement
La transformation est réversible**

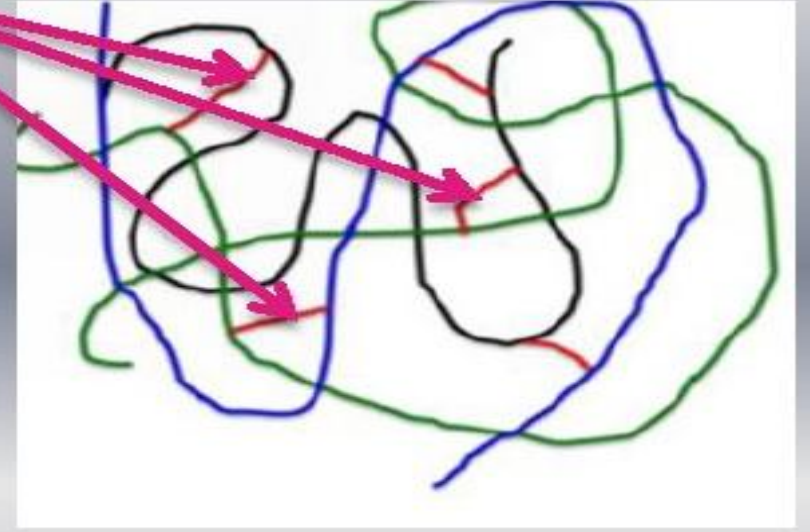


Structure moléculaire linéaire

Ponts entre chaînes

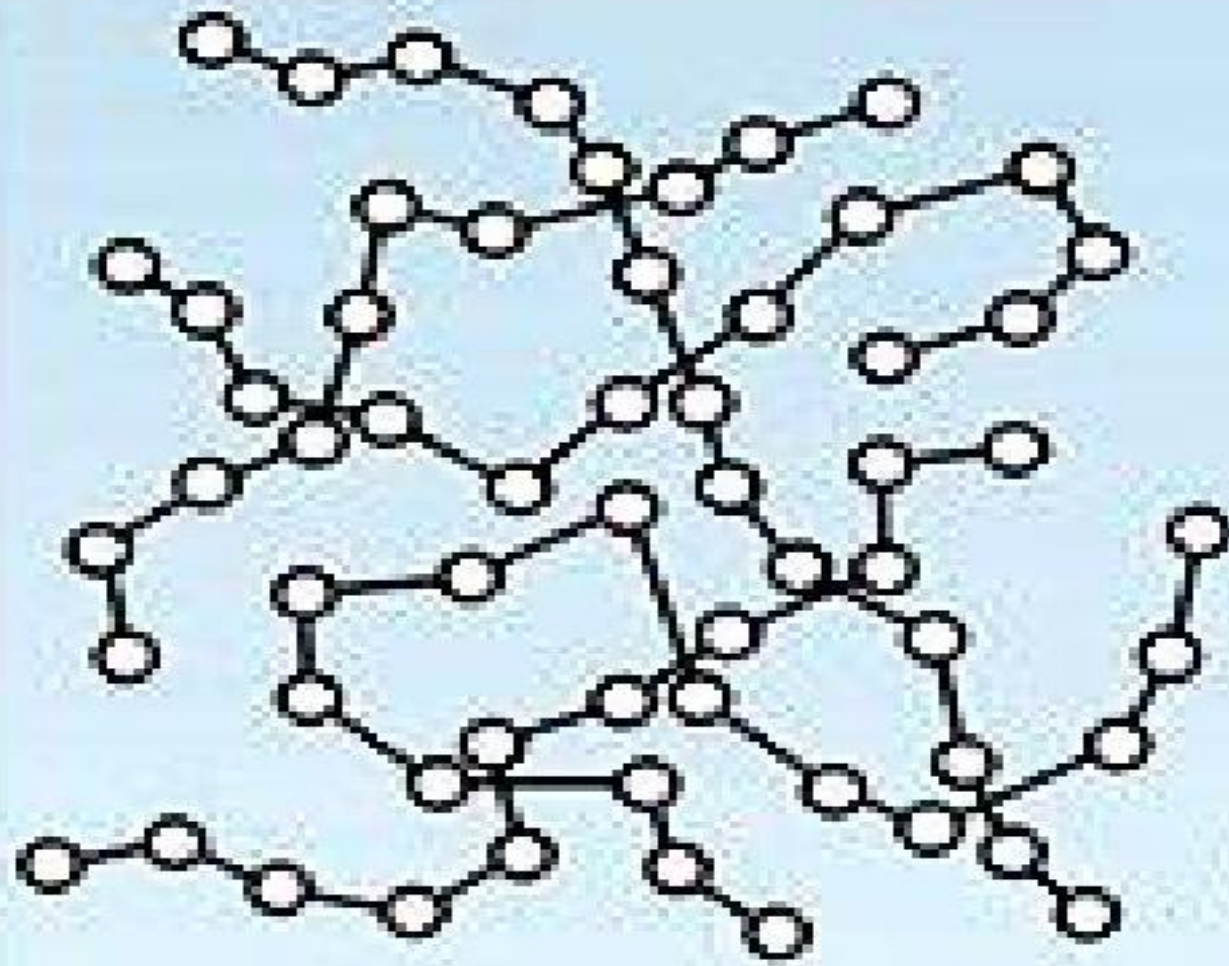


Thermoplastique: chaînes indépendantes

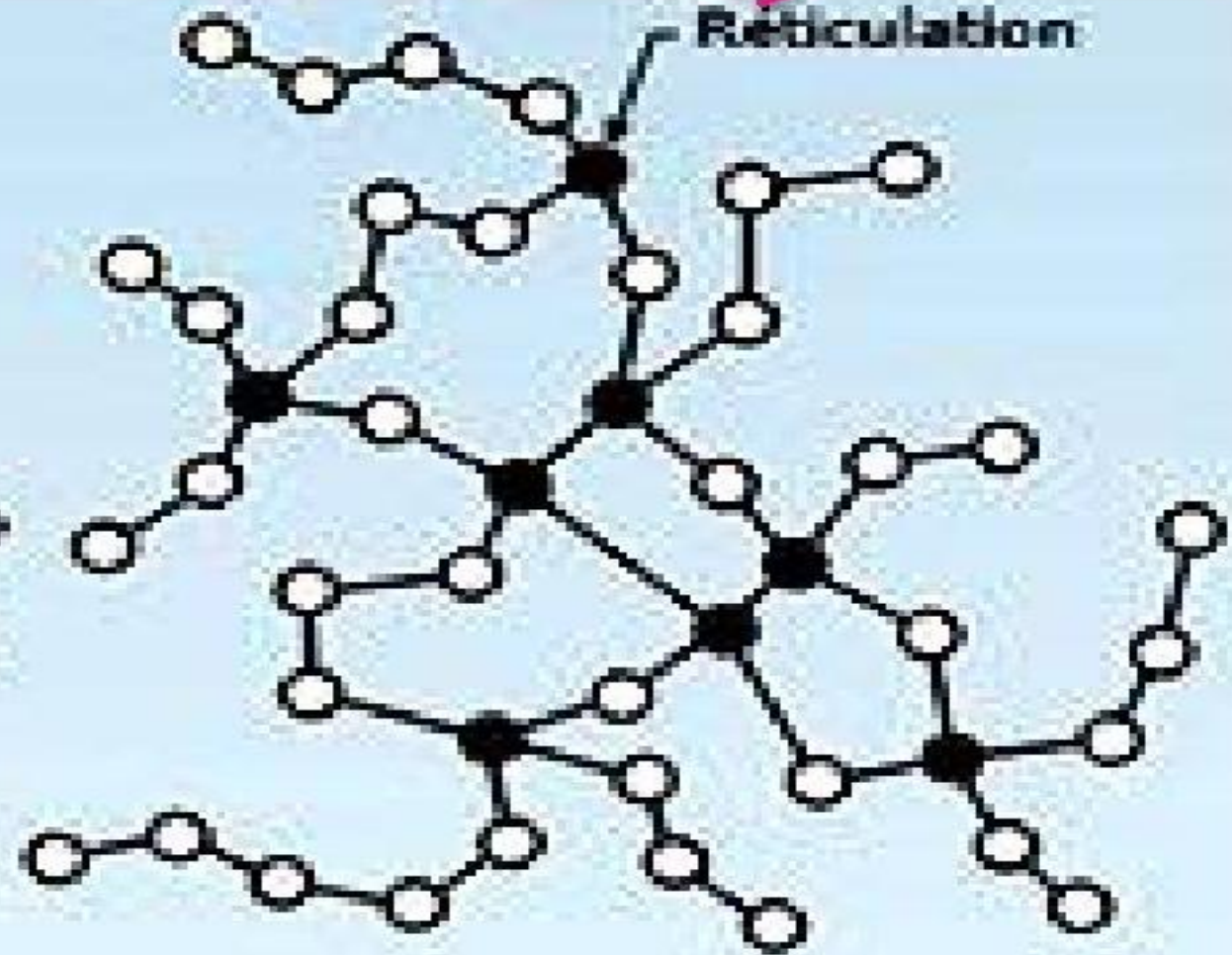


Thermodurcissable: En réseau





(a) Thermoplastique



(b) Thermodurcissable

La réticulation détermine de nombreuses caractéristiques des plastiques thermodurcissables.

Elle les rend solides, dimensionnellement stables et très résistants à la chaleur et aux produits chimiques .

Les moules souples en silicone alimentaire en sont un exemple.



Renfort: Ossature souvent filamenteuse à très hautes caractéristiques mécaniques, qui assure la tenue mécanique du composite.

Matrice: Phase continue qui assure la cohésion de la structure, transfère et répartit les contraintes et protège les renforts des agressions extérieures.

Charges et additifs : adhérence fibre/matrice, pigments de coloration, ...

Matrices

Thermodurcissable : polyester,
epoxyde, phénolique...
Thermoplastique : PE, PP, PA

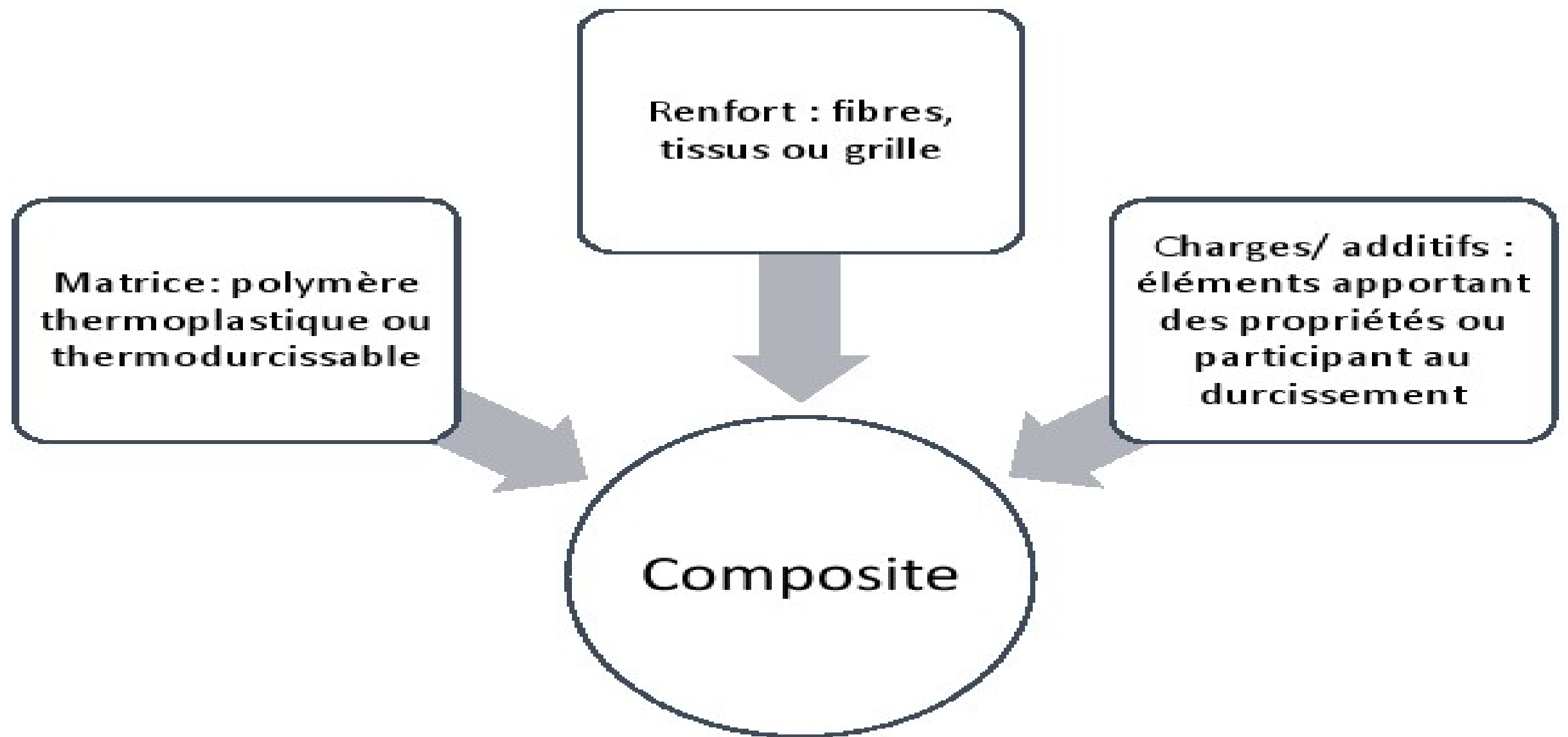
Renforts

Verre, carbone, aramide,
chanvre, lin...

Matériaux composites

Adjuvants

Charges : craie, silice... jouent sur les paramètres du matériau
Additifs : catalyseurs, accélérateurs, agent de démoulage jouent
sur le déroulement de la transformation



Composition d'un matériau composite

	influencent	améliorent
Les charges	- l'aspect du produit - la viscosité - la densité - l'opacité - le temps de gel - le prix de revient	- la résistance à l'humidité - la résistance aux agents chimiques - la résistance au feu - la résistance à la chaleur - la résistance aux chocs

LES CHARGES

Toute substance inerte, minérale ou végétale laquelle, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés du composite.

Types de charges:

- charges sphériques (microbilles en verre, microbilles en carbone, microbilles organiques,...)
- charges non sphériques (mica, carbonates, silicates, silices,...)

LES ADDITIFS OU ADJUVANTS

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur.

La polymérisation :

La polymérisation désigne une réaction chimique, fonction du temps et de la température, conduisant la matrice ou la résine à se solidifier de manière irréversible (valable uniquement pour les thermodurcissables).

La courbe ci-joint représente les stades A, B et C qui désignent les différents états d'une résine (ou d'un système) thermodurcissable.

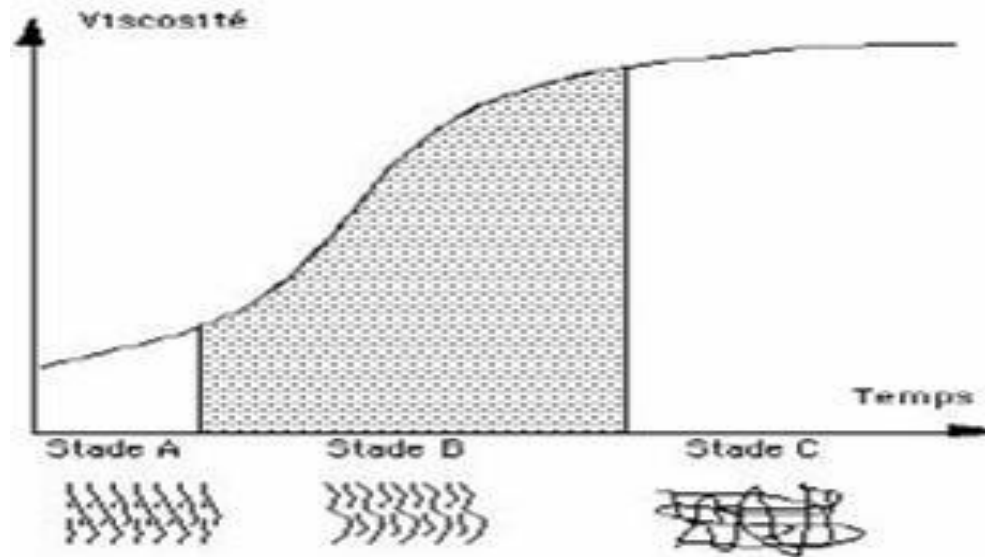


Figure : Différents états d'une résine.

Interprétation de la courbe :

- Stade **"A"**, la résine de base et le durcisseur ne sont pas mélangés (ou mélangés, ils n'ont pas encore réagi), ils présentent une faible viscosité, une faible masse moléculaire moyenne (monomères dans la résine) et une solubilité totale.
- Stade **"B"**, le système (résine + durcisseur) a subi un démarrage de polymérisation (pré polymérisation). Cet état correspond à l'état de gélification dans lequel se trouvent les prés imprégnés.
- Stade **"C"**, le polymère est réticulé. Il se caractérise par une insolubilité et une infusibilité totales.

La **Polymérisation** : Passage, pour une résine thermodurcissable, d'un état pâteux à un état solide.

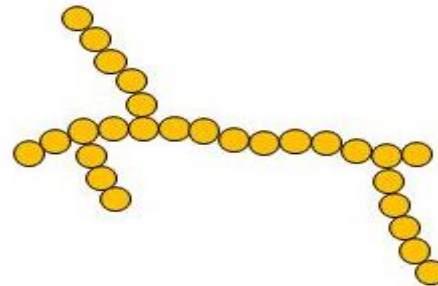
La **réticulation** est l'aboutissement de la **polymérisation** et est un processus irréversible. Dans les polymères thermodurcissables, la **réticulation** correspond à la formation d'un réseau macromoléculaire tridimensionnel.

