



Matériaux composites

PARTIE 1 : Généralités sur les matériaux composites

Chapitre 1 : Généralités, constituants et architecture



Introduction

✓ L'utilisation des matériaux composites dans la réalisation des structures offre aux concepteurs des possibilités « nouvelles », car les composites structuraux ont de très bons rapports rigidité/densité (K/ρ) ou (E/ρ) et résistance (contrainte à rupture)/densité.

✓ Leur utilisation impose par contre, d'un côté la prise en compte de phénomènes et comportements nouveaux par rapport aux matériaux classiques et d'un autre côté la nécessité de concevoir les matériaux par rapport à l'usage prévu mais ceci est aussi un avantage considérable.

➔ Des processus nouveaux de **conception, d'industrialisation et de fabrication des matériaux composites** doivent encore être développés afin de permettre d'étendre les possibilités techniques (innovation technologique), et de mieux satisfaire aux besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

Pourquoi les matériaux composites?

✓ Principaux avantages des matériaux composites:

- Légèreté
- Résistance et rigidité
- Possibilité de concevoir le matériau selon la nécessité
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques)
- Grande résistance à la fatigue et à la traction
- Très peu sensibles ou insensibles aux produits chimiques « mécaniques » tels que les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

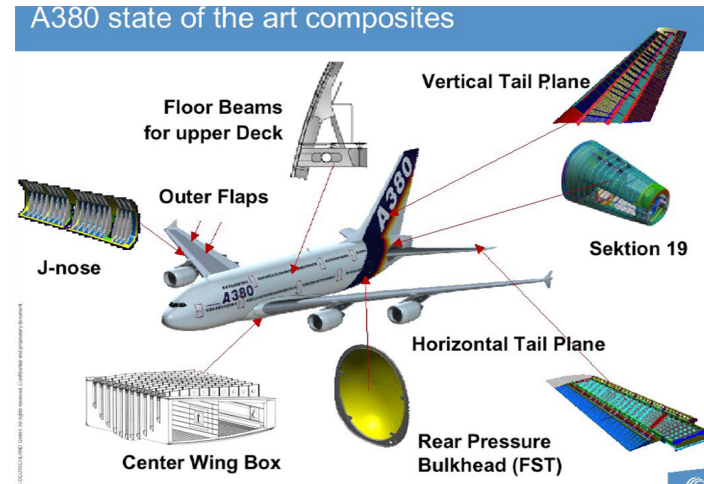
✓ Inconvénients des matériaux composites:

- Sensibilité aux agents atmosphériques (rayons UV, humidité, température)
- Faible tenue au feu
- Tenue à la compression et aux chocs, comportement à la rupture
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour les grandes séries

Pourquoi les matériaux composites?

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

- Aérospatiale
- Aéronautique
- Applications marines
- Défense
- Sport
- Biomécanique...



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

Qu' est ce qu' un matériau composite?

▪ Définition générale :

*Un matériau composite est constitué de l'assemblage de matériaux de natures différentes c'est-à-dire **non miscibles**, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.*

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de 2 ou plusieurs parties différentes " : **les phases** qui sont généralement distinguées en :

- Matrice
- Renforts : fibres ou charges

Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases.

Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de **résistance mécanique aux efforts**.

La matrice assure quant à elle **la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques**.

- Caractéristiques mécaniques fondamentales des composites :
 - l' hétérogénéité
 - l' anisotropie (pas toujours)

2 grands types de composites

▪ Les composites grande diffusion (GD)

- Les GD représentent 95% des composites utilisés.
- Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%.
- Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes.
- Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (+ de 99% des renforts utilisés !).
- Renforts et matrices sont à des coûts voisins.

▪ Les composites haute performance (HP)

- Les HP, principalement utilisés dans l'aéronautique sont d'un coût 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 coût.
- Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, contrairement aux GD.

Exemples de composites

Même si considérés comme des matériaux modernes, les composites sont en réalité utilisés depuis très longtemps et ils ont été le résultat des idées nées pour la nécessité de résoudre des problèmes divers:

- Brique en argile et torchis
- Les alliages comme le bronze
- ...

	CONSTITUANTS	DOMAINES D'APPLICATION
<i>1. Composites à matrice organique</i> Papier, carton Panneaux de particules panneaux de fibres Toiles enduites Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés	résine/charges/fibres cellulosiques Résine/ copeaux de bois résine/ fibres de bois Résines souples/tissus Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone... résines/microsphères	Imprimerie, emballage, etc... Menuiserie Bâtiment sports, bâtiment Automobile Domaines multiples
<i>2. Composites à matrice minérale</i> Béton Composites carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/ Fibres de carbone Céramique/ fibres Céramiques	Génie civil Aviation, espace, sports, biomédecine... Pièces thermo-mécaniques
<i>3. Composites à matrice métallique</i>	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace Espace
<i>4. Sandwiches</i> peaux Ames	Métaux, stratifiés, ... Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, ...	Domaines multiples

Exemples de composites

Rappel: Les paramètres synthétiques d'évaluation des performances mécaniques d'un composite sont les rapports E/ρ et σ_{lim}/ρ . Dans le tableau suivant, on trouve des valeurs typiques.

	Materiau	ρ kg/m ³	E MPa	σ_u MPa	E/ρ (A) MN m/kg	σ_u/ρ (B) kN m/kg	ρ/ρ_{ac}	E/E_{ac}	$\sigma_u/\sigma_{u\ ac}$	A/A_{ac}	B/B_{ac}
Forme massive	Acier	7850	210000	360	26,75	45,86	1	1	0,171	1	0,171
	Acier haute résist.	7850	210000	2100	26,75	267,52	1	1	1	1	1
	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
	Béryllium	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
	Beryllium	1830	300000	1700	163,93	928,96	0,23	1,43	0,810	6,13	20,26
Matrices	Polyèsteres	1200	3000	80	2,50	66,67	0,15	0,01	0,038	0,09	1,45
	Phénoliques	1200	3000	40	2,50	33,33	0,15	0,01	0,019	0,09	0,73
	Epoxydiques	1500	5000	80	3,33	53,33	0,19	0,02	0,038	0,12	1,16
	Polyamides	1140	2500	85	2,19	74,56	0,15	0,01	0,040	0,08	1,63

Classification des matériaux composites Structuraux

Généralement, les composites sont employés sous forme de corps bidimensionnels, plaques ou coques, et en ce qui concerne leur comportement mécanique et l'usage structurel, peuvent être distingués en :

- **Composites à fibres courtes:** *les fibres sont dispersées aléatoirement dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est isotrope,*
- **Composites à fibres longues:** *les fibres sont disposées de façon ordonnée et orientée dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est globalement anisotrope.*

Ces matériaux sont normalement assemblés pour constituer des macro-matériaux composites, qui sont essentiellement de 2 types:

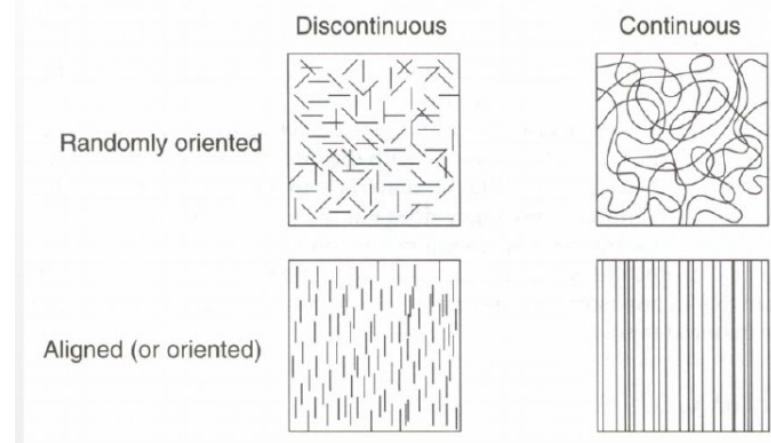
- **stratifiés** *obtenus par empilement de couches en composites orientées de façon différentes ; le comportement mécanique macroscopique doit être conçu,*
- **sandwich** : *panneaux utilisés pour des usages en flexion ; généralement le comportement macroscopique est isotrope dans le plan.*

Classification des matériaux composites Structuraux

1. Suivant la forme des constituants

- les matériaux composites à fibres

Les renforts se trouvent sous forme de fibres qui peuvent être soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes...



L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- la nature des constituants
- la proportion des constituants
- l'orientation des fibres

suivant le cahier des charges imposé.

Classification des matériaux composites Structuraux

1. Suivant la forme des constituants

- les matériaux composites à particules

- Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.
- Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait...

→ Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées.

Exemples:

- Inclusions de plomb dans des alliages de cuivre pour augmenter leur facilité d'usinage.
- Des particules de métaux fragiles dans des métaux ductiles pour augmenter leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.
- Des particules d'elastomères dans les matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leur propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

Classification des matériaux composites Structuraux

2. 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**.

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche.

Parmi ces composites, nous pouvons citer :

1. Composites à **matrice organique** (résine, charges), avec :

- des fibres minérales : verre, carbone, etc
- des fibres organiques : kevlar, polyamide, etc
- des fibres métalliques : bore, aluminium, etc

2. Composites à **matrice métallique** (alliages d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- des fibres minérales : carbone, carbure de silicium, etc
- des fibres métalliques : bore,
- des fibres métallo-minérales : fibres de bores revêtues de carbure de silicium

3. Composites à **matrice minérale** (céramique), avec :

- des fibres métalliques : bore,
- des particules métalliques
- des particules minérales : carbures, nitrures, ...

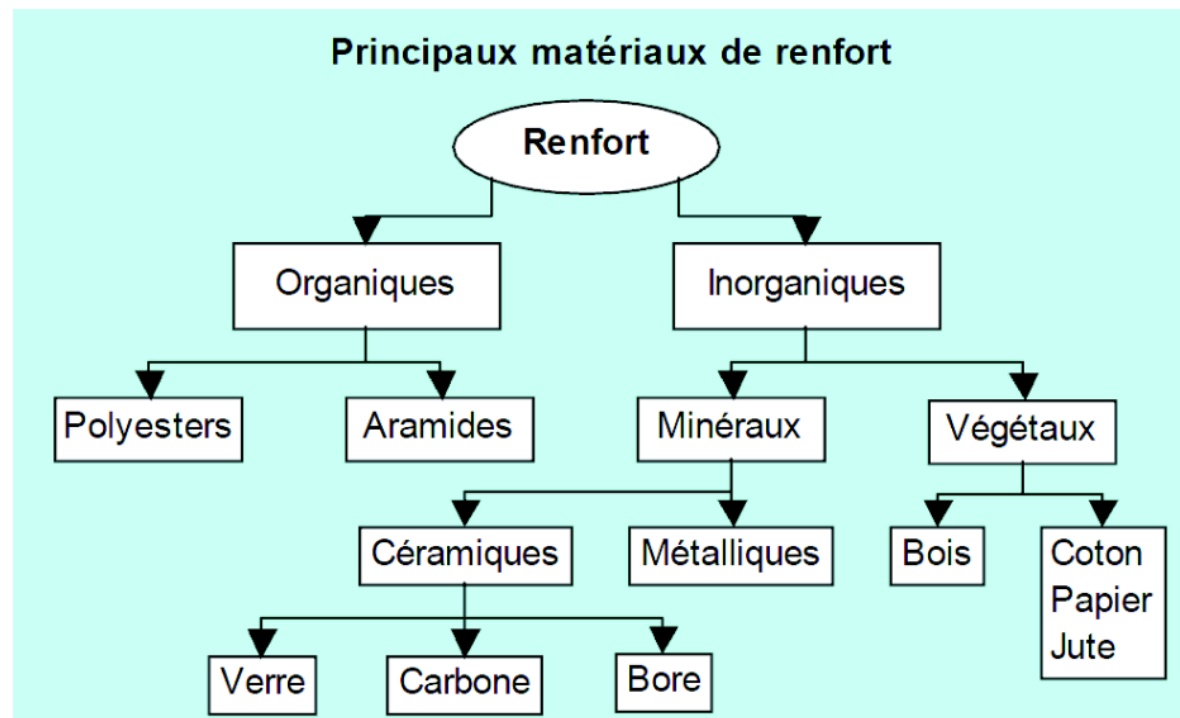
Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice céramique.

Constituants principaux des composites

1. Les renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée.

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).



Constituants principaux des composites

Fibre de carbone

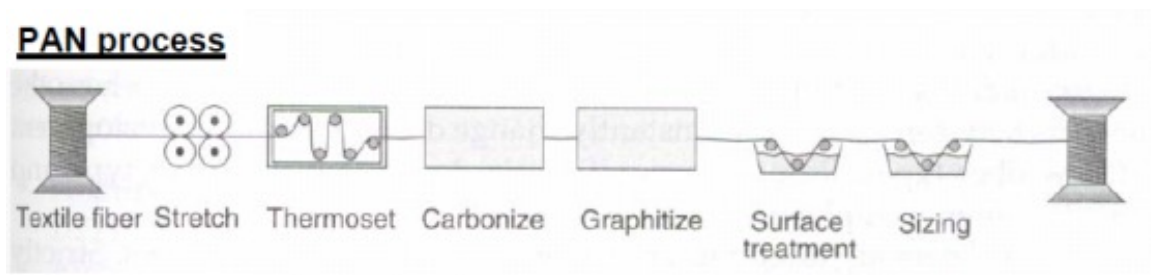


- principalement utilisées pour les composites HP en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs.

- très fortes propriétés mécaniques
- Elaboration à partir d'un polymère de base, appelé **précurseur**.

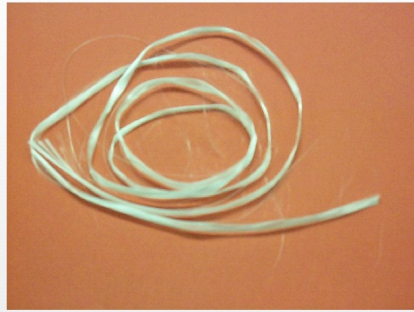
La qualité des fibres de carbone dépend fortement des qualités du précurseur.

- Les fibres précurseurs utilisées :
 - fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN).
 - le Brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille.
- **Limitation de leur utilisation** : un allongement à la rupture insuffisant (inférieur à 2%) comparé à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4%)



Constituants principaux des composites

Fibre de verre



Excellent rapport performance - prix → premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

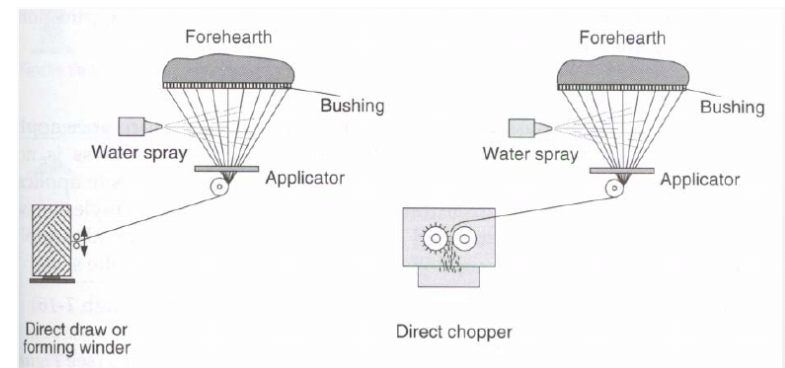
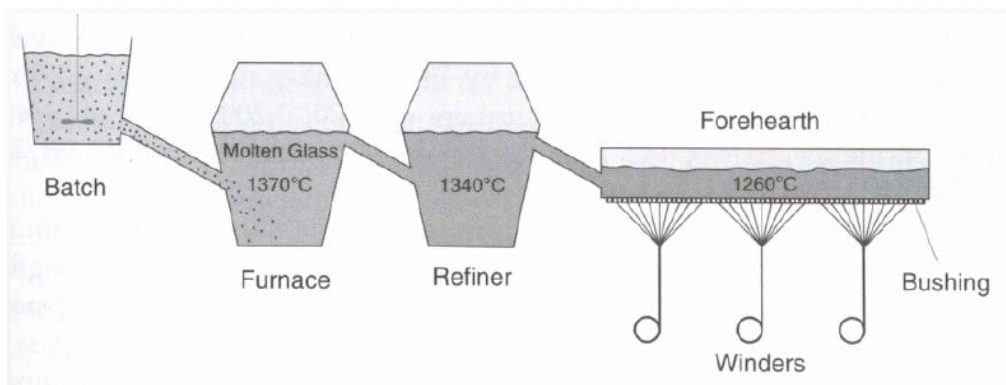
Les fibres de verre sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1250°C à travers une filière en platine-rhodium; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues.