Il existe 3 formes de polymères :

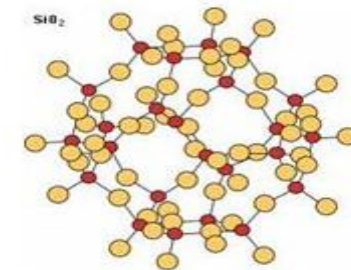
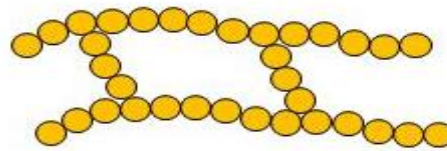
- Polymère linéaire



- Polymère ramifié

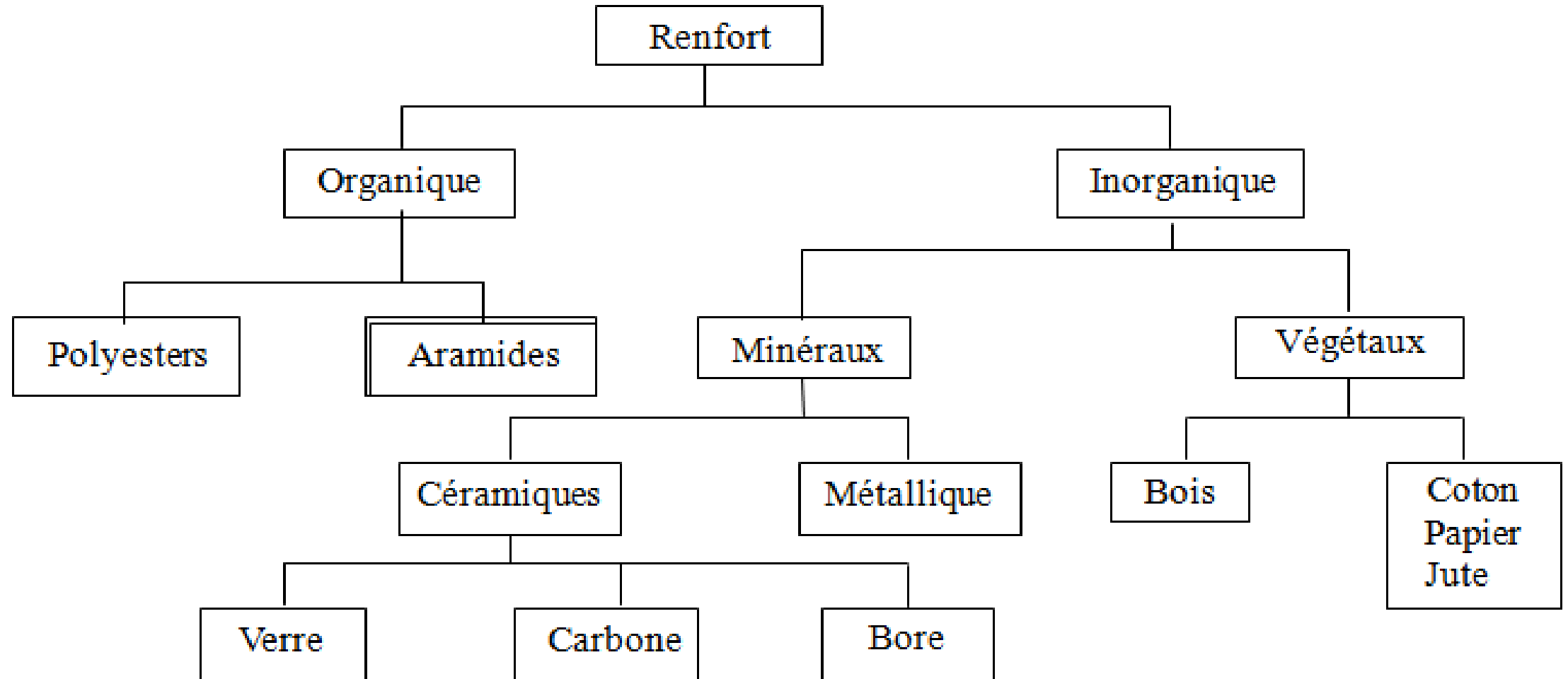


- Polymère réticulé

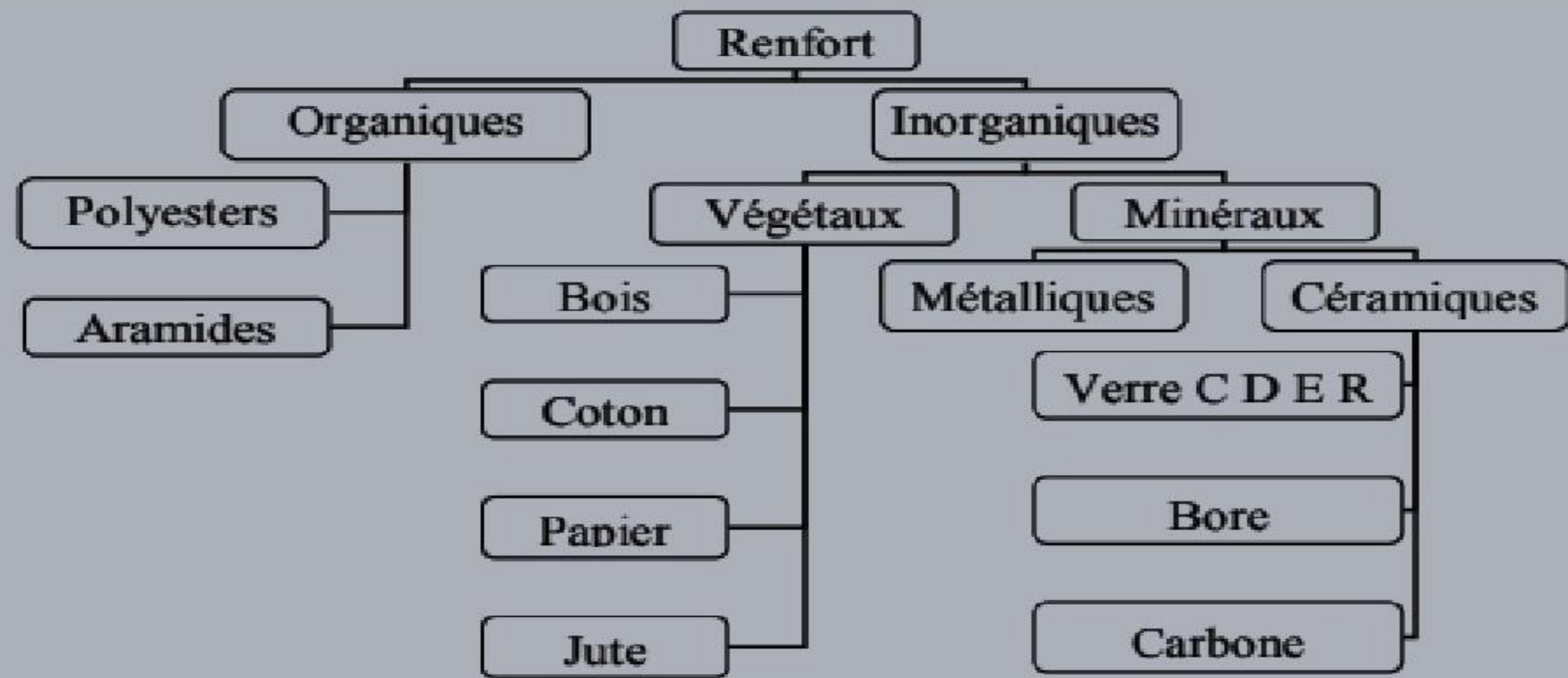


Réseau tridimensionnel

Figure : Principaux matériaux de renfort .



Types de renforts



Fibres

Les fibres sont le constituant
de base du renfort des composites

Verre



Aramide



carbone



Figure 1. Common Glass and Carbon Fibers and FRPs used in Structural Engineering

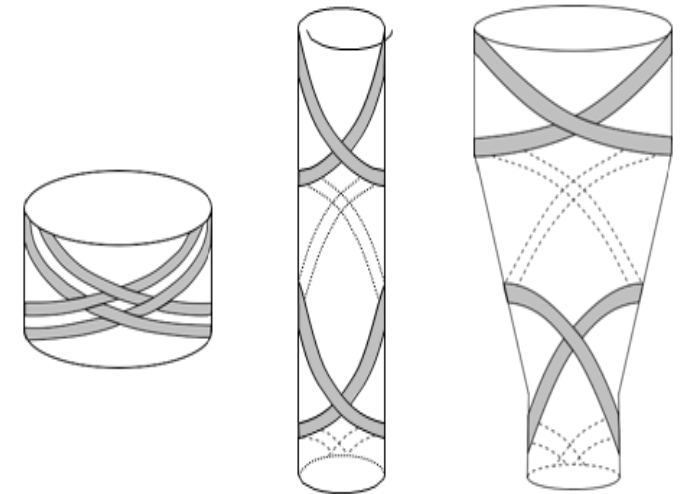
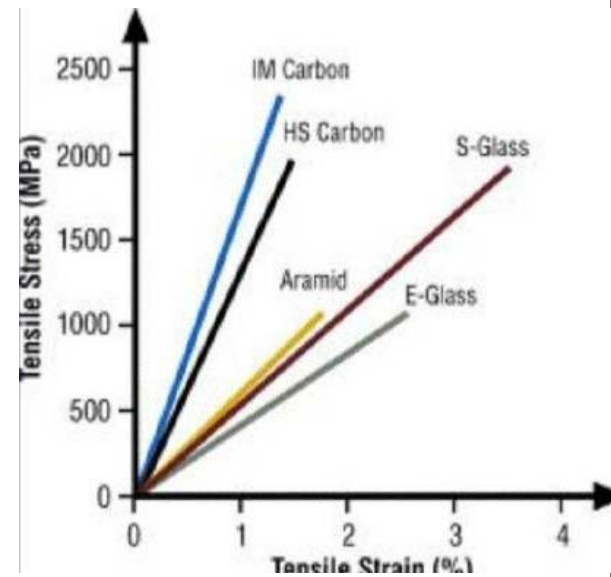
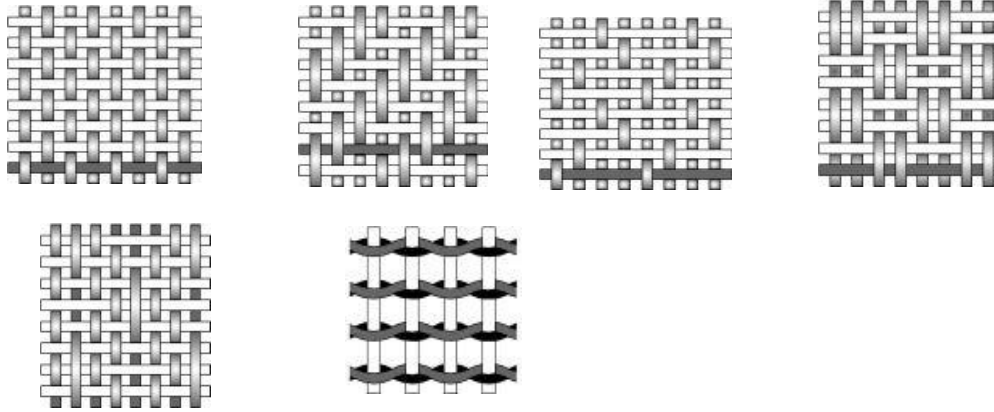


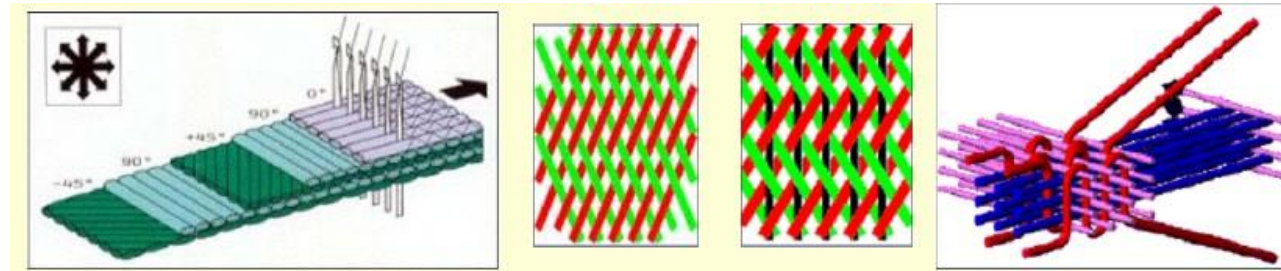
FIGURE 2.3. Tissages cylindrique et conique.

Tissus

Généralement, les renforts sont produits en forme de tissu :



Tissus multidirectionnels :



Couches pré-imprégnées

Tissus avec fibres pré-imprégnées de résine non polymérisée

Les fibres peuvent être tissées ou unidirectionnelles

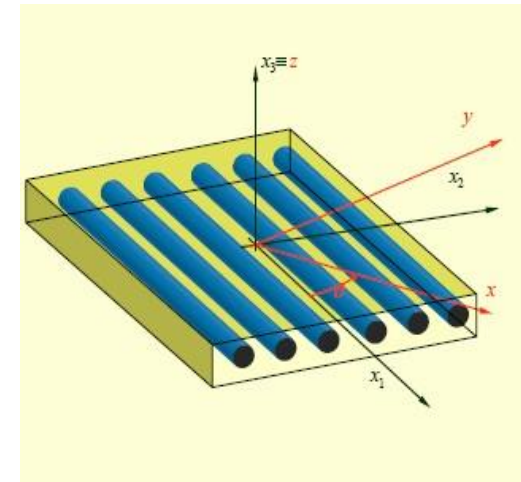
Le comportement est toujours anisotrope

Applications:

- fabrication de stratifiés
- peaux de panneaux sandwich
- coques en stratifiés (surtout les tissus)

Qualités :

- Hautes performances mécaniques
- légèreté



Stratifiés

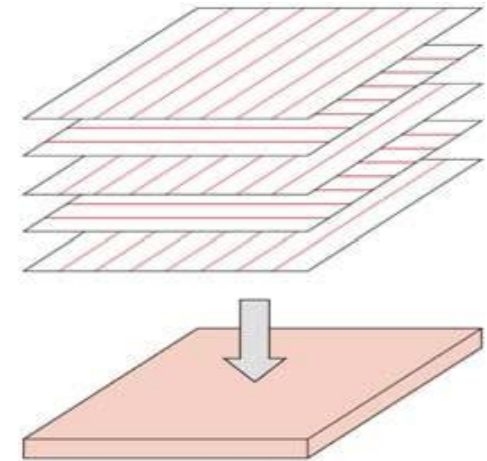
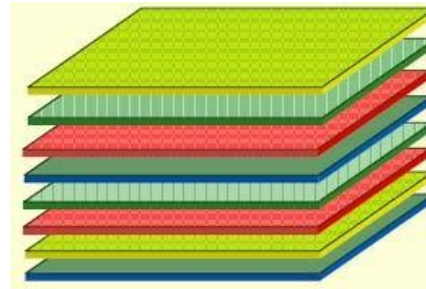
Superposition de plis avec différentes orientations
Normalement, l'assemblage des couches se fait par polymérisation de l'ensemble, parfois par collage (panneaux en bois)

Applications:

- structurales

Qualités :

- Hautes performances mécaniques
- Légèreté
- conception



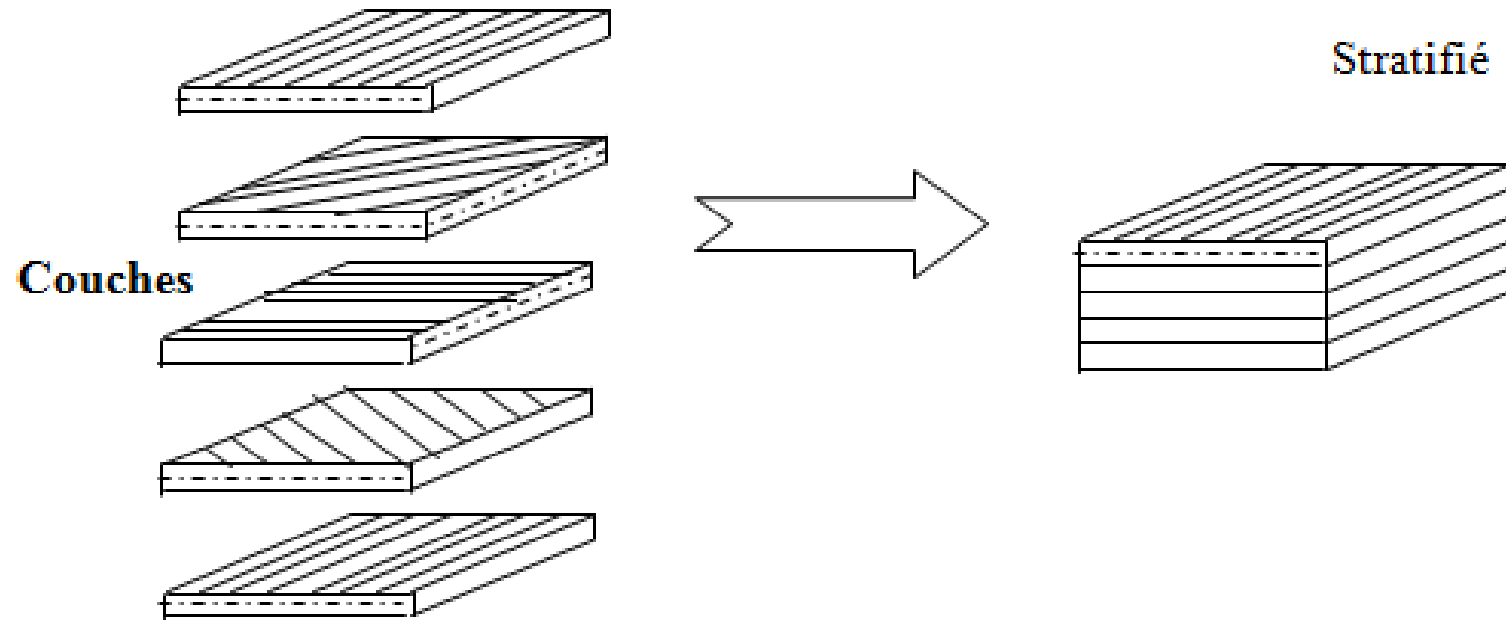


Figure : Constitution d'un stratifié

Les avantages des stratifiés résident dans la possibilité d'adopter et de contrôler l'orientation des fibres pour que le matériau résiste à des sollicitations déterminées dans des meilleures conditions.