Suivant les application auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

- fibres E pour les composites grande diffusion (GD)
- fibres D pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés)
- fibres R pour les composites haute performance (HP).

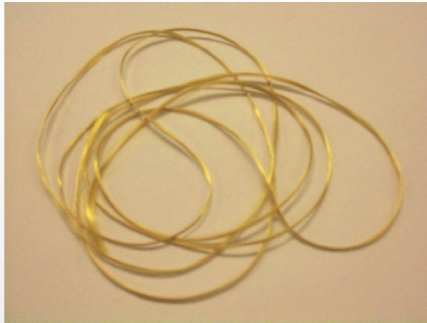
L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par :

- une rigidité insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique
- un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées



Constituants principaux des composites

Fibre aramide



Two trade names: ✓ Kevlar (DuPont)
 ✓ Twaron (Teijin)

Les fibres aramides, souvent appelées KEVLAR propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible.

faible tenue mécanique en compression généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisé.

L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type Verre-Kevlar ou Carbone-Kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ex : ski, raquette de tennis).

Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances

Constituants principaux des composites

Fibres céramiques : bore et Sic

Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée (500°C - 2000°C).

Fibres 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.

Leur champ d'application est limité par leurs principales faiblesses :

- mauvaise résistance à la température (fluage dès 90°C; l'aramide ne se dégrade qu'à 400°C)
- mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice

Constituants principaux des composites

Fibres naturelles (lin, chanvre, mais également sisal, miscanthus)

Elles pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées.

En outre :

- leurs propriétés mécaniques pourraient atteindre celles des fibres de verre (module de Young)
- la fibre se travaille très facilement avec les technologies du textile (tissage)

Elles présentent encore plusieurs verrous techniques majeurs pour une utilisation massive dans les matériaux composites :

- elles ne sont pas fabriquées par un processus industriel et la reproductibilité de leurs caractéristiques physiques ne peut donc pas être parfaitement maîtrisées
- la quantité et la qualité dépendent de l'environnement et de l'humidité (reprise jusqu'à 8 ou 10% du taux d'humidité)
- elles sont difficilement calibrables et plus difficilement manipulables que les fibres de verre (en particulier pour le lin)
- leurs caractéristiques mécaniques (résistance à la traction) moyennes ont engendré plusieurs échecs dans les projets d'intégration des composites à fibres naturelles dans l'automobile

Certains producteurs de non-tissés appliquent des procédés textiles traditionnels aux fibres naturelles pour des applications de basse ou moyenne gamme.

Constituants principaux des composites

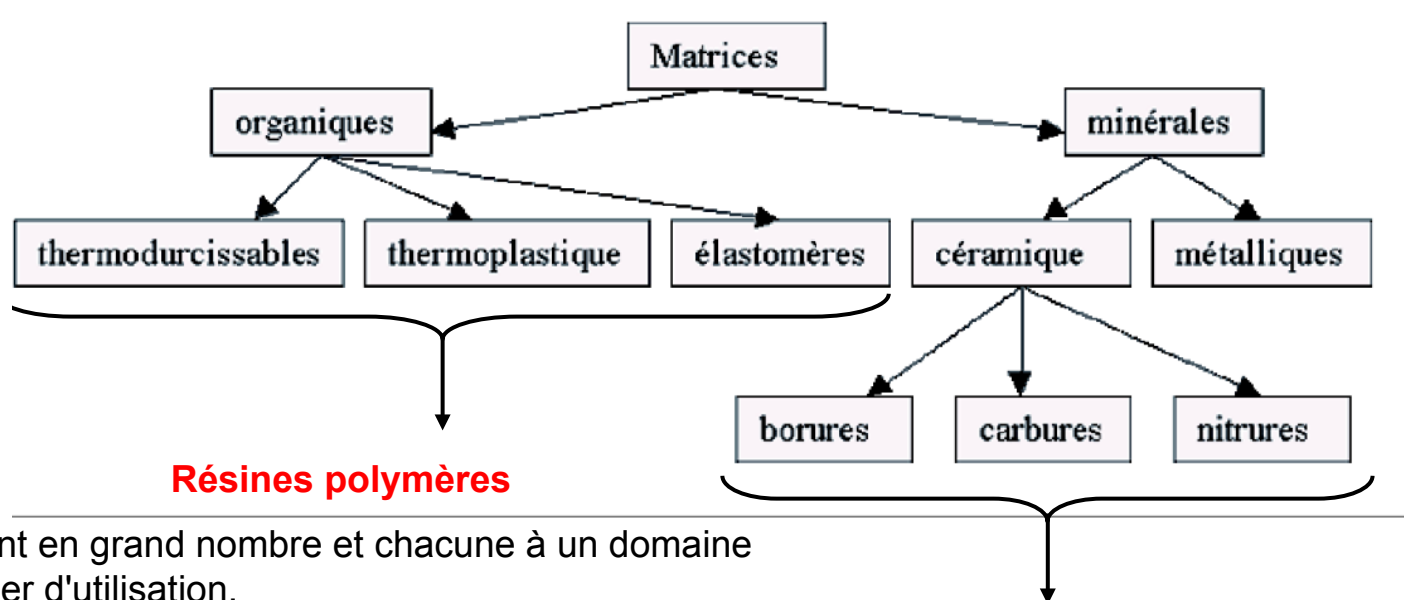
Caractéristiques mécaniques de fibres

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻⁵
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻⁵
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻⁵
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

Constituants principaux des composites

2. Les matrices

La matrice a pour rôle de **lier** les fibres renforts, **répartir** les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.



- Existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation.
- On utilise surtout des **résines thermodurcissables** (70%) (TD) que l'on associe à des **fibres longues**, mais l'emploi de polymères **thermoplastiques** (TP) renforcés de **fibres courtes** se développe fortement.

Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés.

Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteintes.

Constituants principaux des composites

2.1 Les matrices polymères

Différences fondamentales entre matrice thermodurcissable et matrice thermoplastique :

- 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"

Constituants principaux des composites

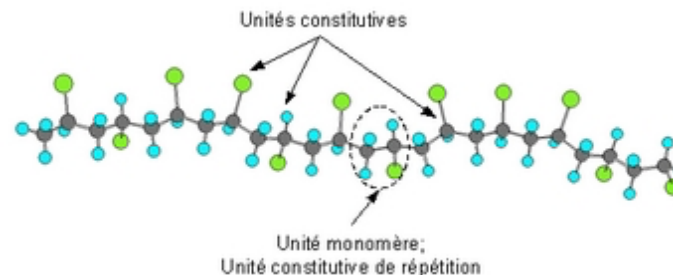
La **polymérisation** désigne la réaction chimique ou le procédé par lesquels des petites molécules réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées. Les molécules initiales peuvent être des monomères ou des pré-polymères ; la synthèse conduit à des polymères.

En général, en présence de réactifs et de catalyseurs, et sous l'action de la chaleur et de la pression, il se forme des chaînes macromoléculaires constituées de motifs de répétition identiques ou différents, liés de façon covalente.

On obtient des polymères, de masses molaires éventuellement élevées : ▪ *monodimensionnels* car issus de monomères bivalents ; ▪ ou *tridimensionnels*, issus de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux, ou de la réticulation de polymères monodimensionnels.