Code de représentation d'un stratifié

Les orientations fréquemment utilisées sont représentées dans la figure suivante :

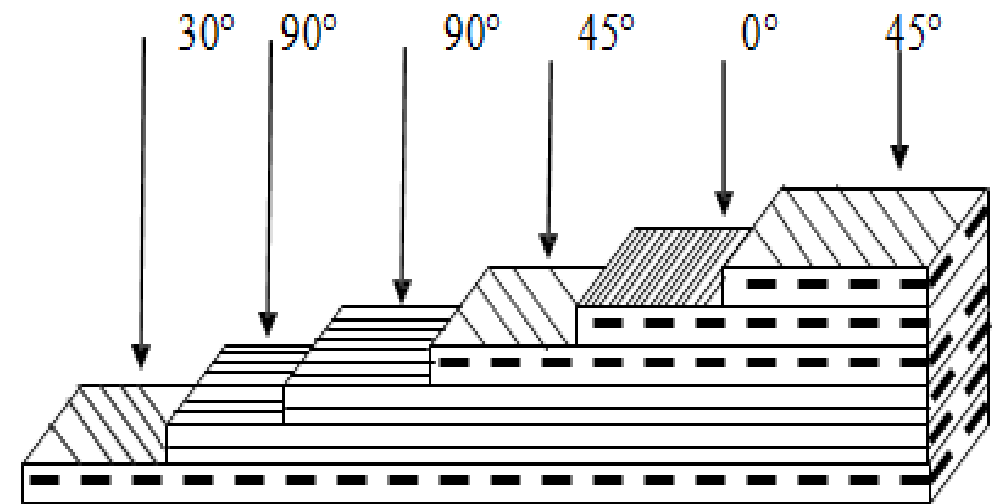
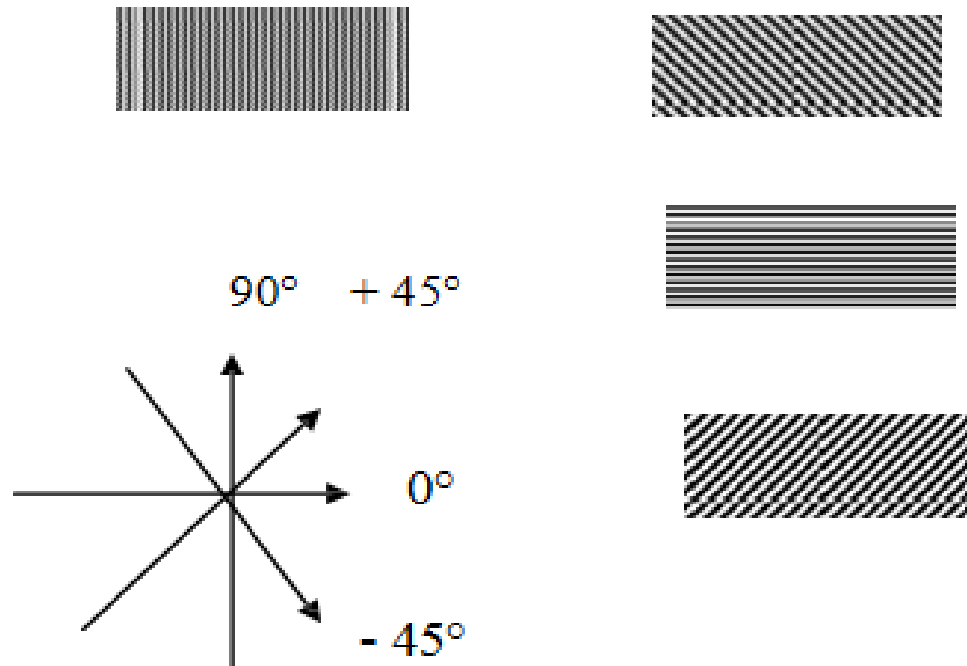


Figure : désignation d'un stratifié

La figure schématise un stratifié de code : $(30/90^2/45/0/45)$

Sandwiches

Les panneaux sandwich sont la généralisation 2D de la poutre en I

Concept clé: placer la partie résistante à la flexion là où il le faut, à l'extérieur, et remplir la partie centrale avec un matériau léger (mousse solide, balsa, structure à nid d'abeille etc.) qui fait face aux efforts de cisaillement hors plan

- **Applications:**

- Navales
- Aérospatial
- Aviation
- Sport

- **Qualités :**

- Extrême légèreté
- Très grande rigidité en flexion

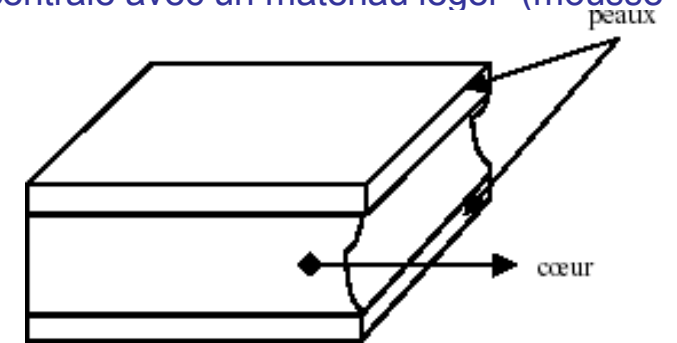


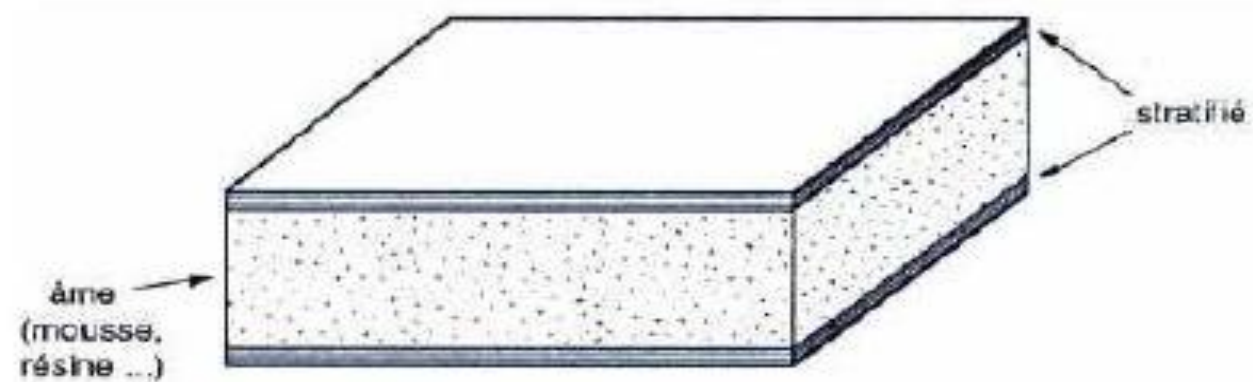
Figure : structure de sandwich

les sandwiches :

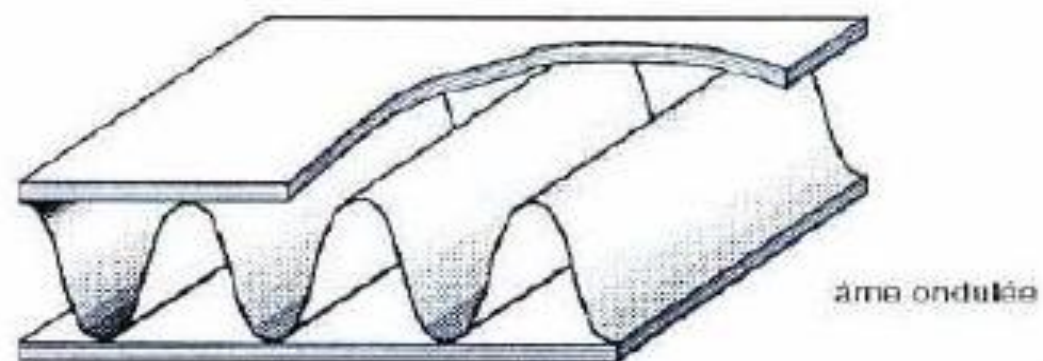
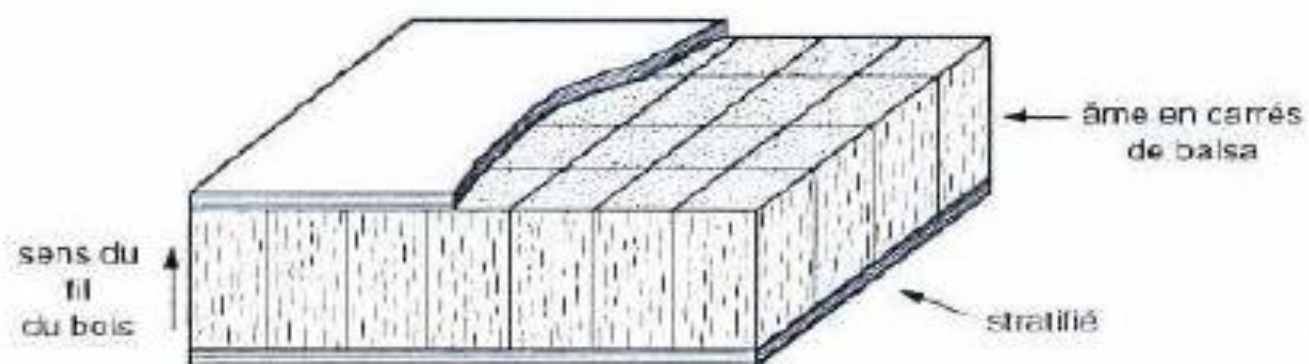
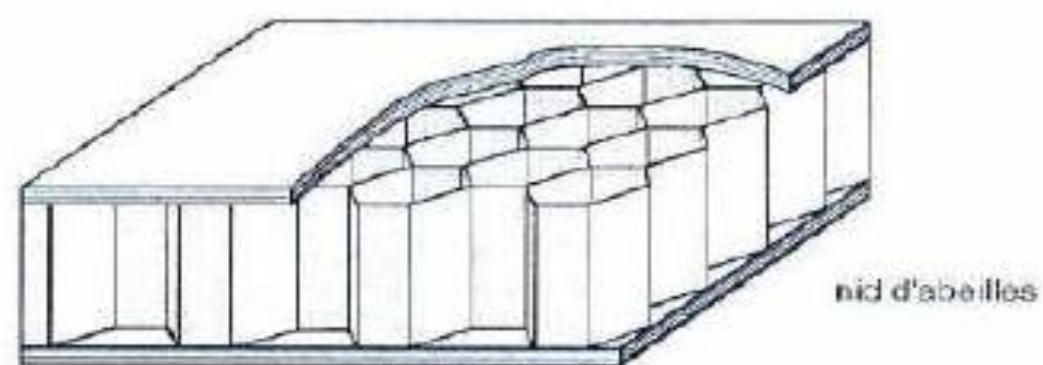
Cette technique consiste à déposer une âme (constituée d'un matériau léger possédant de bonnes caractéristiques en compression) entre deux feuilles ou peaux (possédant de bonnes caractéristiques en traction).

Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, ...etc.) ou creuses (alliages métalliques léger, papier, ...etc.). Les peaux sont des stratifiés ou des feuilles d'alliages légers.

(a)



(b)



Matériaux composites sandwich
(a) Ame pleine – (b) Ame creuse

Technologies de production

Mise en œuvre des matériaux composites :

Moulage sous vide

Moulage au contact

Moulage par pultrusion

Moulage par centrifugation

Moulage par enroulement filamentaire

Les Composites

• Un « composite » est un assemblage de **deux constituants non miscibles** et de **structure différente**. Les qualités de chacun se complètent pour former un **matériau hétérogène** dont les *performances* sont *supérieures* à celles de ses composants.

COMPOSITE = MATRICE + RENFORT

Elle assure la **liaison** de l'ensemble.

Elle **répartit les efforts**.

Elle **protège les renforts**.

Pour une grande part des composites industriels la matrice est une **résine thermodurcissable** (organique)

Principales matrices ;

Organique: **EPOXY - (EP)**, **Polyester - (UP)**

Minérale: **Carbone - (C)**

Métallique: **Titane - (Ti)**

Il constitue le **squelette** de l'ensemble.

Il **supporte l'essentiel des efforts**.

Généralement, il se présente sous forme de **fibres à haute résistance**.

Principaux renforts ;

Fibres de verre - (FV)

Fibres de carbone - (FC)

Fibres d'Aramide - (FA) « Kelvar »

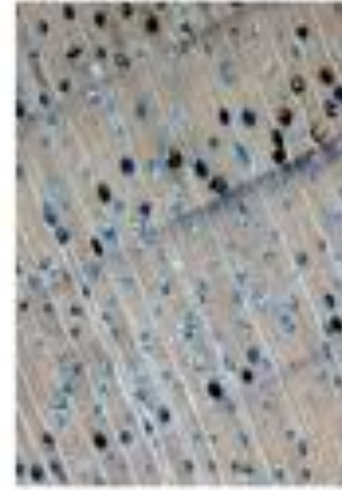
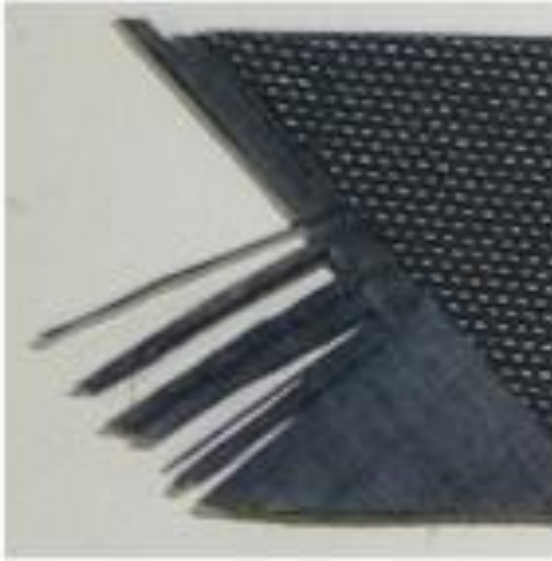


Figure : Exemples de multi-matériaux : (a) un composite carbone/époxy, (b) un béton armé, (c) du bois vu au microscope optique, (d) une lame d'acier de Damas.

3. Les Composants du matériau composite:

1. Le Renfort :

Les renforts sont en générale des fibres qui contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Elles constituent une fraction volumique comprise entre 30 et 70 % (rapport du volume de fibres au volume total du composite). Les fibres se présentent sous forme de filaments de plus ou moins grande longueur dont les qualités recherchées sont les suivantes :

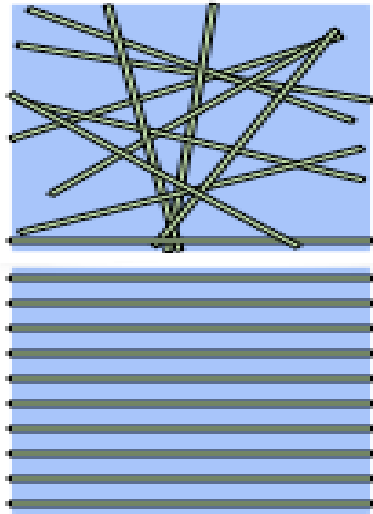
- bonnes caractéristiques mécaniques ;
- légèreté ;
- résistance thermique ;
- compatibilité avec les résines ;
- adaptabilité aux procédés de mise en œuvre ;
- faible prix.

Géométrie des renforts

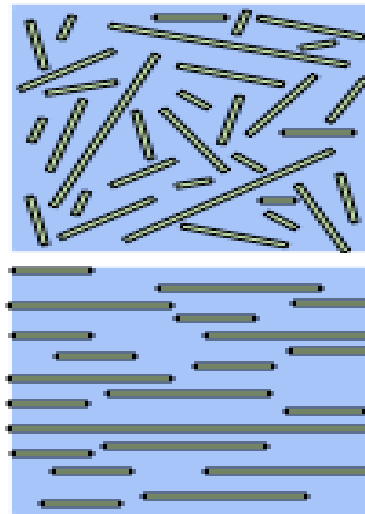
D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (i.e. longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure a) ;
- Les fibres courtes (i.e. de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure b) ;
- Les particules, ou charges renforçantes (figure c).

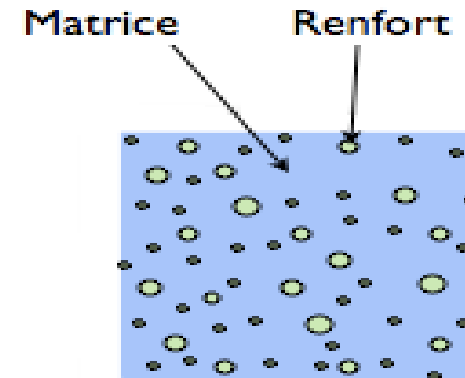
Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.



(a)



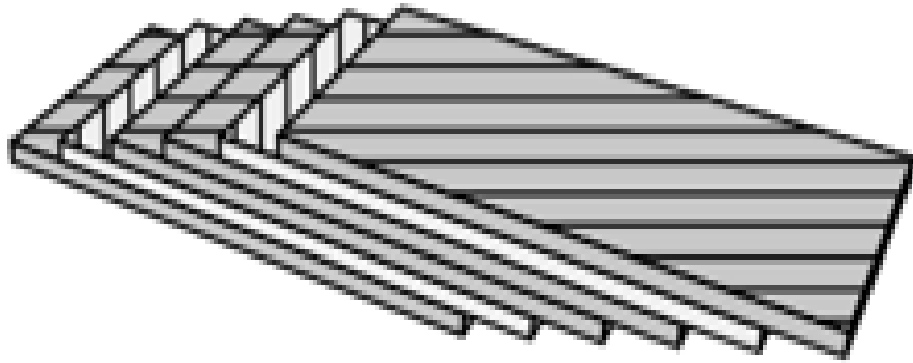
(b)



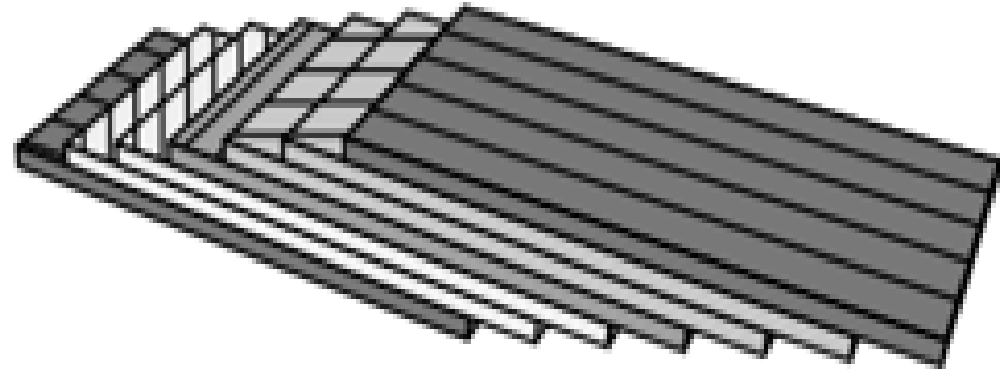
(c)

(b) Figure : Les structures géométriques des composites :
(a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

*Figure : Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels.
Les nombres entre crochets désignent l'angle de chaque pli (en degrés)
par rapport à une direction de référence.*



(a) $[-45/45/-45/-45/45/-45]$



(b) $[0/45/45/90/-45/-45/0]$

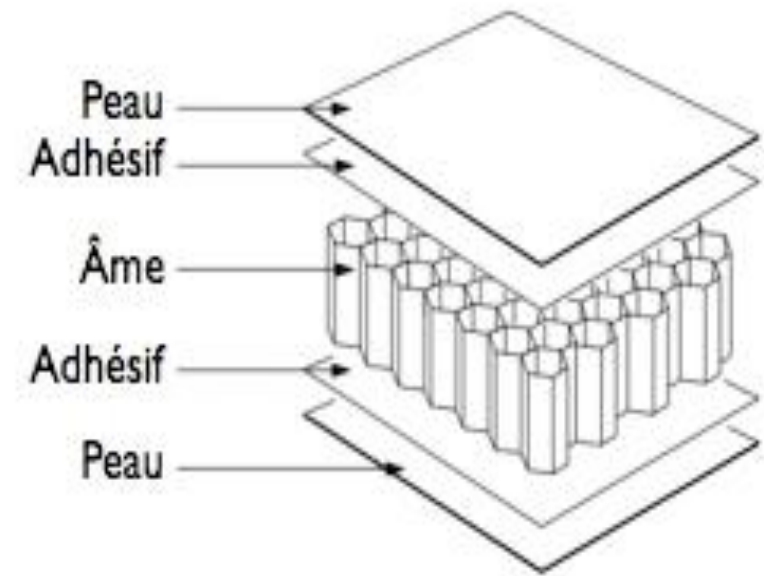
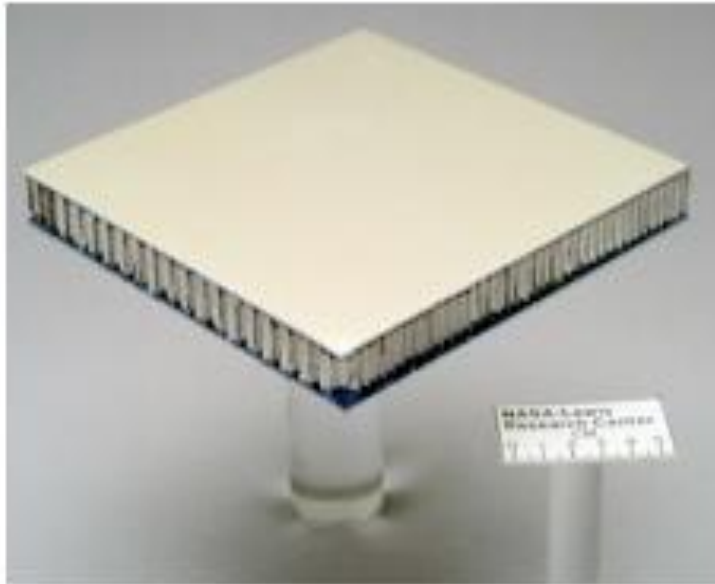


Figure : Une structure en sandwich et ses constituants.



(a)



(b)



(c)

*Figure : Exemples de renforts en verre :
(a) microbilles creuses, (b) fibres courtes, (c) fibres longues.*

Compositions des verres de type E, D et R.

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

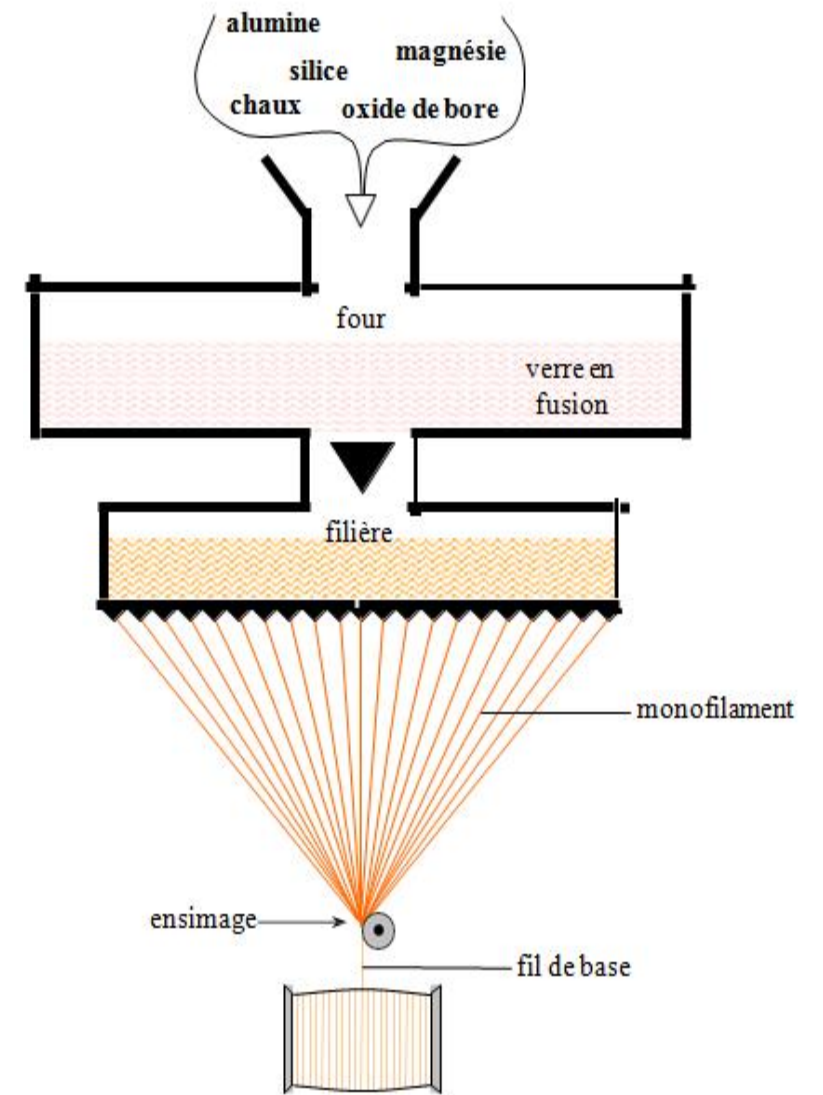


Schéma de principe du procédé d'étirage mécanique ou silionne

Architectures de renforcement

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la architecture des renforts pour apporter une bonne résistance adaptée aux contraintes mécaniques.

On rencontre plusieurs architectures du renfort :

1. **Unidirectionnelle (c)** les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Ex. fibres de verres

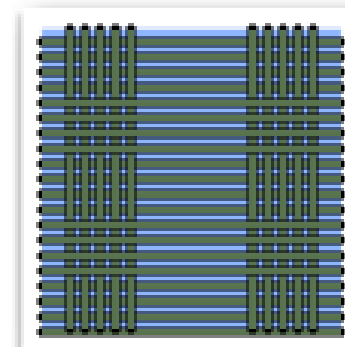
2. **Multidirectionnelle aléatoire ; (b)**

Ex. mat du verre

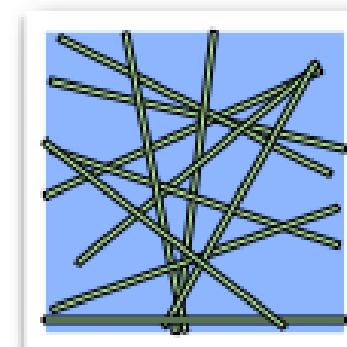
3. **Orientée (a)**

Ex. comme le tissu

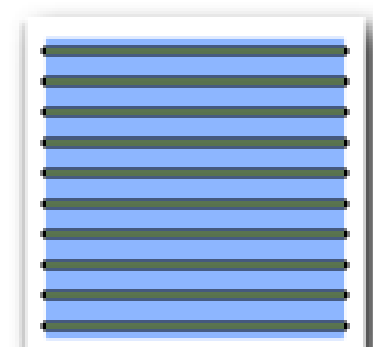
4. **Tridimensionnelle;**



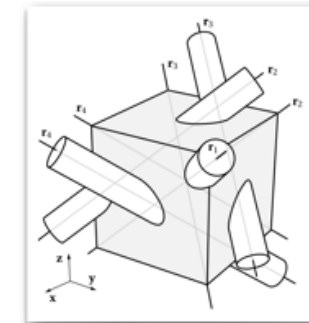
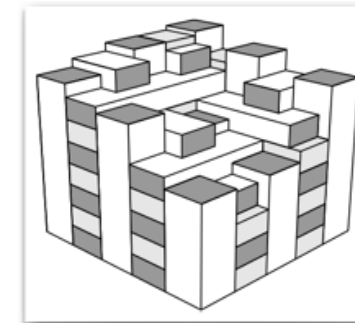
(a)



(b)



(c)



LES FIBRES ET LES TISSUS DE RENFORT

les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres. Ces fibres sont commercialisées:

- sous forme linéique (fils, mèches,...)
- sous forme de tissu surfacique (tissu simple, mat,...)
- sous forme multidirectionnelle (tresses, tissu complexe, tissu 3 D,...)

LES FIBRES LINÉIQUES

Les fibres sont réunies en fils ou en mèches (roving) de différentes formes. Les fils, soit continus ou discontinus, sont caractérisés par leur masse linéique ou titre.



Roving de verre

La masse linéique exprimée, en Tex, est:

$$1 \text{ Tex} = 10^{-6} \text{ Kg /m ou encore } 1 \text{ Tex} = 1 \text{ g/km.}$$

Pour un renforcement effectif dans le sens de la longueur de la fibre, On définit ce qu'on appelle

“ la longueur critique ”

la longueur critique $\longrightarrow l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau}$

σ_f la résistance en traction de la fibre

d diamètre de la fibre

2τ la résistance de la matrice en cisaillement

LES FIBRES SURFACIQUES

Les Mats:

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle.

Suivant la mise en œuvre, ces fils sont maintenus (ou non) dans les résines par un liant.



Mat de verre

Les tissus et rubans:

Un ensemble surfacique de fils, de mèches, de prepregs,...

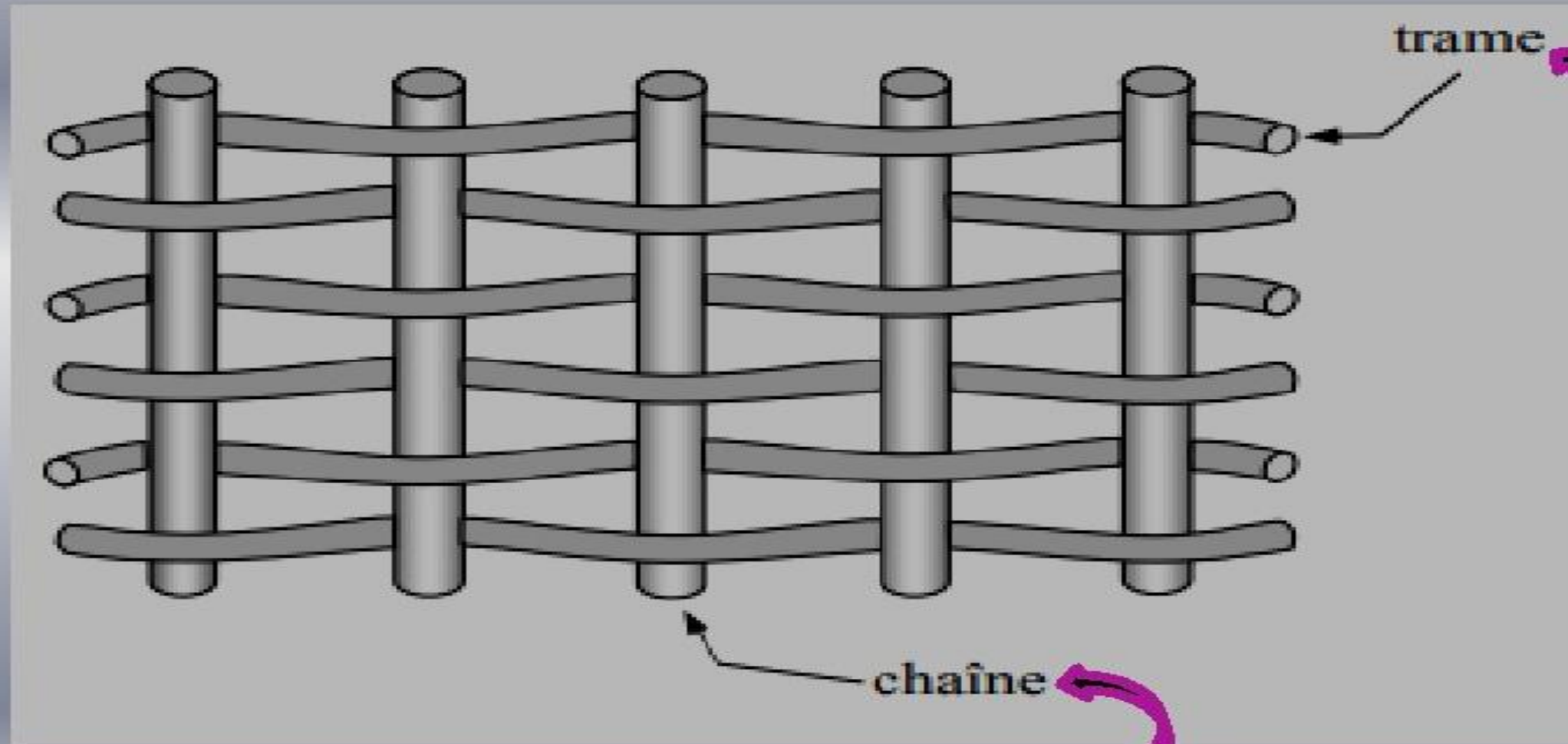
Ils sont constitués d'une chaîne et d'une trame



Tissu de verre

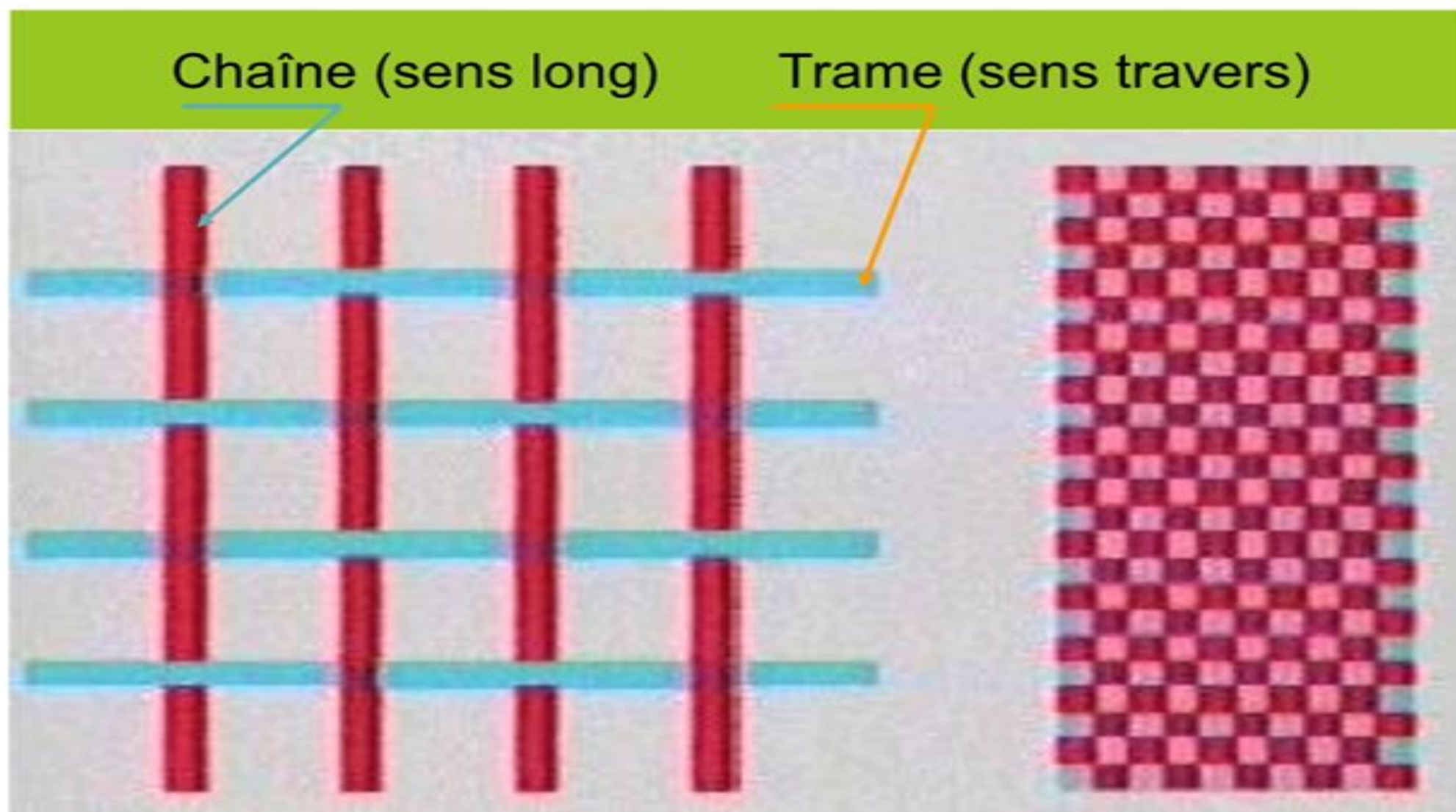
LES MODES DE TISSAGE

Ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne

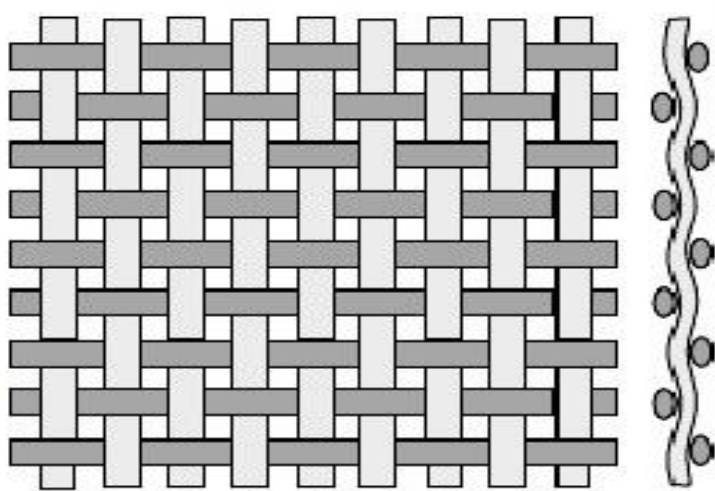


Ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu

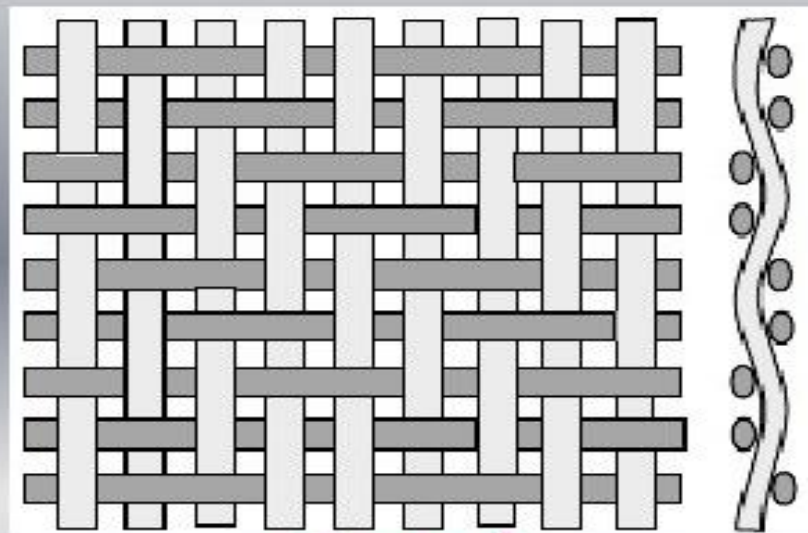
⇒ Les fibres sont tissés (chaîne + trame)