On distingue les polymères synthétiques comme le polyéthylène, par opposition aux polymères d'origine naturelle tels la cellulose et les artificiels qui sont préparés par modification chimique de polymères d'origine naturelle.

Définition provenant du site <http://dictionnaire.education/fr/polymerisation>



Constituants principaux des composites

2. 1 Les matrices polymères

Paramètres importants pour choisir un polymère en tant que matrice :

- la facilité de mise en œuvre
- les propriétés mécaniques
- les propriétés thermiques
- le coût

2.1.1 Les résines thermodurcissables

- propriétés mécaniques élevées.
- ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.
- Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants.

Matrices thermodurcissables classiques:

- Polyester insaturé
- VinylEster
- Epoxy
- Résines phénoliques
- polyuréthane...

Constituants principaux des composites

les polyesters insaturés :

les plus utilisées dans les applications GD.

AVANTAGES:

- bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé
- facilité de mise en œuvre
- bonne tenue chimique
- faible coût de production...

INCONVENIENTS:

- émission des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation
- difficile à stocker
- tenue médiocre en température (inférieure à 120°C en service continu)
- sensibilité à la fissuration notamment en cas de chocs
- retrait important de l'ordre de 8 à 10%
- dégradation à la lumière par les UV
- inflammabilité...



Coques et ponts des bateaux à voiles sont souvent fabriqués en polyester insaturé renforcés par des fibres de verre

Constituants principaux des composites

Vinylester:

- Variante des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique donc chimiquement très proche.
- Également chimiquement proche des résines époxy
- Représente un compromis entre les 2 en combinant la simplicité et la rapidité de polymérisation des polyesters insaturés avec les propriétés thermique et mécanique des epoxy.
- bonne tenue à la fatigue
- bon comportement à la corrosion
- combustible



Les pales d'éoliennes sont souvent fabriquées en vinylester renforcé par des fibres de verre

Constituants principaux des composites

Résine Epoxy:

résine type des composites HP.
En effet, elles conduisent à un ensemble de performances élevées.

AVANTAGES:

bonnes propriétés mécaniques supérieures à celles des polyesters,
bonne tenue aux températures élevées,
Excellente résistance chimique,
faible retrait au moulage...

INCONVENIENTS:

- temps de polymérisation long,
- coût élevé,
- sensibilité à la fissuration.
- longues durées de transformation et surtout de cuisson (de plusieurs heures à plusieurs dizaine d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100°).



Les ailes des avions de combat sont souvent fabriquées avec de la résine époxy renforcée par des fibres de carbone

Constituants principaux des composites

1. 1 Les matrices polymères

1.1.2 Les résines thermoplastiques

Ces résines

- sont **solides** et nécessitent une **transformation à très haute température**.
- présentent à l'état vierge de **bonnes caractéristiques mécaniques**

Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Toutefois, l'appellation «composite» n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes qui représentent pourtant 90% des composites à matrice thermoplastique.

Matrices thermoplastiques classiques:

- Polypropylène (PP)
- Polyéthylène (PE)
- Polystyrène (PS)
- Polycarbonate (PC)
- Polychlorures de vinyle (P.V.C.),
 - Polyamide (PA)
 - Polyketones
- Polyesters thermoplastiques(saturés)
 - Polyimides thermoplastiques

Constituants principaux des composites

PolyPropylène:

Le PolyPropylène est très souvent utilisé renforcé par des fibres de verre dans les applications industrielles. De tels composites sont souvent cachés de la vue. Ces dernières années, le PolyPropylène est devenu la plus commune des matrices thermoplastiques, en parlant de masse produite pour des applications structurales, incluant les composants automobiles.



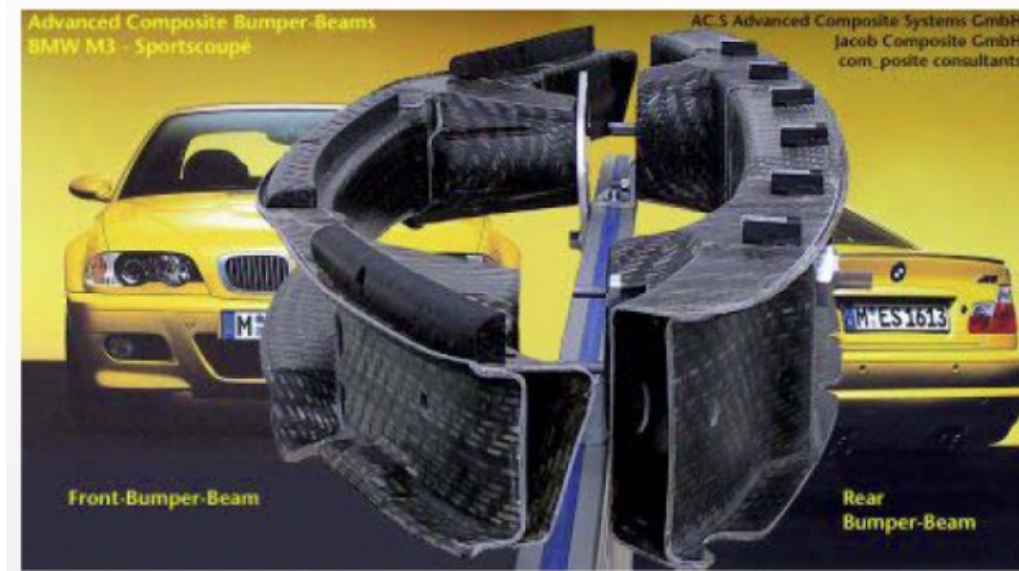
*Pièce de façade automobile
fabriquée en PP renforcé par
des fibres de verre*

Constituants principaux des composites

Polyamides

Dans les applications composites, le polyamide est normalement renforcé par des fibres de verre et utilisé dans des applications similaires à celles du PP/fibres de verre, mais où une plus haute tolérance à la température ainsi que de meilleures propriétés mécaniques sont requises.

Un point important est que la plupart des polyamides sont hygroscopiques c'est-à-dire qu'ils absorbent l'eau.



Pare-chocs fabriqués en PA renforcé par des fibres de verre

Constituants principaux des composites

2. 2 Les caractéristiques mécaniques moyennes des matrices polymères

Résines	nom	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	R (MPa)	α $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	Prix (F/kg)
TD	Polyester	1300	3800	0.37	88	100	15
	Vinylester	1200	3500	0.35	81	65	18
	Epoxyde	1220	5200	0.38	121	40	40
	Silicone	1550	1000	0.45	3	30	200
	Polyimide	1217	3450	0.35	80	36	150
	Phénolique	1350	3000	0.36	70	80	10
	Polyamide	1130	1900	0.33	70	85	25
TP	Polycarbonate	1100	2300	0.33	60	70	30
	Polyester saturé	1310	2800	0.33	55	90	
Métaux	Aluminium	2630	69000	0.33	358	23	13
	Acier XC10	7850	210000	0.29	1000	1000	10
	Cuivre	8940	119000	0.30	350	17	11
	Magnésium	1660	42000	0.30	280	25	27

Constituants principaux des composites

3. Les charges

charges : 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,
- de réduire le prix de revient du matériau transformé.

Ainsi, on peut classer ces charges selon 2 types : **charges renforçantes** et **charges non renforçantes**.

4. Les additifs

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

- lubrifiants et agents de démoulage : pour faciliter le façonnage de la résine et réduire la tendance de la résine à adhérer au moule...
- pigments et colorants
- agents anti-retrait ;
- agents anti-ultraviolets...

Interface renforts/matrice

Ensimage

Les renforts destinés à la fabrication des composites reçoivent un **ensimage**.

L'ensimage est une dispersion aqueuse spécifique comportant un agent collant, un agent pontant et des agents antistatiques, permettant d'assurer différents rôles :

- compatibilité de la liaison fibre - matrice
- cohésion inter filamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable
- protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques)
- élimination des charges électrostatiques dues aux frottements
- augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation

L'ensimage est spécifique pour une résine et un procédé donné.