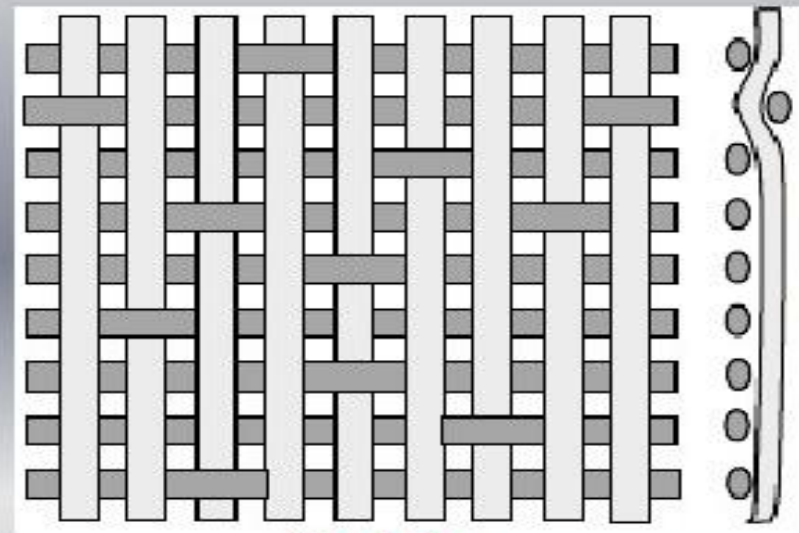
Les armures



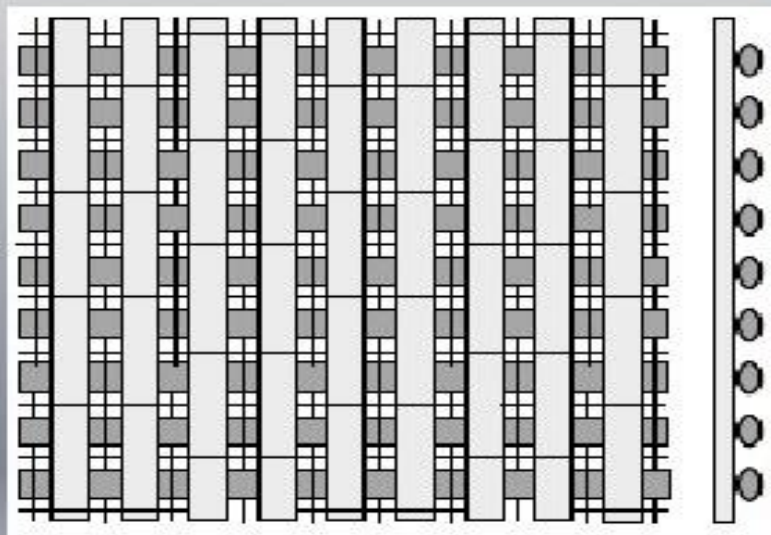
Taffetas



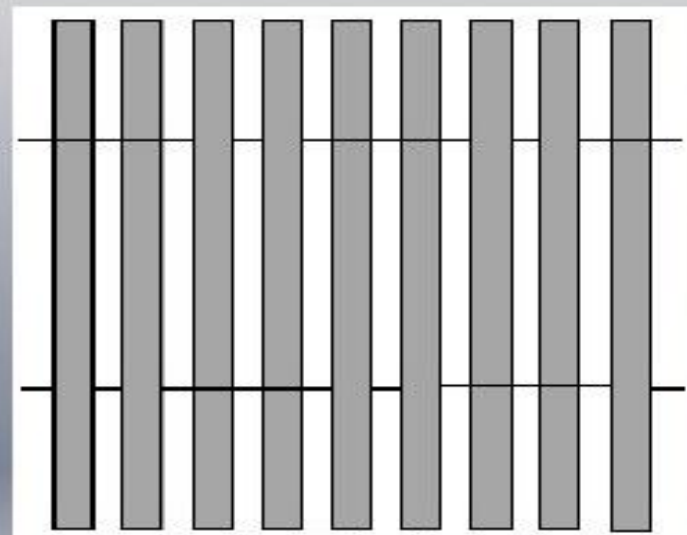
Sergé



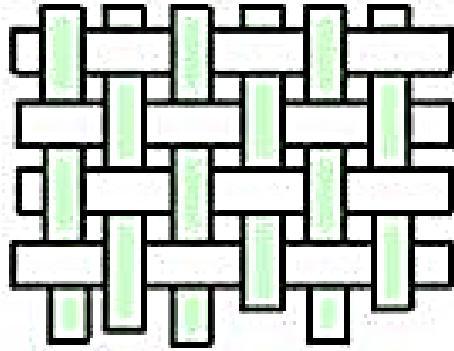
Satin



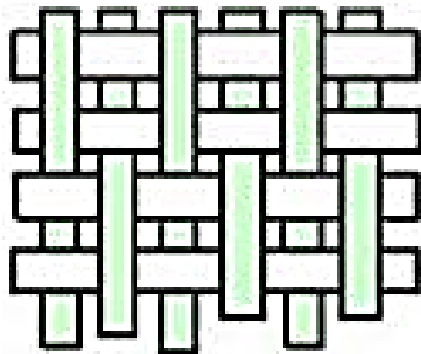
Croisée



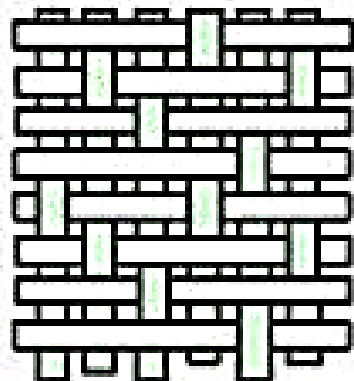
Unidirectionnelle



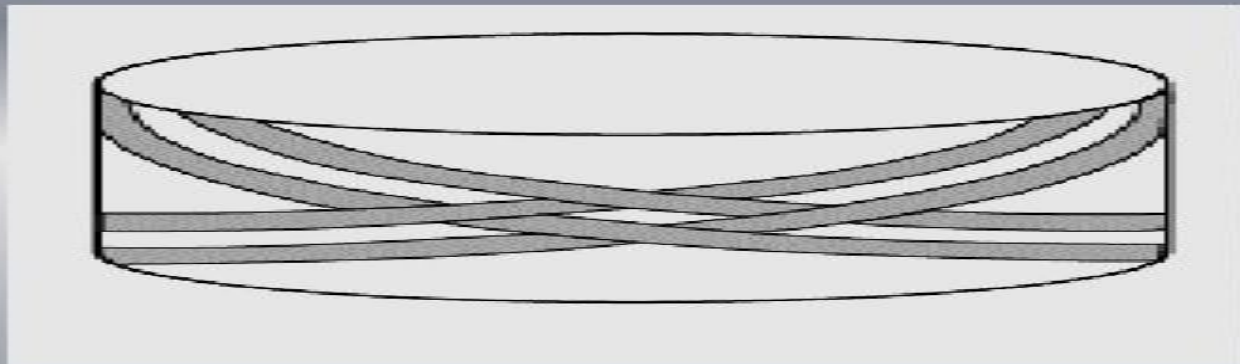
- **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent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



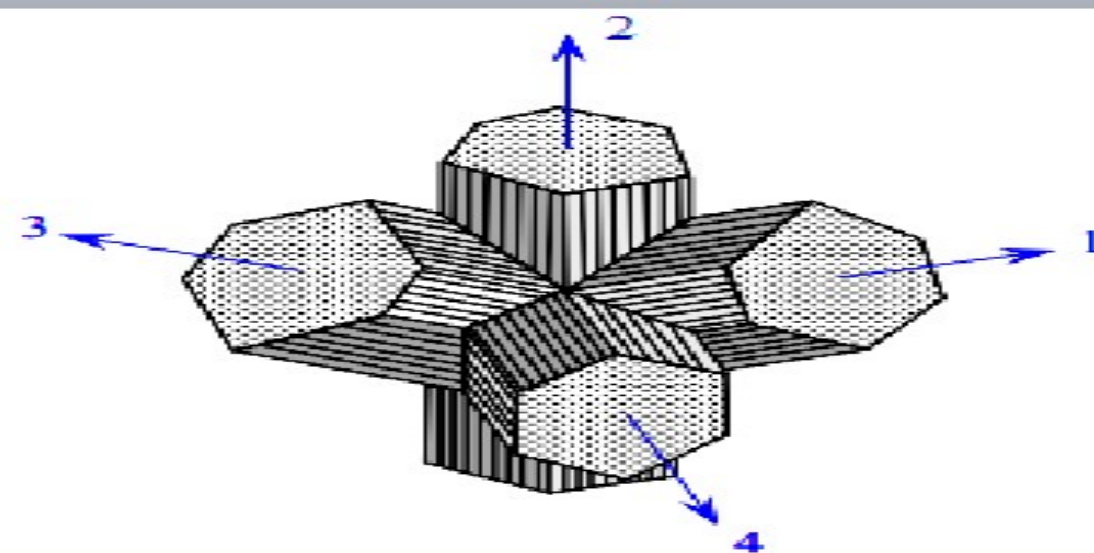
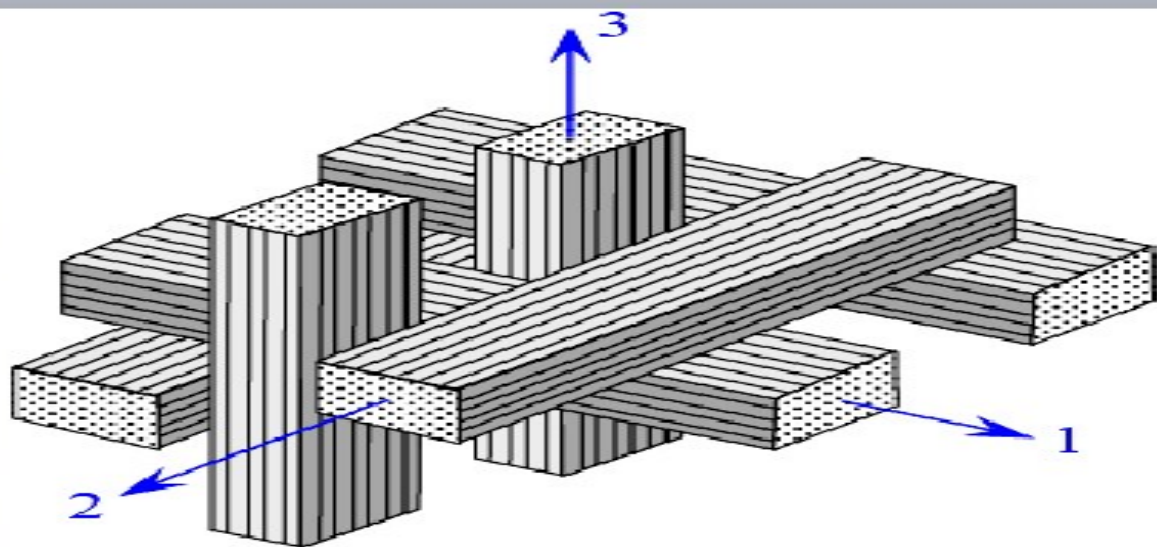
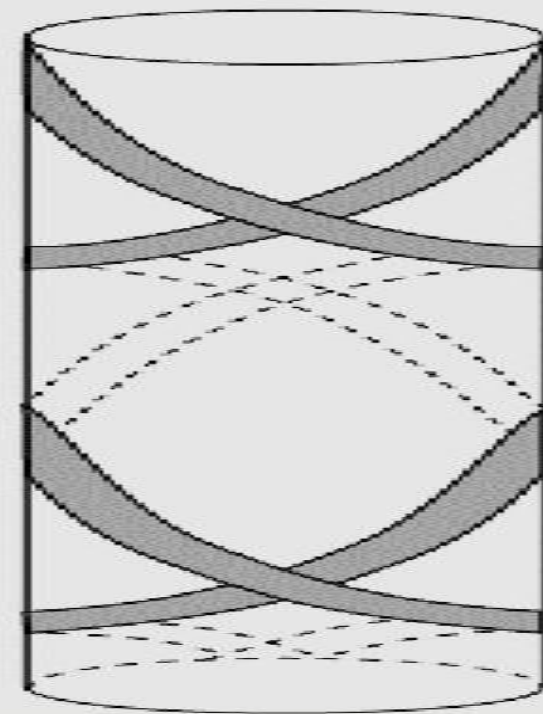
- **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.



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



Tissage cylindrique



Tissage volumique

Différents types des fibres

les fibres à hautes performances

- fibres de verre, de carbone, d'aramide, ou de bore qui ont une fonction mécanique prépondérante
- quelques fibres synthétiques qui ont d'excellentes propriétés thermiques

les fibres à utilisation particulière

- des fibres d'origine naturelle (bois, coton, papier...)
- des fibres synthétique (polyamide, polyester...) ou métallique

Les plus utilisés sont :

- **les Mat de verre** (fibre non tissée)
- **les Roving** (Fil de verre tissage taffetas) qui répondent à la majorités des besoins dans la construction industrielle et nautique.

Les fibres de verre



- ⇒ Obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de carbone).
- ⇒ Il existe 3 types de fibres de verre, à savoir:
 - **Verre E**: composites de grande diffusion et applications courantes
 - **Verre R**: composites hautes performances
 - **Verre D**: composites pour fabrication circuits imprimés

Les fibres de carbone



- ⇒ Utilisées dans les applications de hautes performances et obtenues par la carbonisation des fibres de PAN (PolyAciloNitrile).
- ⇒ Selon la T°, deux types de fibres peuvent être élaborées:
 - **Carbone HR**: T° de combustion de 1000 -1500°C
 - **Carbone HM**: T° de combustion de 1800 -2000°C

Les fibres d'aramide (kevlar)



- ⇒ Issues de la chimie des polyamides aromatiques.
- ⇒ Deux types de fibres peuvent être élaborées:
 - **Aramide BM**: pour les câbles et gilets pare-balles
 - **Aramide HM**: pour le renforcement des composites hautes performances

Les fibres de verre

Obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore)

Propriétés:

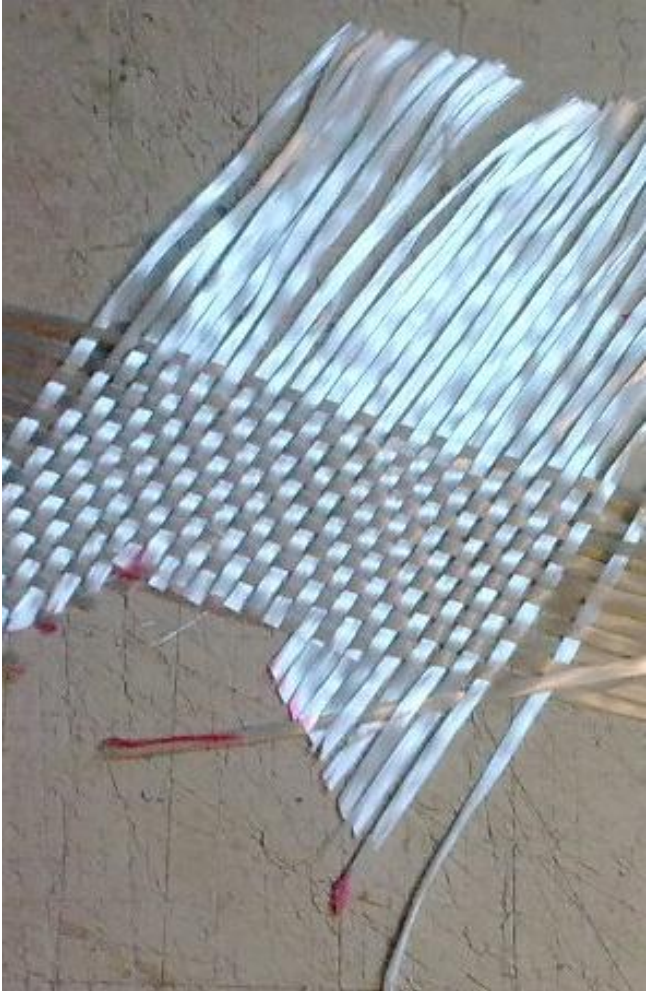
- Bon rapport performances/prix
- Disponible sous toutes les formes
- Bonne adhérence à toutes les résines
- Résistance à la température
- Dilatation thermique faible
- Bonne résistance à l'humidité
- Renfort le plus utilisé industriellement

Communément, on rencontre 2 types de fil de verre :

1 - les fils sillionnés Les fibres assez fins qui servent à construire les tissus techniques pour **l'aéronautique, le modélisme, les planches de surf à voile** etc...ces fils sont tissés en taffetas, serge, satin avec des grammages allant de 25 gr/m² à 300 gr/m².

2 – les fils roving pour les tissus pour la construction nautique / industrielle / ferroviaire. Ils peuvent être tissés en taffetas ou serge avec des grammages 300, 500, 800 gr/m² et aussi assemblés avec des mat de verre que l'on appelle complexe. Il servent aussi à la construction des multiaxiaux.

Fibres de verre ou mat de verre ???



Fibre de verre



mat de verre



laine de verre

Les fibres de carbonées

Ce type de matériau est utilisé dans toutes applications **exigeant une grande résistance mécanique pour un poids réduit**. Ces fibres ont d'excellentes propriétés mécaniques, une très bonne tenue en température, une dilatation thermique nulle, une bonne usinabilité et de bonnes conductibilités thermique et électrique. Elles résistent à l'humidité

Leurs inconvénients est une **mauvaise résistance à l'abrasion, au cisaillement et aux chocs**, et leur prix est relativement élevé. C'est pourquoi il est souvent allié à une fibre d'aramide ou de verre.

On rencontre deux types de tissages courant:

- Sergé
- taffetas

Les grammages vont de 100 à 300 gr/m².

La fibre est jusqu'à présent réservée à un secteur assez étroit: l'industrie aéronautique et spatiale, avions de chasse, etc.. ; les équipements sportifs tels des arcs sportifs et flèches, raquettes de tennis ; les cadres des vélos de compétition sur routes et vélo tout terrain ; les voiliers de compétition ; les freins hautes performance (Formule 1, aéronautique) ; Gilets pare balles ...



Les fibres d'aramide (Kevlar[®])

Les fibres d'aramide ont de **bonnes propriétés mécaniques en traction** et **bonne résistance aux chocs** (excellente absorption des vibrations) **et à l'abrasion, au feu et à la chaleur** (Leur dilatation thermique est nulle), **aux solvants organiques** (exemple : carburants). Leur masse volumique est faible

Leurs inconvénients sont **un mauvais comportement en compression, usinabilité délicate** : grande difficulté à couper (résistance au cisaillement) ou à usiner, **reprise d'humidité importante, sensibilité aux rayons ultraviolets, prix élevé.**

Les aramides sont utilisés dans de nombreuses applications à haute technologie dans l'aéronautique, l'aérospatiale, la construction navale, le secteur militaire pour fabriquer par exemple des gilets pare-balles ou des casques.

On rencontre trois types de tissages courant:

- sergé,
- satin ou,
- taffetas;

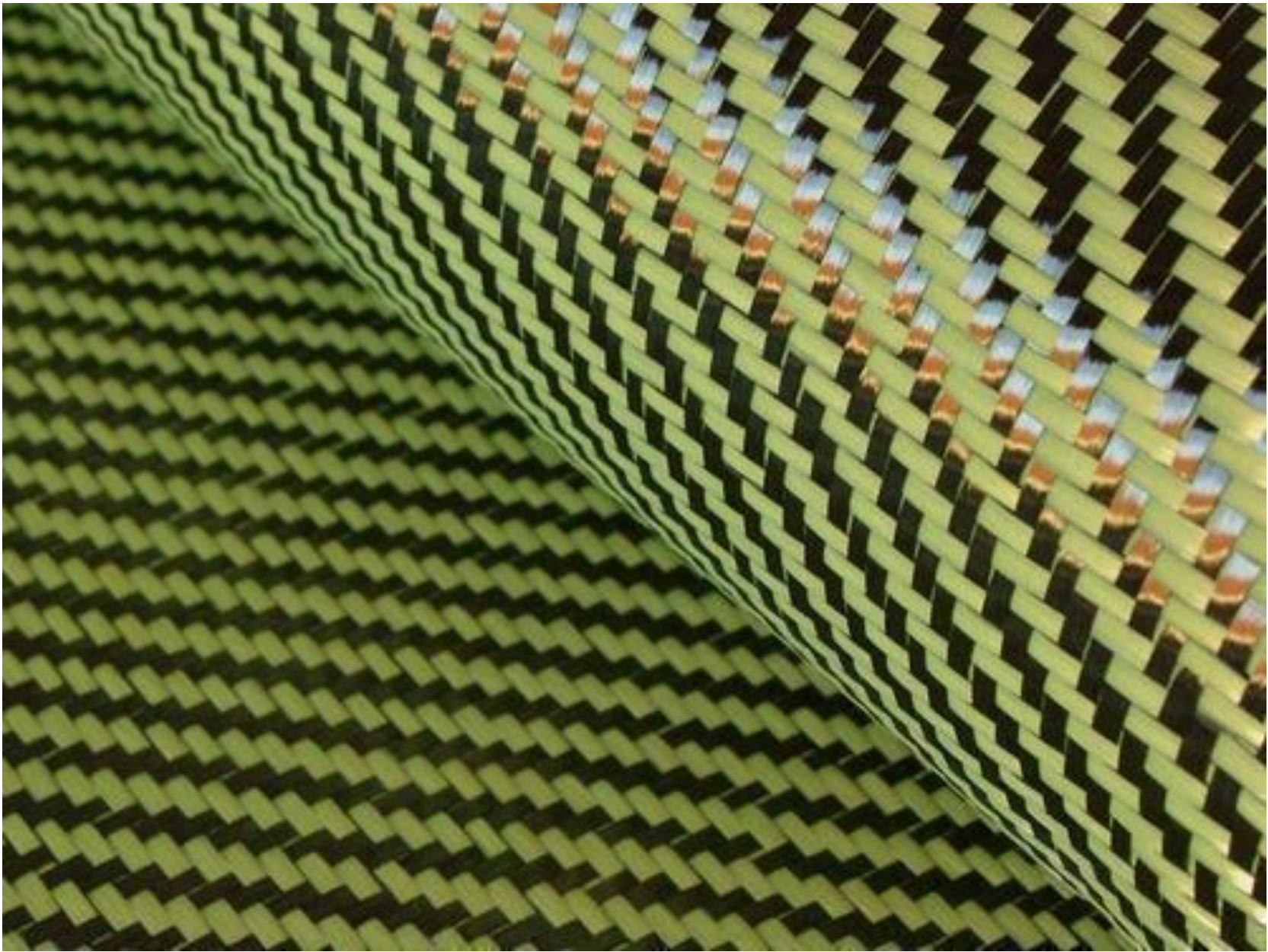
Les grammages vont de 100 à 300 gr/m².

**Gaine isolante tressée / en fibre d'aramide
Kevlar®, max. 160 °C**



**Fibre d'aramide 0Kevlar®
Tissée en toile ou taffetas**





Tissu hybride carbone/aramide



Tissu hybride verre/aramide

D'autres fibres...

Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

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.

• Épaisseur d'un pli

⇒ On définit sous le terme de **grammage**, la masse (m_{of}) des fibres par m^2

⇒ L'épaisseur (t) d'un pli est exprimée par:

$$t = \frac{m_{of}}{V_f \times \rho_f}$$

où:

m_{of} : la masse des fibres (en kg/m^2)

ρ_f : la masse volumique des fibres (en kg/m^3)

V_f : la teneur en volume des fibres

⇒ L'épaisseur (t) d'un pli peut être exprimée à partir de la teneur en masse des fibres (M_f):

$$t = m_{of} \times \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-M_f}{M_f \times \rho_m} \right)$$

⇒ **Exemple:** pli unidirectionnel

Type de Fibres	M_f (%)	t (mm)
verre "E"	34	0.125
verre "R"	32	0.175
kevlar	48	0.125
carbone "HR"	34	0.25

2. La matrice

La matrice est un matériau soit organique, minérale ou métallique mais le plus souvent organique. Elle a pour rôle de :

- Lier les fibres de renforts,
- Répartir les contraintes,
- Apporter la tenue chimique de la structure,
- Donner la forme désirée au produit final.

Selon le type de matrice utilisée on a :

- **CMO (composites à matrices organiques)**, Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées:
 - **des résines thermodurcissables** ; polymères thermodurcissables. (ex. les résines époxy)
 - **des résines thermoplastiques** ; polymères thermoplastiques (ex. les polycarbonates)
- **CMC (composites à matrices céramiques)**, la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit **par dépôt chimique en phase vapeur (CVD)** par densification d'une préforme fibreuse, soit **à partir de résines cokéfiables** comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).
- **CMM (composites à matrice métallique)** le matériau composite est constitué :
 - **d'une matrice métallique** (par ex. aluminium, magnésium, zinc, nickel,...)
 - **d'un renfort métallique ou céramique** (par ex : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant...)

Les Plastiques

Un « plastique » est un mélange dont le constituant de base est une **résine** [ou polymère], associée à des **adjuvants** (stabilisants, anti-oxydants, ...) et des **additifs** (colorants, fongicides, ...)

PLASTIQUE = POLYMERE + ADJUVANT + ADDITIF

On distingue 2 catégories de matières plastiques

Les thermoplastiques

Ces résines peuvent être **ramollies par chauffage** et **durcies par refroidissement**.
L 'opération est réversible et peut être répétée plusieurs fois

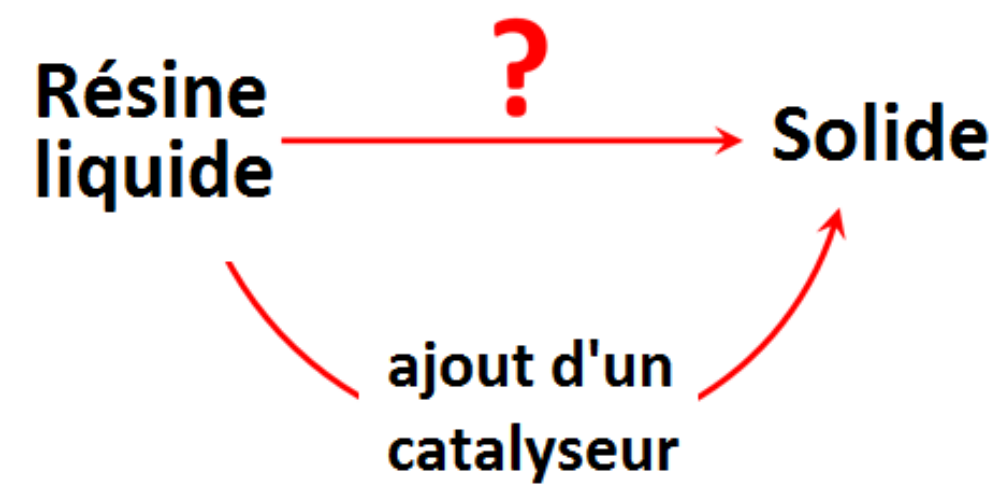
Les thermodurcissables

Ces résines peuvent être **transformées par la chaleur** en un état infusible et insoluble.
L 'opération est irréversible et le recyclage des déchets est impossible.

Principales différences entre matrices TP et TD

- La structure des TP se présente sous forme de **chaînes linéaires**, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD a la forme d'un **réseau tridimensionnel** qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"



La résine

La transformation d'un liquide visqueux (résine) en une magnifique pièce ou un moule est à une réaction chimique.

Cette réaction est obtenue en mélangeant deux produits :

le mélange "durcit" grâce à l'adjonction d'un **"catalyseur ou durcisseur"**.

Dans ce cas le catalyseur lance la réaction chimique et va se détruire durant cette réaction. La quantité nécessaire est faible et présente une certaine tolérance.

Mais il est facile de comprendre que si l'on en met une quantité trop importante le produit servant de catalyseur ne se détruira pas totalement durant la polymérisation.

Des "reste" seront donc présent dans le résine durcie, affaiblissant ses caractéristiques physico-chimiques, dynamiques et thermiques.

4. Grandes classes matériaux composites (selon le cout)

On distingue, généralement, deux grandes familles

1. **Les composites de grande diffusion (GD)**, est l'association renfort fibre de verre (les métaux) résine polyester. Ces composites apportent des **propriétés mécaniques intéressantes** et ils sont **peu coûteux**, occupent **une large part de marché**.
2. **Les composites hautes performances (HP)**, dont les **caractéristiques mécaniques spécifiques sont supérieures** à celles utilisent dans la composites (GD), généralement on utilise comme renforts les fibres de carbone ou d'aramide (kevlar) avec des résines époxydes. Les coûts de ces matériaux sont élevés.

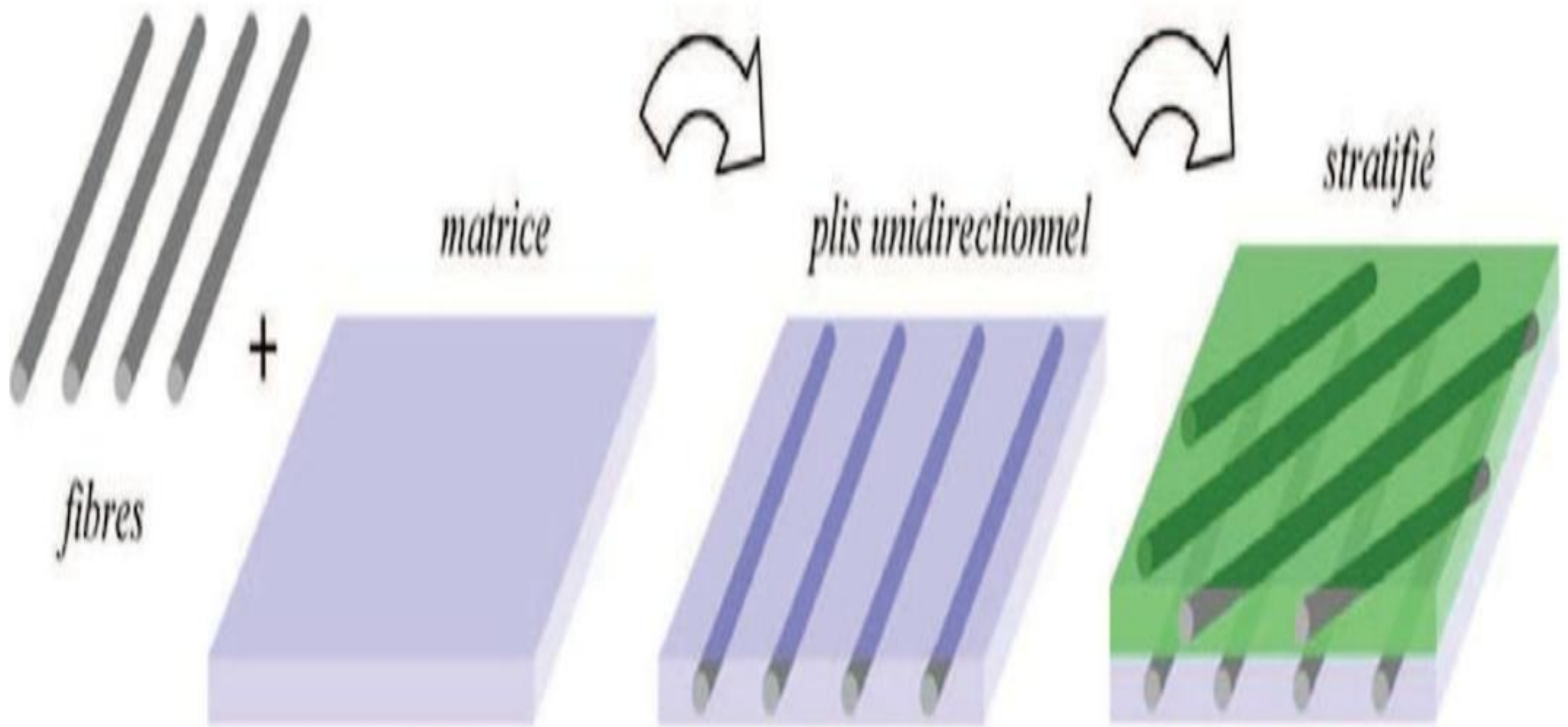


Figure – STRUCTURE D'UN COMPOSITE STRATIFIÉ

Types de matériaux composites (selon la structure)

- 1. Composites à fibres courtes:** fibres dispersées dans une matrice isotrope, généralement sans orientation préférentielle; comportement macroscopique isotrope
- 2. Composites à fibres longues:** fibres longues noyées dans une matrice isotrope avec orientation établie; comportement macroscopique anisotrope
- 3. Stratifiés:** superposition de plis en composite diversement orientés; le comportement macroscopique doit être conçu selon les besoins
- 4. Sandwiches:** panneaux ou coques conçus pour des sollicitation de flexion; généralement, le comportement dans le plan est isotrope

Types de composite (selon la composition)

En général, le domaine des composites est très vaste et ceux-ci peuvent être divisés en quatre types, soit :

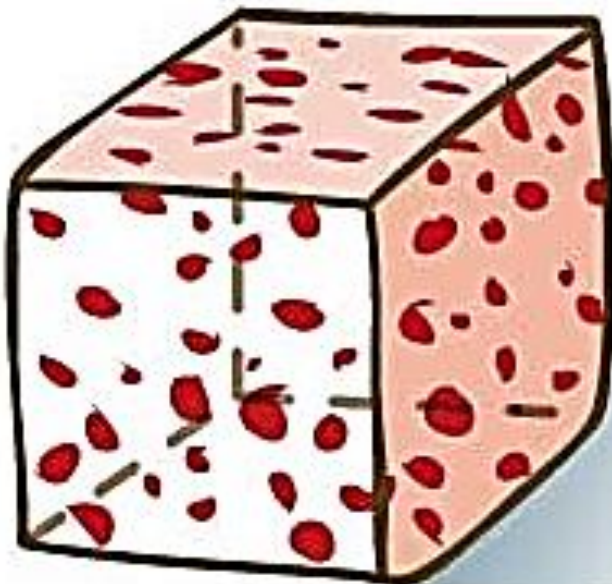
Les composites de fibres

Les matériaux composites laminés

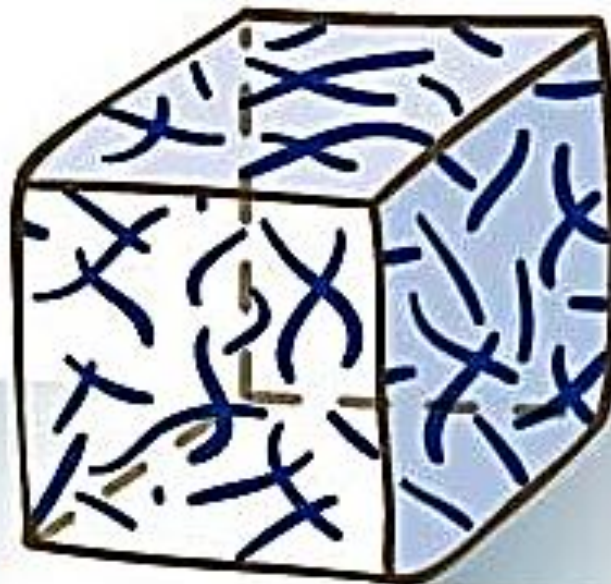
Les composites de particules

Une combinaison des trois premiers

composite
à particules



composite
à fibres



composite
laminé



Les composites de fibres

Le béton = un matériau **fragile**, résiste très bien à la compression mais mal à la traction.

L'ajout de fibres $\Rightarrow$ augmenter la résistance à la traction et également la ténacité

Les composites de fibres = matériaux composés d'une matrice dans laquelle divers types de fibres sont ajoutés.

Le comportement des composites de fibres est beaucoup influencé par le type de fibres et leur nature.

Il existe deux grands types de fibres :

- **Les macrofibres (≈ 10 mm de longueur et plus)** qui sont ajoutées au béton afin principalement d'augmenter sa ténacité
- **Les microfibres (≈ 10 μ m de longueur et moins)** qui sont ajoutées à la pâte de ciment afin d'améliorer principalement la résistance à la traction.

La longueur où l'on considère les fibres comme microfibres ou macrofibres peut varier en fonction de la composition de la matrice.



(a)

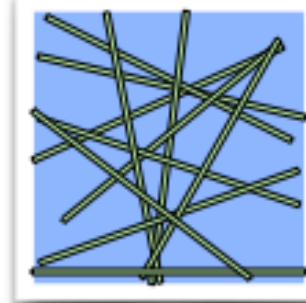


(b)

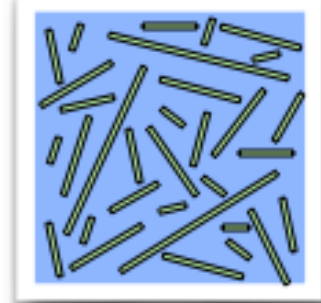
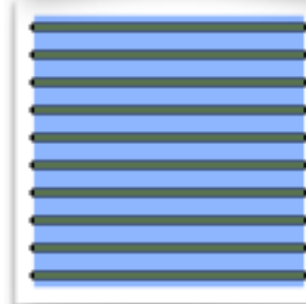


(c)

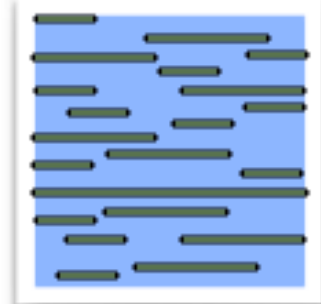
Exemples de renforts en verre : (a) micro-billes creuses, (b) fibres courtes, (c) fibres longues.



(a)

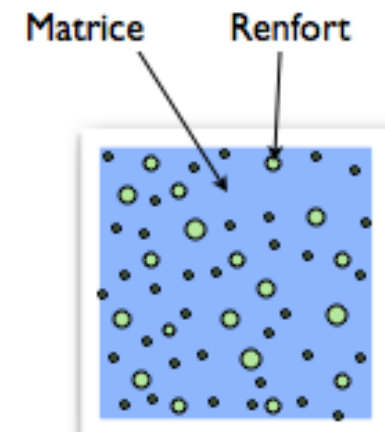


(b)



(c)

Les structures géométriques des composites :
 (a) fibres longues,
 (b) fibres courtes,
 (c) particules



Fibres ou charges ?

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...).

Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

On désigne sous le nom général de charge **toute substance inerte**, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, **permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface** ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

Exemples:

- **Les talcs** sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage. Ils sont la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques

Le gel-coat

Le gel-coat (manteau de gel) = **un revêtement** à base de résine thermodurcissable, pulvérisé dans le moule, qui constitue la surface lisse et colorée d'une pièce.