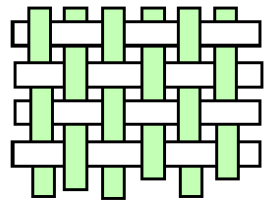
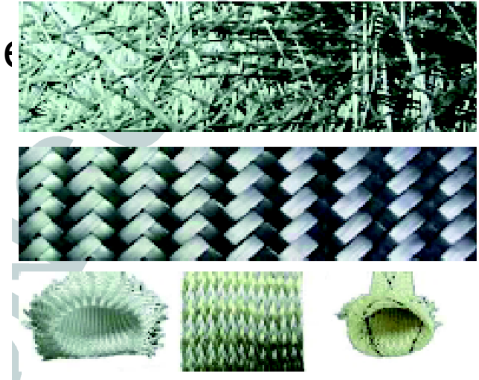
Les principales combinaisons de résine et de renforts

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
Thermodurcissables <u>TD</u>	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthannes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastiques <u>TP</u>	Polypropylènes	GD				
	PA 6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP

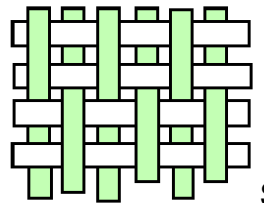
Les architectures de renforcement

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales:

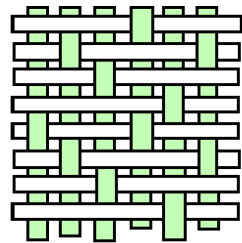
- sous forme linéique (fils, mèches...)
- sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats...)
- sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes...)



Taffetas (plain)



Sergé (twill)



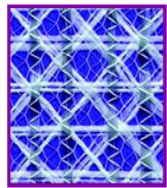
Satin

Ainsi, on rencontre plusieurs architectures de renforcements :

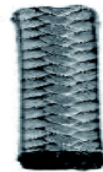
- **unidirectionnelle** : - sans liaison particulière (roving)
- reliées par un fil (nappes)
- **multidirectionnelle aléatoire** :
 - fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier ;
 - feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes (longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues
- **orientée** : le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin

Les architectures de renforcement

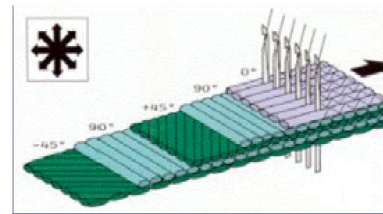
on réalise également, pour des applications particulières (aérospatial, défense), des armatures de renforcements bi- ou tridimensionnelles. Surtout pour des champs de contrainte tridimensionnelle.



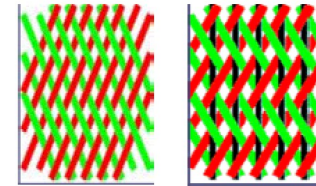
Tissu multiaxial



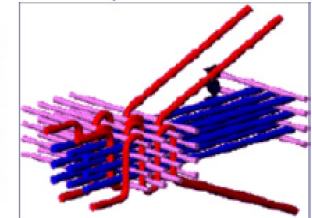
Tissu 3D ou tresse



Stitched



Braided



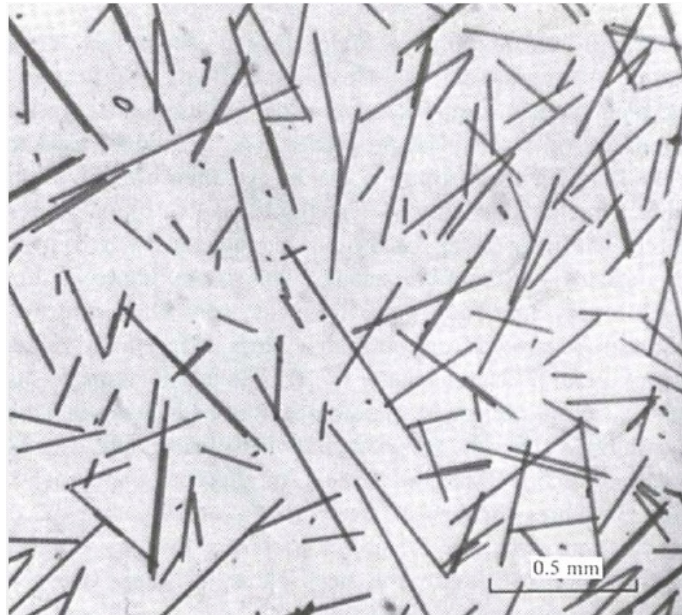
3D

Performances résultant de ces différentes architectures

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Les architectures de renforcement

Fibres courtes



Front module made of short glass fibre-reinforced polypropylene

Les architectures de renforcement

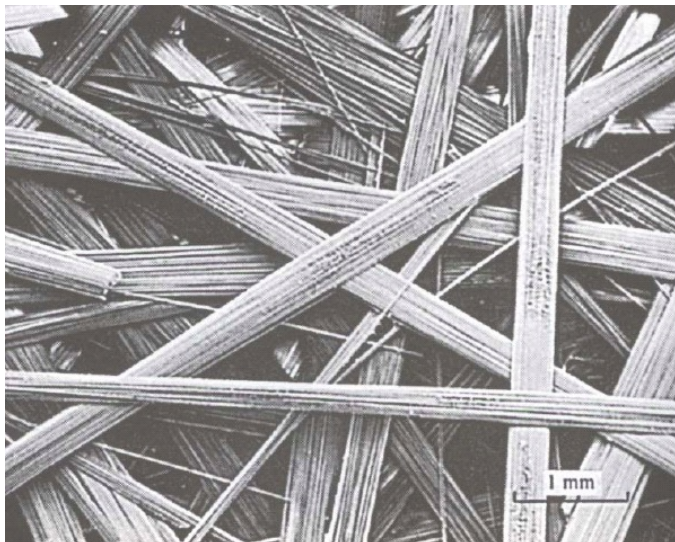
Matelas ou mats

Ce sont des couches de fibres non tissée, disposées de façon aléatoire, qui sont produites soit sèches soit déjà imprégnées de résine (semi-produit).

Le comportement mécanique est isotrope.



Chopped strand mats are often used for hulls and decks



Les mats sont surtout utilisés lorsqu'il faut d'un côté légèreté et isotropie, de l'autre des caractéristiques mécaniques non exceptionnelles (les mats n'ont ni une résistance ni une rigidité importante).

Leurs avantages sont surtout la facilité de mise en œuvre, l'adaptabilité aux formes les plus variées et leur coût, plus faible par rapport aux panneaux à fibres longues orientées.

Les architectures de renforcement

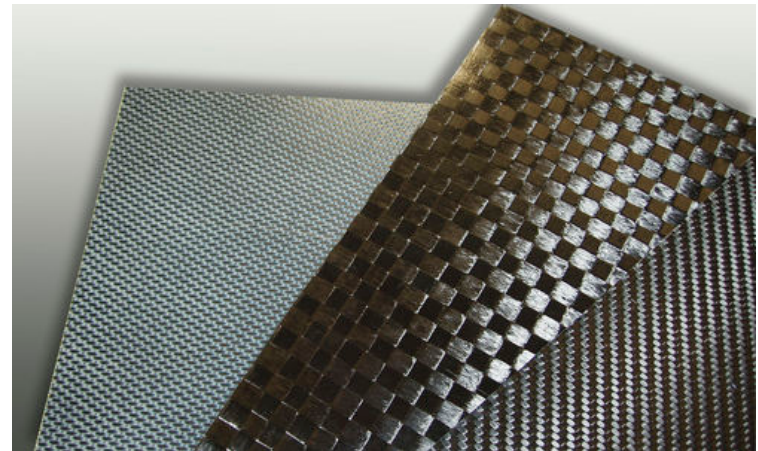
Couches pre-imprégnées (pre-pregs)

Ce sont semi-produits composés de fibres et résine à polymériser (de différentes façons).

Les fibres peuvent être disposées dans une seule direction ou tissées ; les comportement est anisotrope.