Il est utilisé pour fournir une haute finition. Il fait donc office de vernis

D'une épaisseur de 0,5 à 0,8 mm, il est conçu pour être durable, procurant une tenue aux UV et à l'hydrolyse (résistance aux intempéries).

Un gelcoat ou enduit gélifié¹ est
un matériau à base de résine synthétique, utilisé pour fournir une haute finition et protection
de la surface visible d'un matériau composite



Pour résumer

Composition : Une pièce composite est constituée de 3 éléments essentiels :

1. **le gelcoat** (qui assurent un revêtement de surface esthétique et une résistance aux intempéries.
2. **la fibre** qui assure la tenue mécanique.
3. **la résine** qui assure la cohésion de la structure.

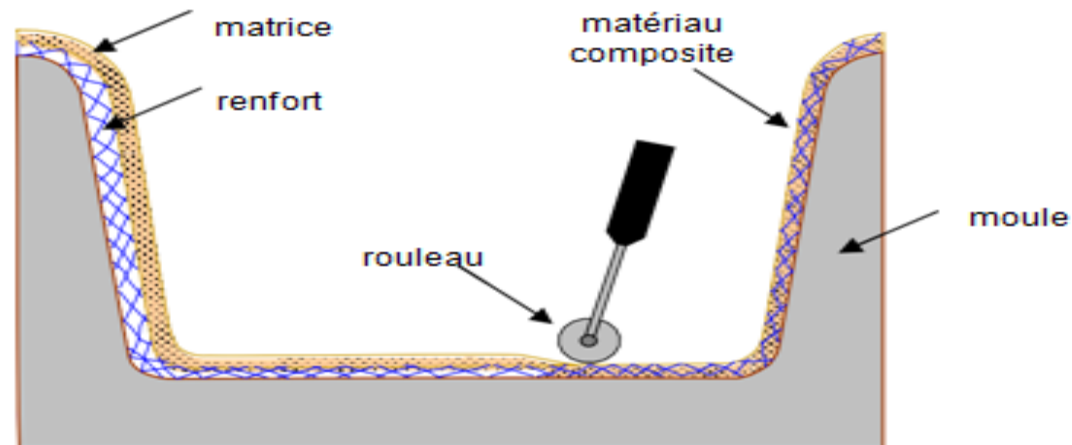
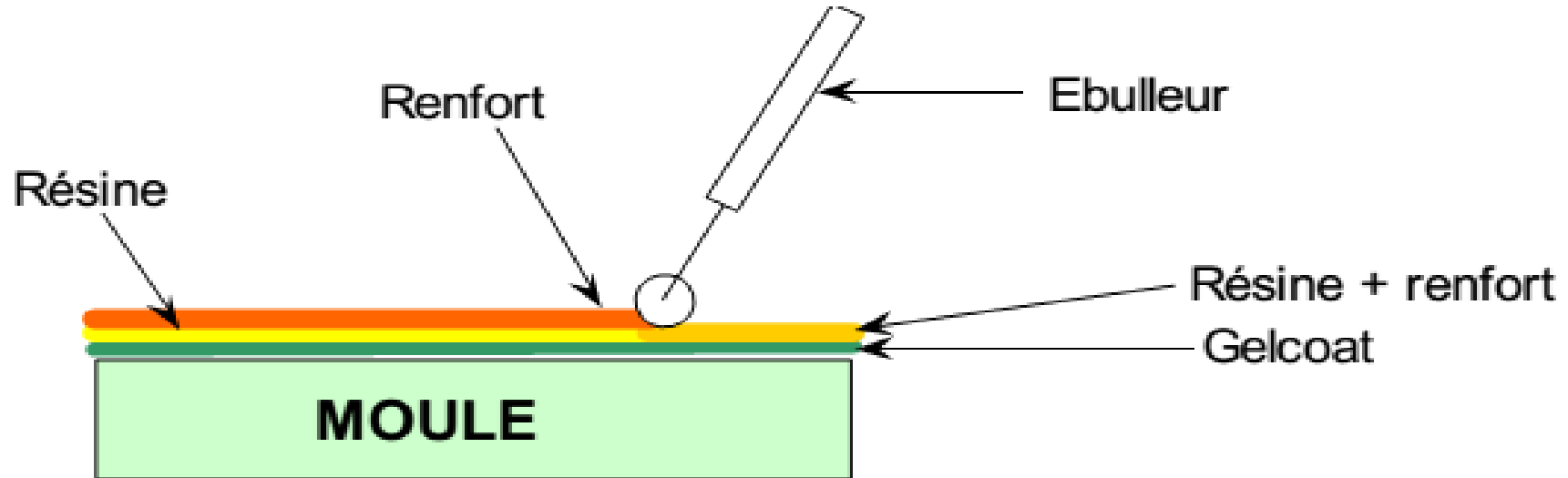
Les atouts des composites :

- Légèreté (5 fois plus léger que l'acier)
- Rigidité (plus rigide que l'acier)
- Résistance mécanique
- Durée de vie,
- Étanchéité,
- Liberté de formes,
- Tenue dimensionnelle,
- Isolation électrique et thermique,
- Résistance aux chocs
- Tenue au feu

Moulage au contact

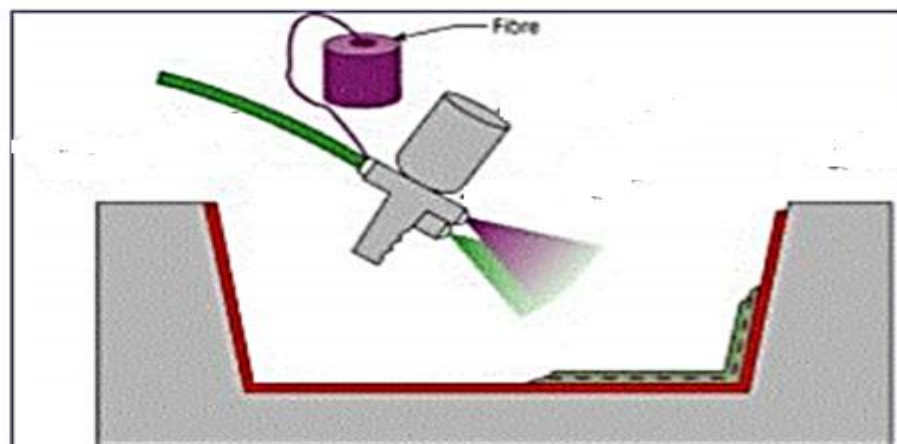
Principe :

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

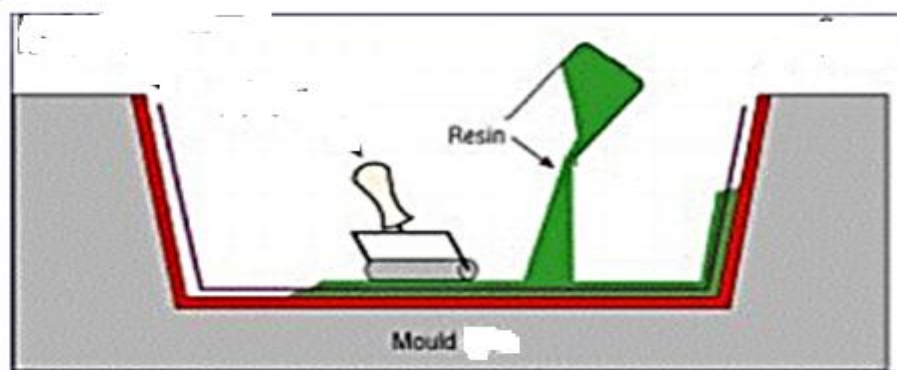


Techniques à la main

- **A jet** : jet en pression de résine et fibres courtes



- **Par roulage**:
résine roulée sur une couche
de fibres pré-appliquées
au moule

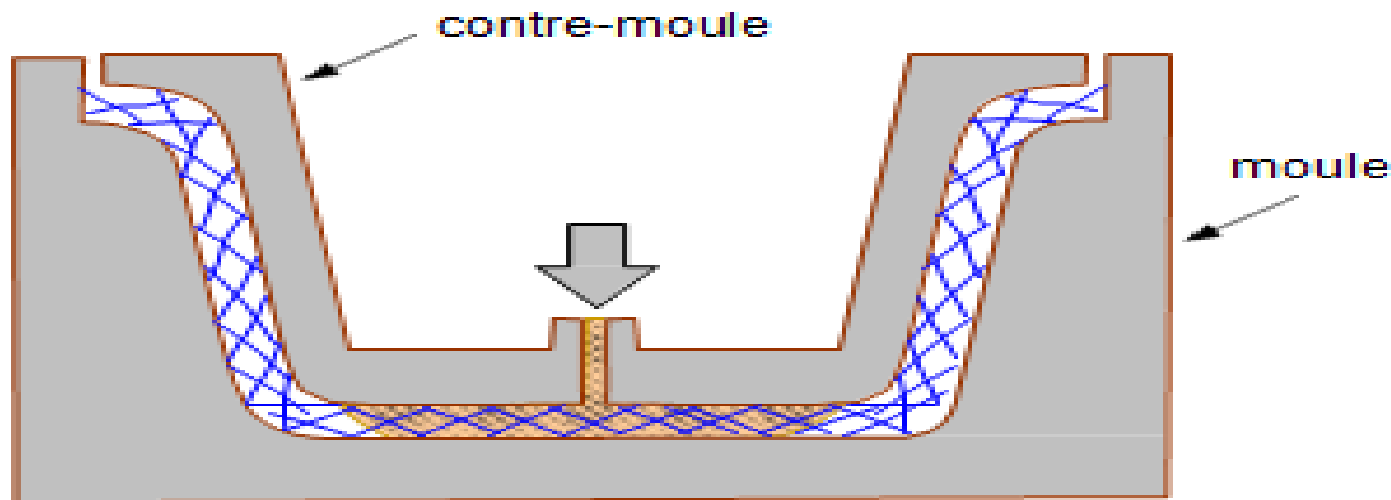


- Normalement, la polymérisation se fait par catalyseur, à froid

Moulage par injection de résine

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.



Moulage par injection de résine.

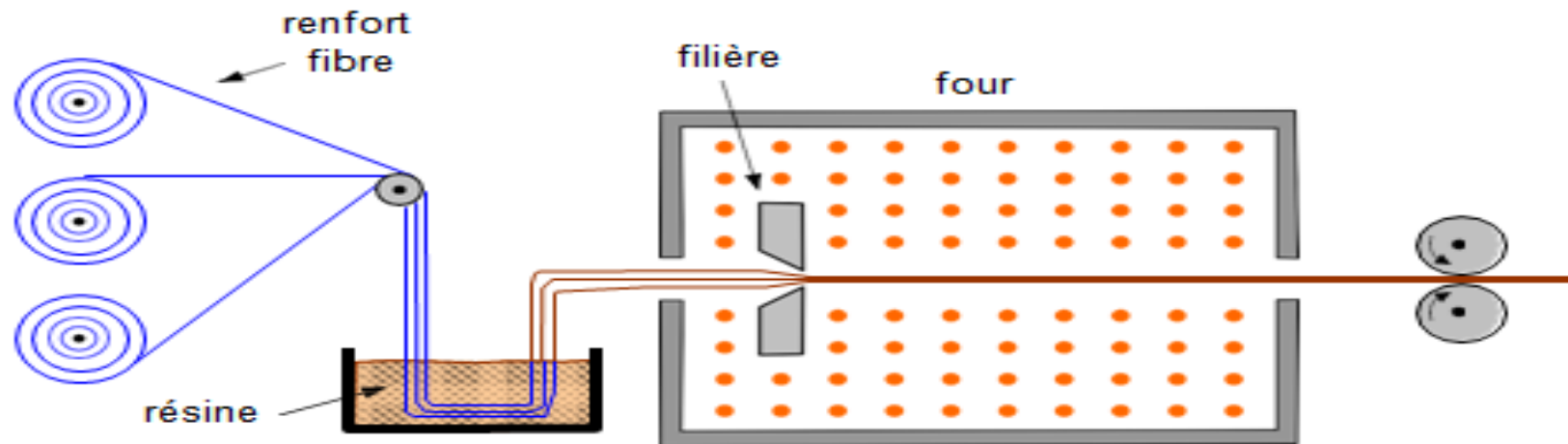
Moulage par pultrusion

(qui signifie « tirer » : « extrusion ») : L'extrusion est un procédé de fabrication en continu de profilés plastiques ou métalliques dans lequel la matière est poussée à travers une filière ayant une forme particulière

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale.

Dans cette technique, les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine.

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.



Moulage par pultrusion.

Pré-imprégnés

- Le stratifié est préparé à froid, par superposition des plis pré-imprégnés
- Le stratifié est mis en autoclave ou dans une presse chauffante pour polymériser sous pression

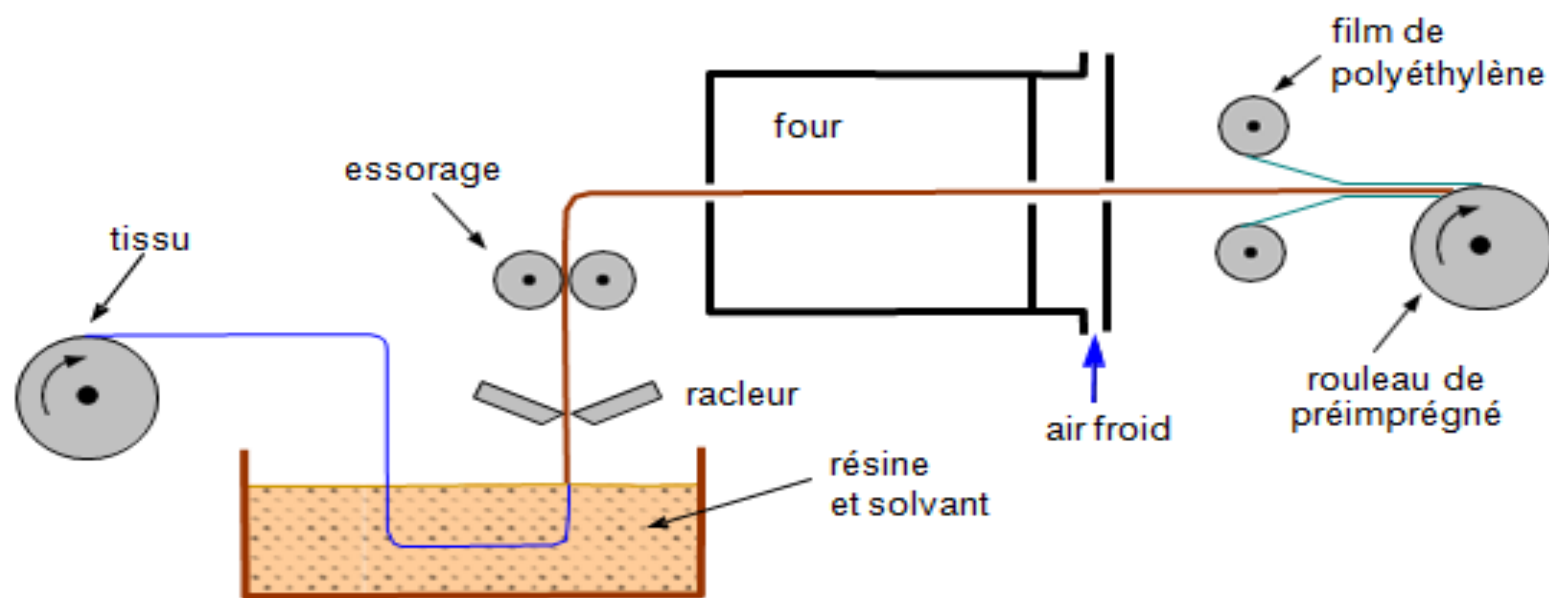
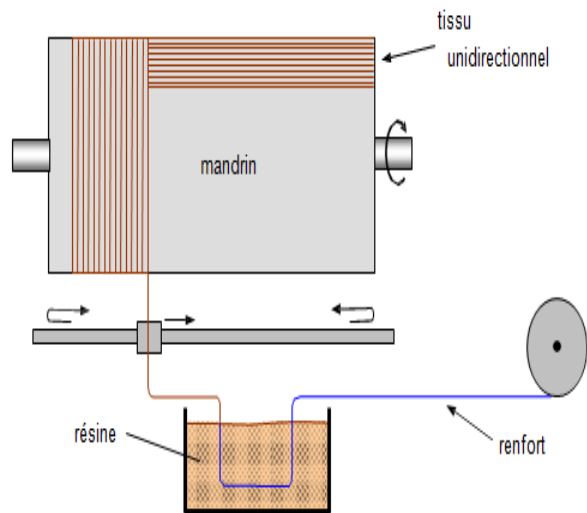


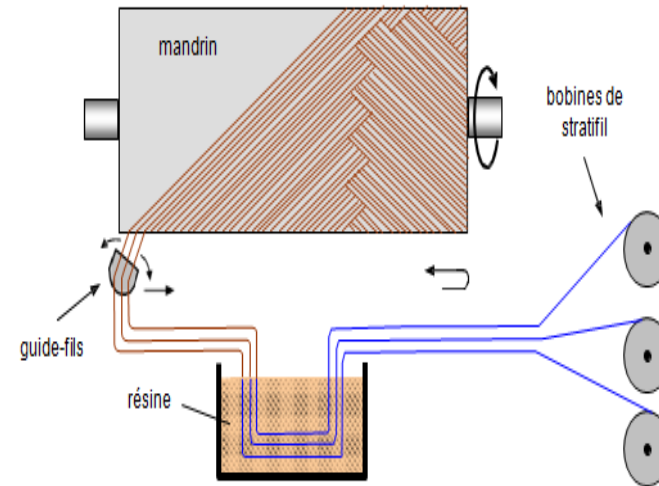
Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné.

Enroulement filamentaire

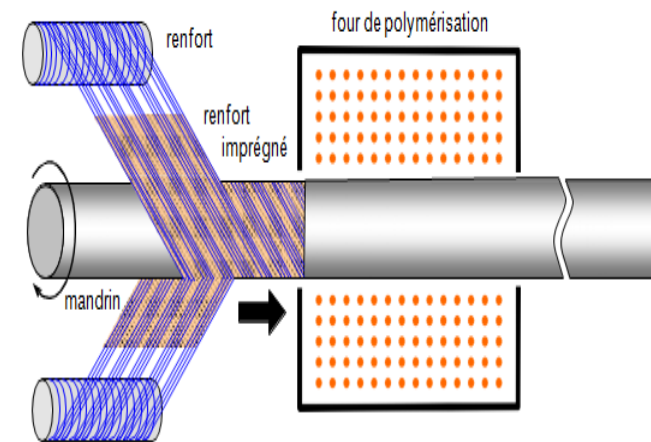
- Technique de réalisation de pièces à symétrie de révolution ou de forme à section convexe
- La fibre est pré-imprégnée de résine et ensuite enroulée sur un mandrin qui donne la forme recherchée
- La polymérisation peut être à froid, à chaud, par rayons UV etc.
- Technique très employée pour construire des réservoirs en pression



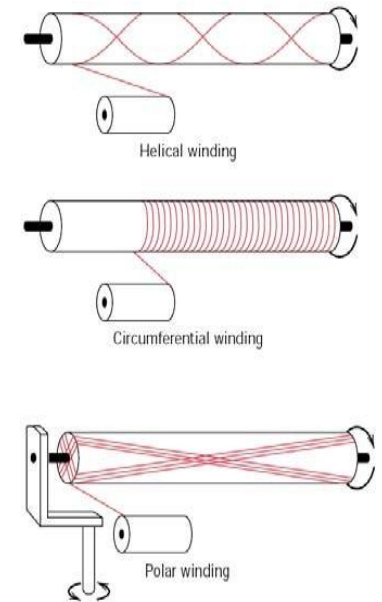
Principe de l'enroulement circonférentiel.



Principe de l'enroulement hélicoïdal.



Enroulement hélicoïdal continu.



Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min).

— le renfort : fibres coupées ou stratifil coupé;

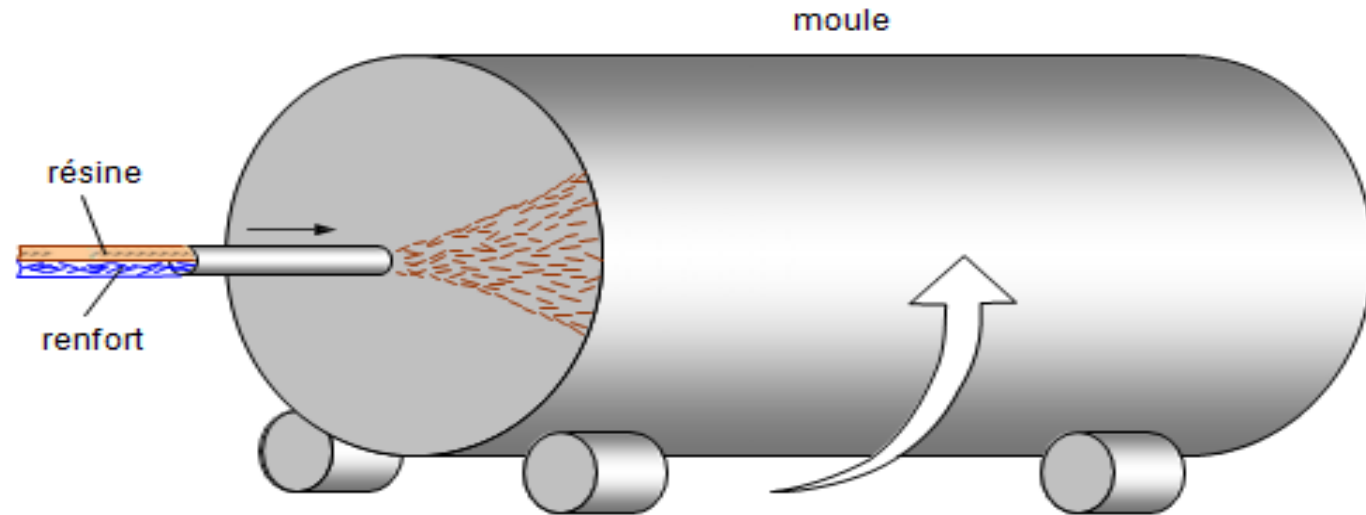
— la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule.

La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule.



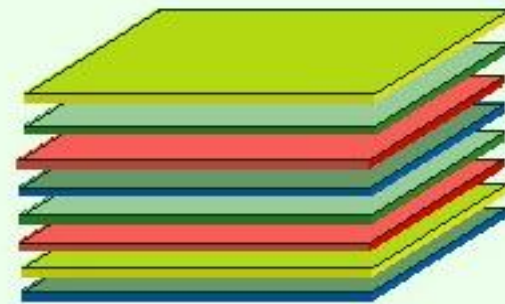
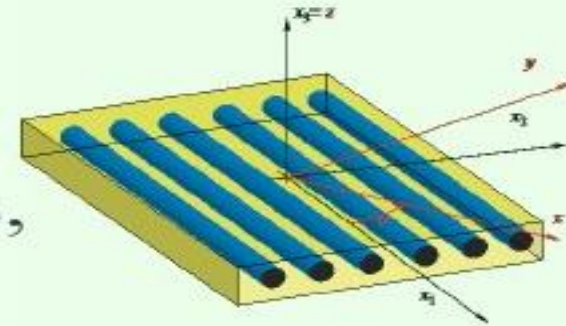
Moulage par centrifugation.

Les stratifiés

- Les stratifiés sont, avec les panneaux sandwich, les matériaux composites qui ont les meilleures performances structurales
- L'idée de base est celle de superposer des couches anisotropes, renforcées avec des fibres longues, uni- ou bi- directionnelles, en orientant les couches de sorte à **obtenir un matériau final ayant les propriétés souhaitées**, en terme de comportement élastique, rigidité, résistance etc.
- La **conception du matériau** devient donc une phase de la conception structurale
- Dans la suite, on s'intéressera à certains problèmes de conception optimale des stratifiés

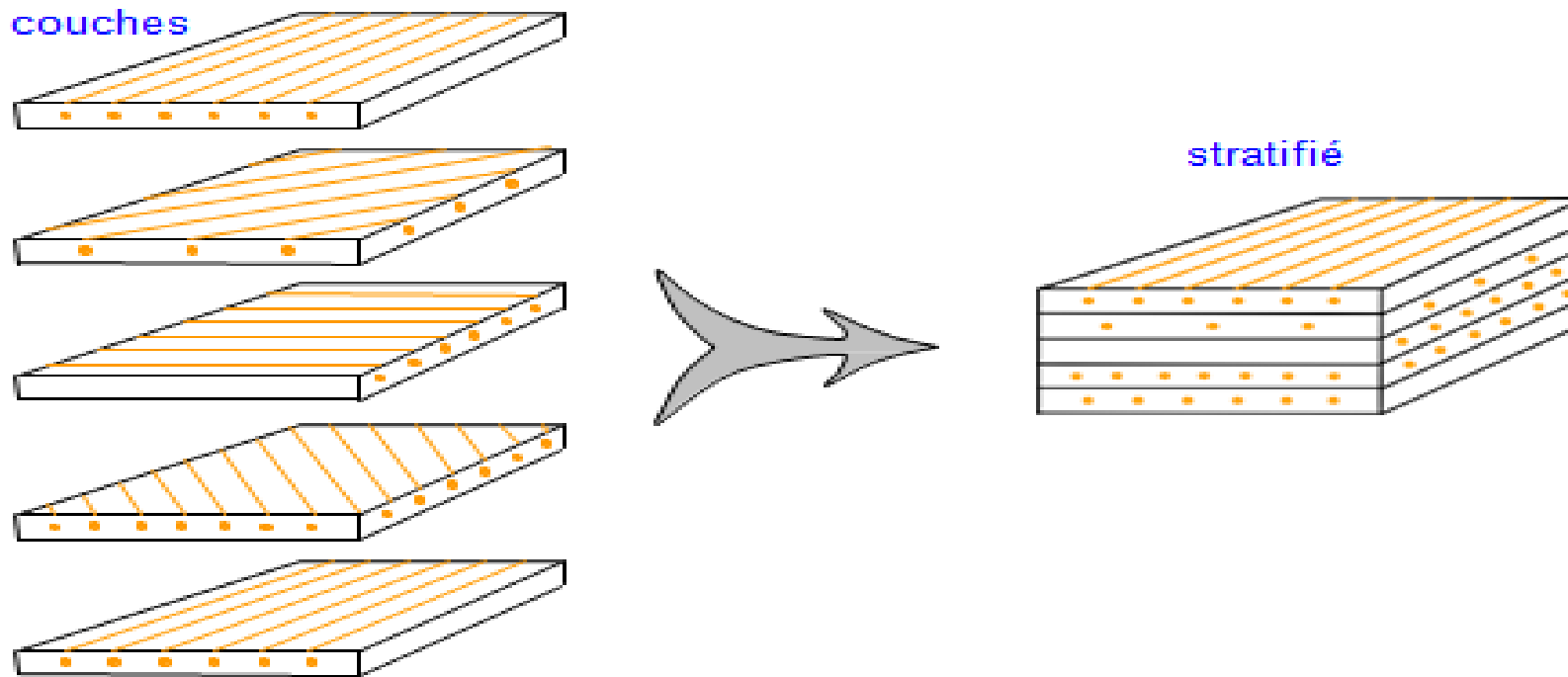
La conception d'un stratifié

- La conception d'une structure en composite comporte la **conception du matériau même**
- Paramètres de la conception: phases, orientations, nombre de couches etc.
- Problèmes typiques de la conception optimale d'un stratifié: minimisation du poids, maximisation de la rigidité et/ou de la résistance, de la charge critique, de la fréquence des vibrations, minimisation des contraintes de délaminage etc.



Stratifiés

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



Constitution d'un stratifié.

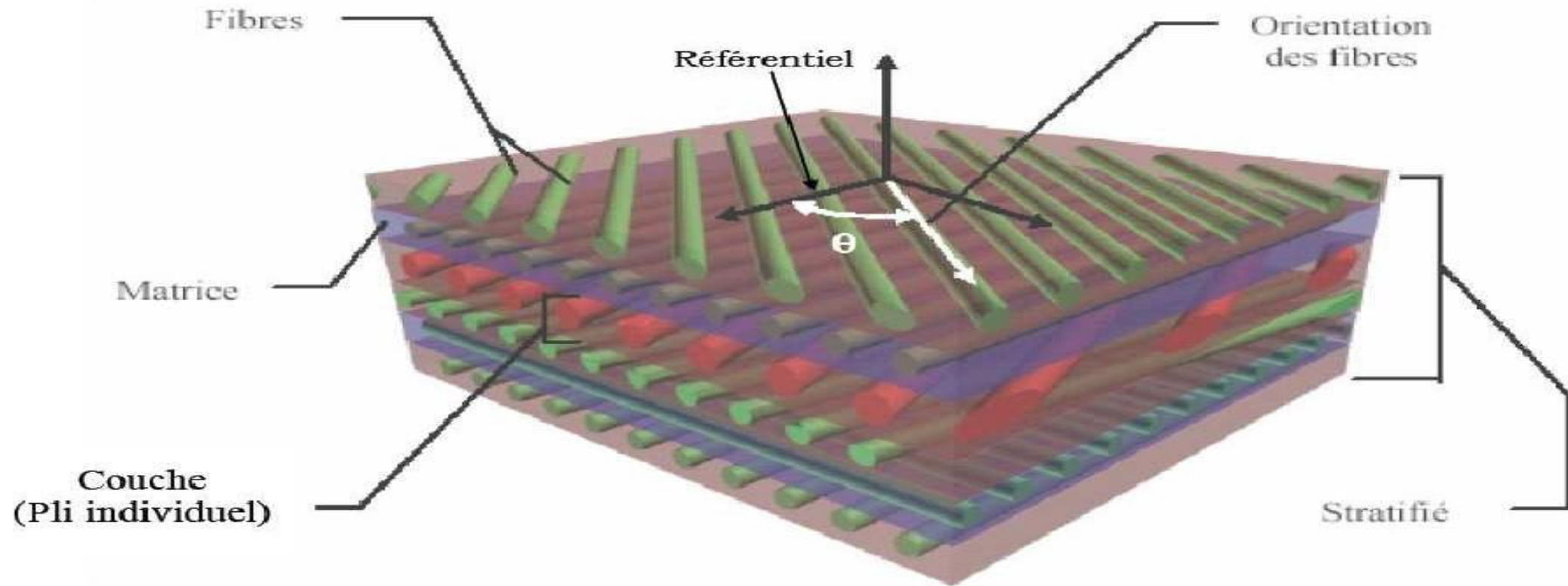
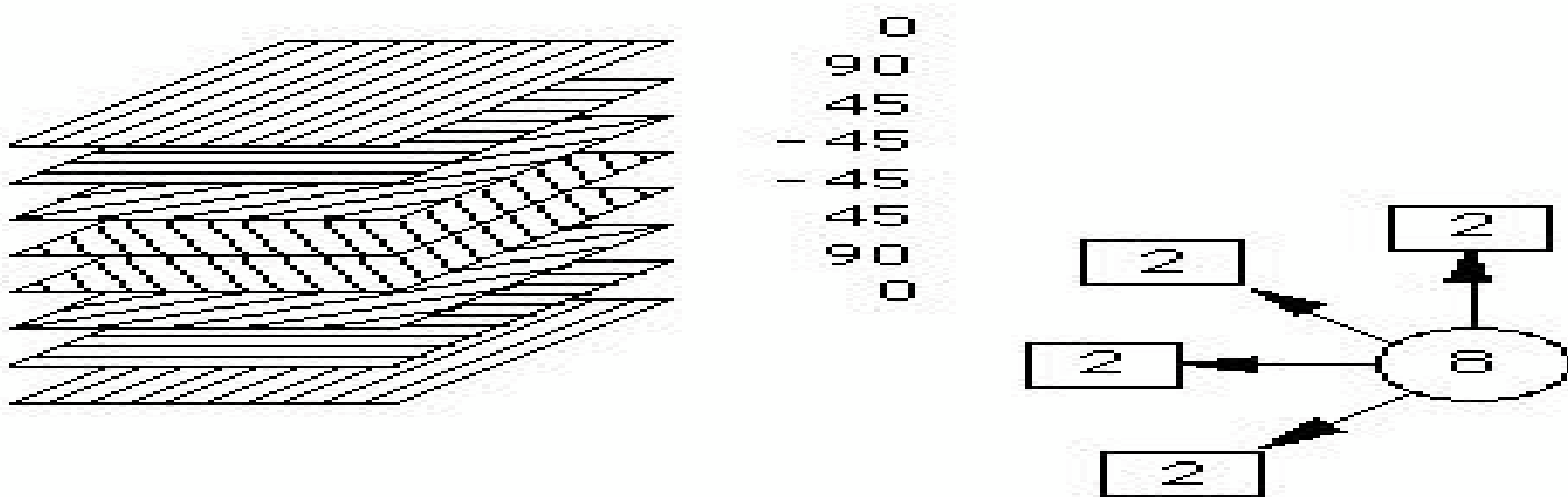


Figure : Composite stratifié.



[0/90/45/-45/-45/45/90/0]

ou

[0/90/45/-45₂/45/90/0]

ou

[0/90/45/-45]₈

Exemple de désignation d'un composite stratifié.

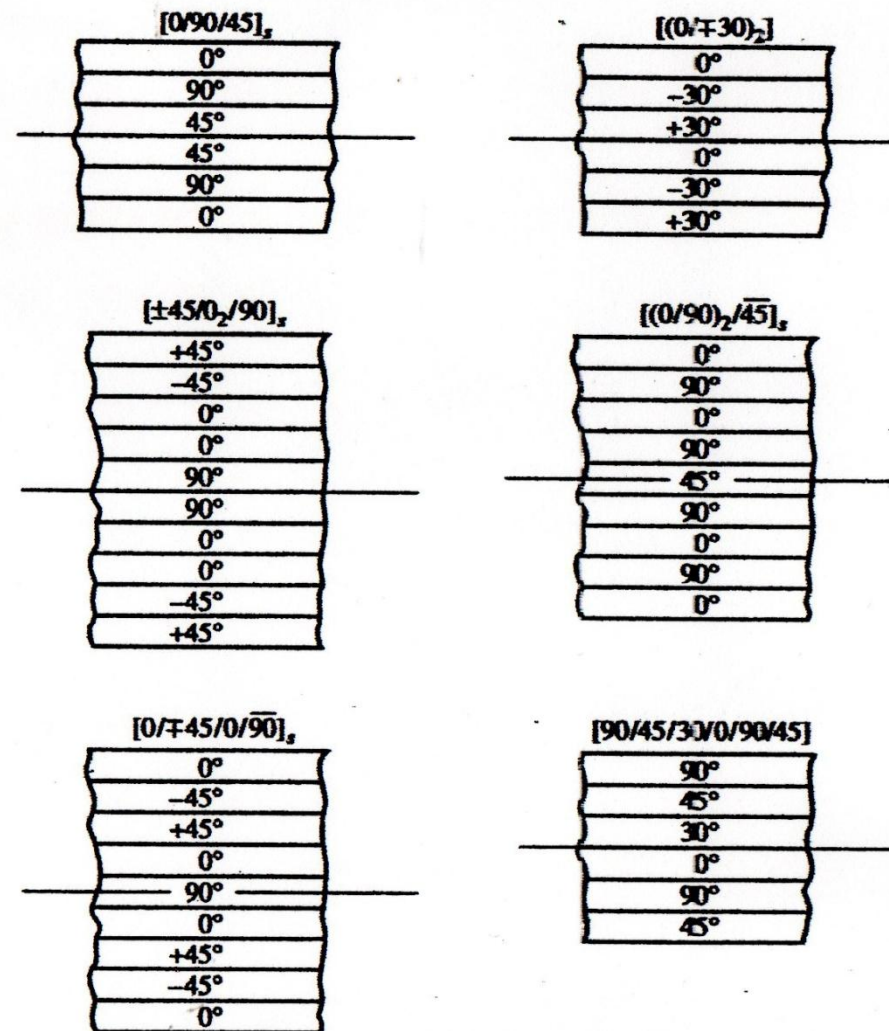
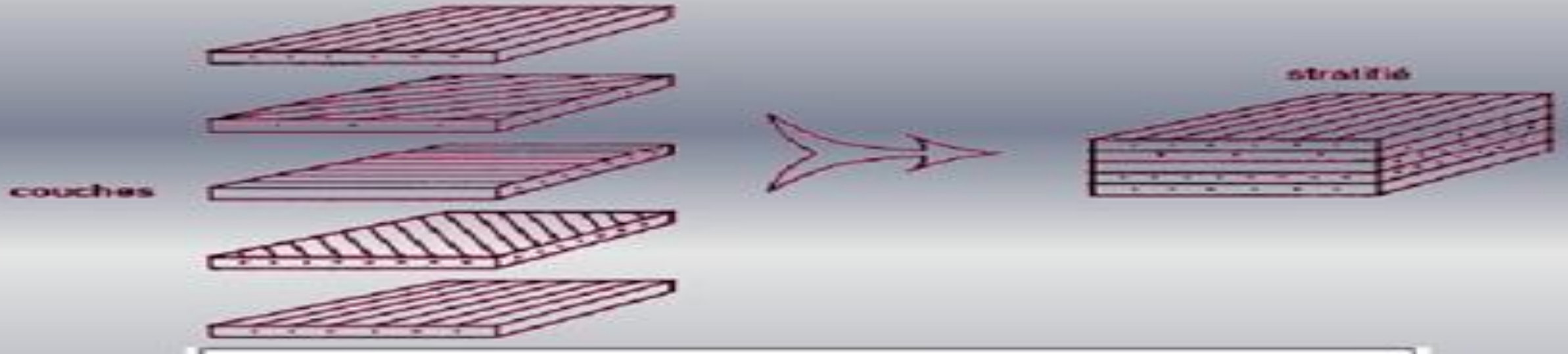


Figure Quelques exemples d'empilement

Stratifié



Sandwich