Tissu composite fibre de carbone / unidirectionnel / pré-imprégné

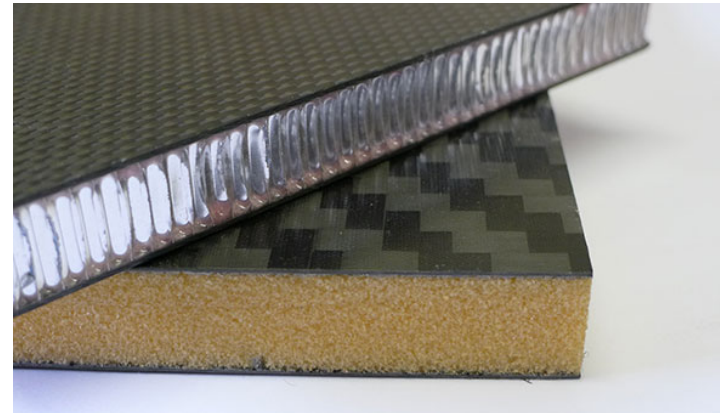
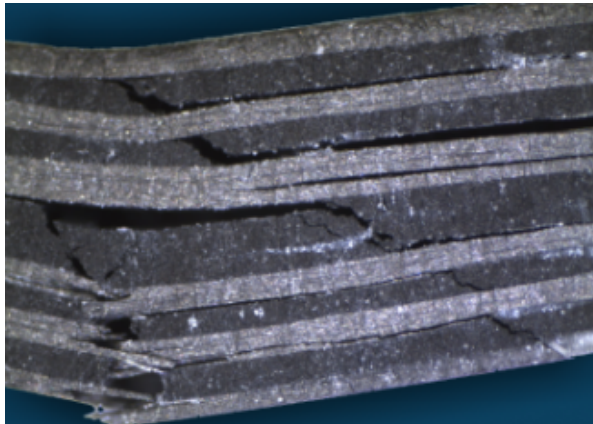


Prepreg tissu fibre de verre / résine thermoplastique

Les architectures de renforcement

Couches pre-imprégnées (pre-pregs)

- L'usage des prepregs est réservé à la fabrication des stratifiés ou des couches extérieures des panneaux sandwichs,
- Les avantages sont multiples:
 - D'abord, les excellentes performances mécaniques,
 - Ensuite la bonne réponse au processus de fabrication.
- En fait, c'est avec les prepregs qu'on obtient les meilleurs résultats en termes d'absences de défauts de fabrication ; pour ces raisons, ils sont utilisés pour la fabrication de stratifiés pour applications de point (aviation, espace, sport...)



Les architectures de renforcement

Tissus orientés



Coques en tissus pré imprégné

Assemblage – architecture des composites

Monocouches

- l'élément de base de la structure composite.
- différents types de monocouches caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

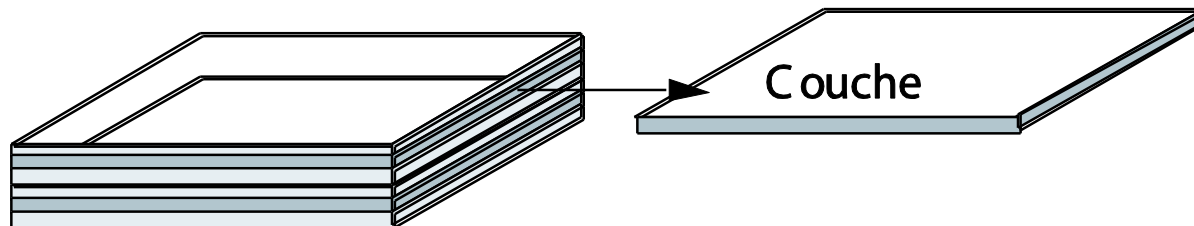
Stratifiés

Les structures composites stratifiées sont:

- constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines: **plis** : nappes unidirectionnelles ou bi-directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine.

ils sont obtenus par empilement de couches généralement à renfort unidirectionnel ou tissu, disposées selon différentes orientations.

Généralement, l'assemblage des couches se fait par polymérisation de l'ensemble, parfois par collage (par exemple dans la technologie du bois). Dans le premier cas, la subdivision en couches du produit final est une pure convention.

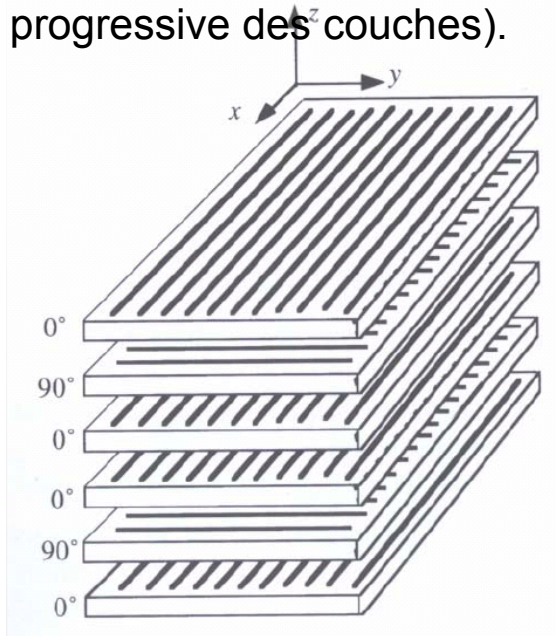


Assemblage – architecture des composites

Stratifiés :

L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre.

En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches).



Ailes de A380 en unidirectionnel



Les stratifiés sont utilisés, comme matériaux structuraux, à chaque fois qu'on a, d'un côté, la nécessité d'excellentes performances mécaniques en termes de résistance, rigidité, comportement à la fissuration, et de l'autre, l'exigence de limiter le poids.

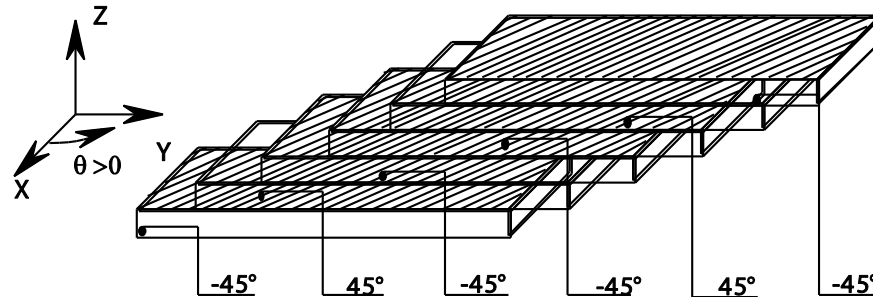
Ces matériaux doivent être conçus selon la nécessité et aujourd'hui se profile l'idée, avec la technologie appropriée, de fabriquer des stratifiés avec une disposition continûment variable des fibres, en direction et quantité.

Renforts unidirectionnels

Assemblage – architecture des composites

Stratifiés

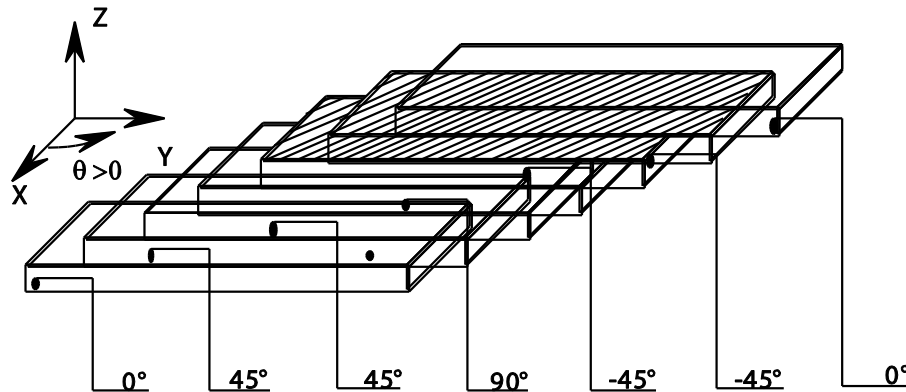
Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.



codification

$$[-45/45/-45/-45/45/-45] = [-45/45/-45]_s$$

STRATIFIE SYMETRIQUE



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

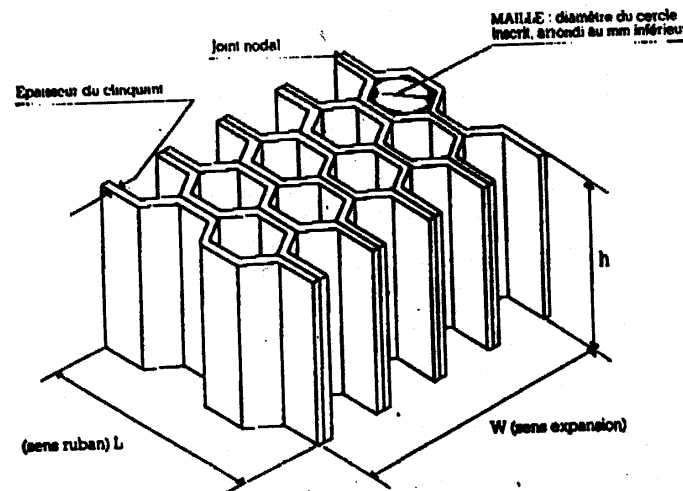
Assemblage – architecture des composites

Sandwichs

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux **sandwichs**.

Une structure **sandwich** est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites.

L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées.



Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan.

Assemblage – architecture des composites

Panneaux sandwich : ils sont la généralisation au cas bidimensionnel de la poutre en I.

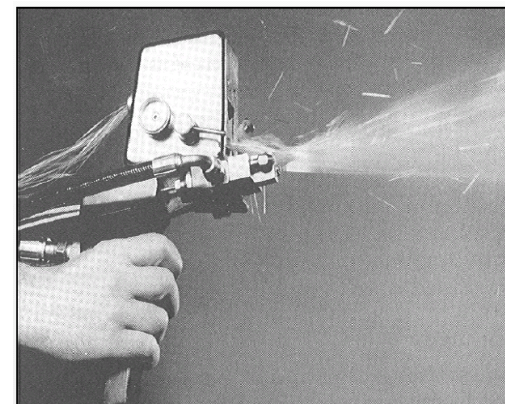
Le concept clé est celui de mettre la partie résistante à la flexion là où il faut, à l'extérieur, et de remplir la partie centrale avec un matériau léger (mousses solides, balsa, nids d'abeille) pour faire face à l'effort tranchant.



Matériaux composites

PARTIE 1 : Généralités sur les matériaux composites

Chapitre 2 : Mise en œuvre et structure des composites



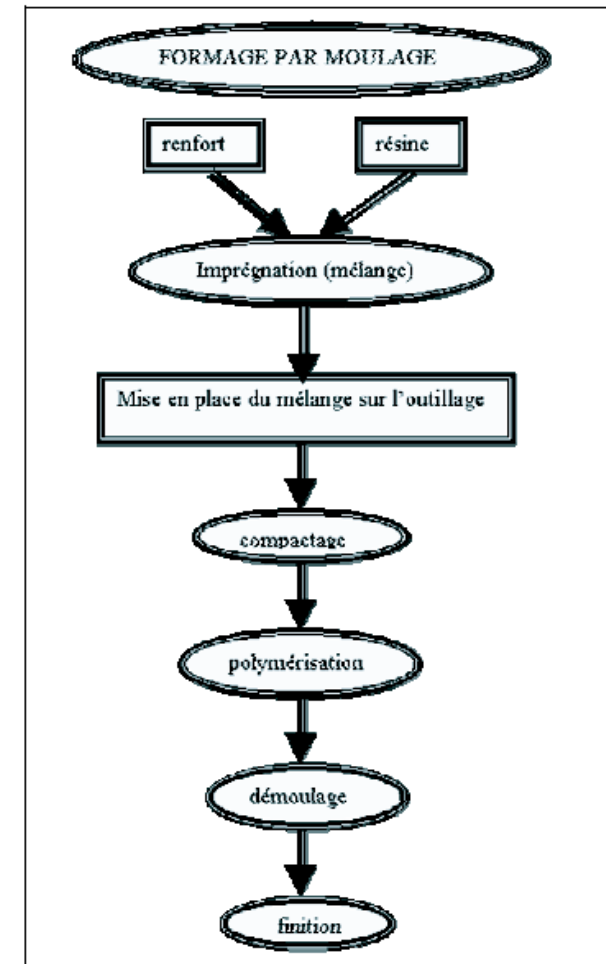
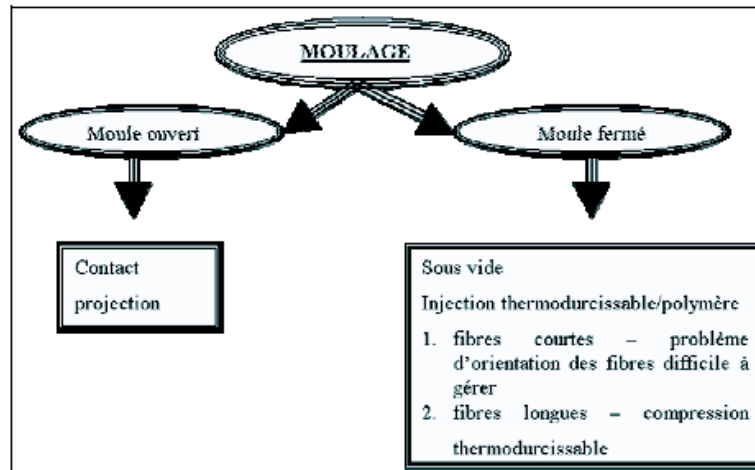
Mise en œuvre et procédés des matériaux composites

Trois opérations sont indispensables :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système.
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Il existe différentes techniques mais la plus utilisée est par moulage

Limitation : taille des pièces = taille des moules



Mise en œuvre et procédés des matériaux composites

Nombreuses technologies de réalisation des matériaux composites.

Choix : - contraintes de coûts liés au nombre de pièces à réaliser
- contraintes techniques (type et taux de renfort, aspect de surface, finition, tenue à l' environnement...)

Classification des procédés

- Résines thermodurcissables (TD) ou résines thermoplastiques (TP)
- **voie humide** (une seule étape) ou **voie sèche** (2 étapes) utilisation de **semi-produit**.

Les grands procédés qui seront exposés sont classés en 2 grandes familles: les thermodurcissables et les thermoplastiques.

Mise en œuvre et procédés des matériaux composites

- Résines thermodurcissables (TD)

- Mise en œuvre en moule ouvert : au contact ou par projection (voie humide)
- Mise en œuvre en moule fermé: RTM, RIM (voie humide pour petite et moyenne série)
- Mise en œuvre à la presse : pressage à froid compression (voie humide) ou pressage à chaud (voie sèche)
- Mise en œuvre en continu : pultrusion (voie humide), plaques ondulées ou planes
- Forme de révolutions : bobinage (voie humide ou sèche), centrifugation (voie humide)
- Mise en œuvre hautes performances, semi-produit et drapage

- Résines thermoplastiques (TP)

- ✓ réalisation et mise en œuvre des semi-produits (voie sèche):
 - Granulés, par injection
 - TRE (thermoplastique renforcé estampable)
 - Pré-imprégné fibres longues

Composites à matrice thermodurcissable

Mise en œuvre en moule ouvert

Elle permet la réalisation de prototype, de petites et moyennes séries ou de grandes pièces sans investissement important (réservoirs, piscines, coques de bateaux...)

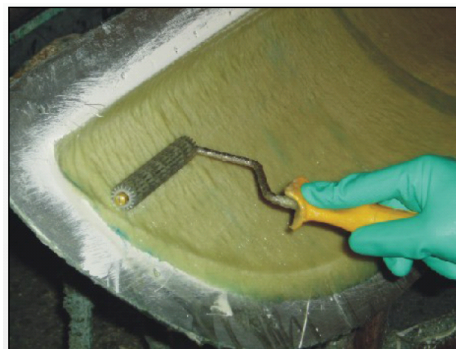
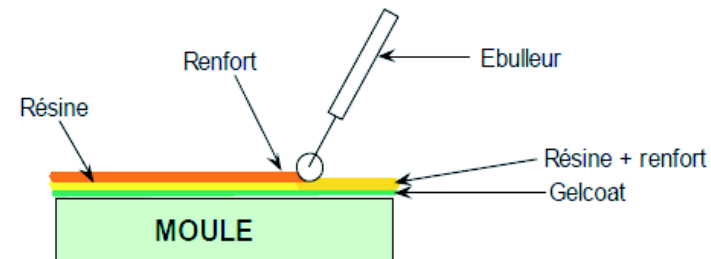
Moule souvent en composites fibres de verre

Résine utilisée en majorité: polyester insaturé avec 20% à 40% de fibres de verres.

➤ Moulage au contact

Dans l'ordre, on applique

- agent de démoulage
- couche de surface (gel-coat)
- renforts (couches successives de mat ou tissu) que l'on imprègne manuellement de résine.



Composites à matrice thermodurcissable

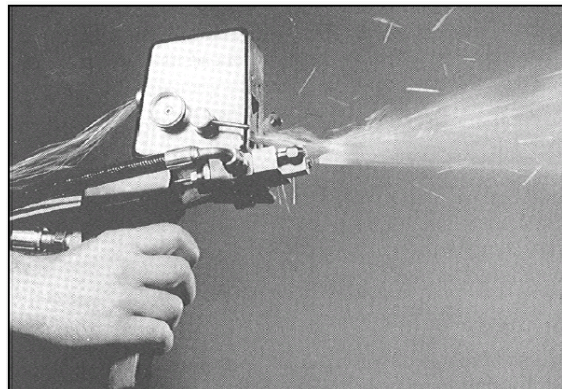
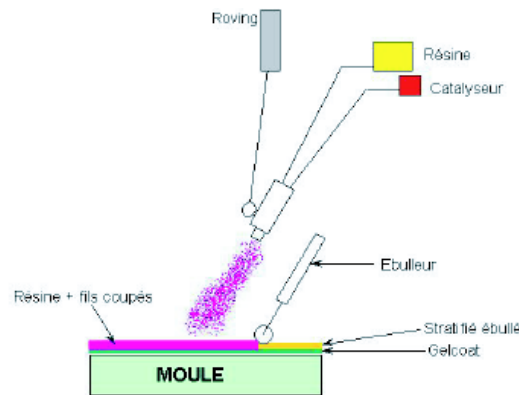
Mise en œuvre en moule ouvert

➤ Moulage par projection simultanée

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression.

Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- un dispositif de coupe
- projection du renfort (roving)
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et ébullés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine est catalysée en continu lors de sa projection.

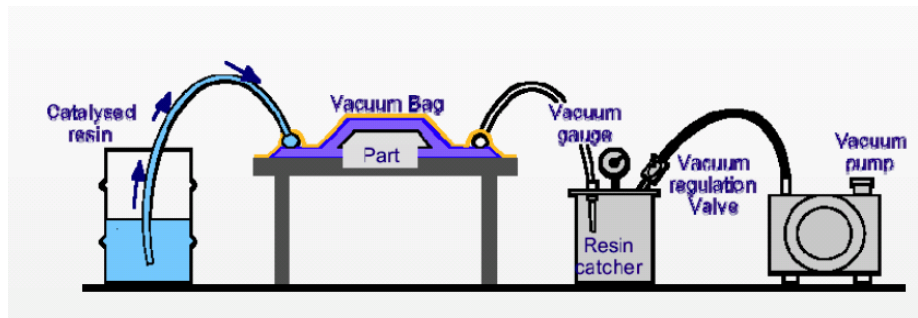
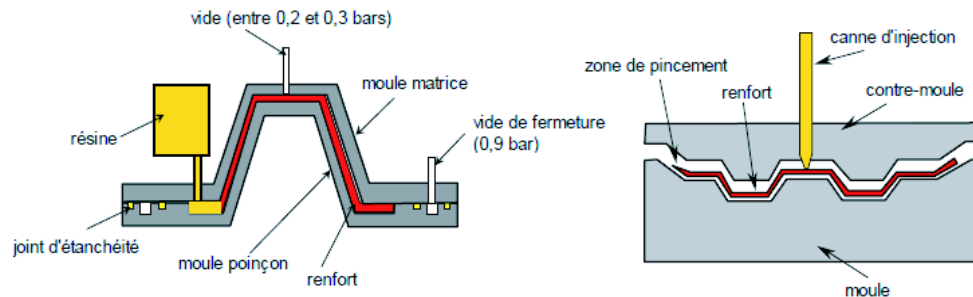


Composites à matrice thermodurcissable

Mise en œuvre en moule fermé, voie humide

- **Moulage par injection de résine: RTM** (ResinTransfer Moulding avec moule et contre moule) → 2 faces lisses

Principe: Le moulage par injection de résine liquide RTM s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.



Composites à matrice thermodurcissable

Mise en œuvre en moule fermé, voie humide

➤ Moulage par injection de résine sous vide: RTM sous vide (ResinTransfer Moulding avec moule et contre moule)

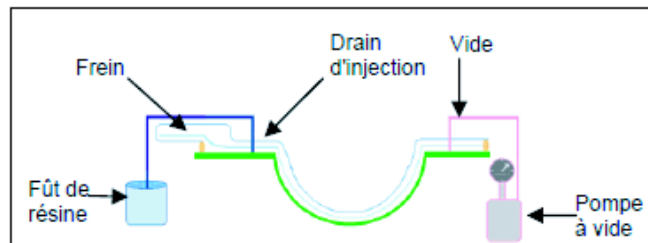
Principe: Le moulage sous vide s'effectue également entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort → **pression d'injection plus faible que RTM standard.**

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

➤ Infusion de résine sous membrane souple

Principe : dépôt, dans un moule femelle, des renforts secs (tissus, âmes, etc.) qui vont concevoir la pièce composite, et de créer un système étanche à l'air à l'aide d'une bâche à vide. L'infusion consiste ensuite à injecter de la résine, par dépression réalisée sur la pièce, sur les tissus déposés à sec.



Composites à matrice thermodurcissable

Mise en œuvre à la presse

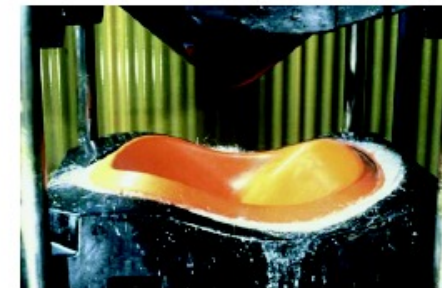
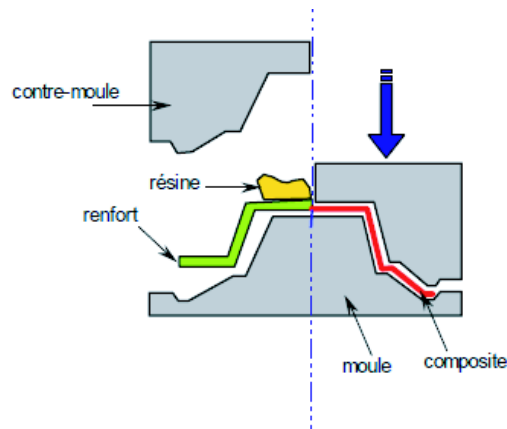
➤ compression à froid, basse pression, voie humide

Principe: Moulage à l'aide d'une presse à compression entre moule et contre-moule rigides en composite, initialement sans apport thermique extérieur.

Moule ouvert, le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule et la résine, dotée d'un système catalytique très réactif, est versée en vrac sur le renfort.

La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule due à l'exothermie de la réaction, ce qui permet un démoulage rapide.

Les performances du procédé peuvent être considérablement améliorées par l'usage de moules métalloplastiques, voire métalliques, et d'un système de régulation thermique basse température.



Composites à matrice thermodurcissable

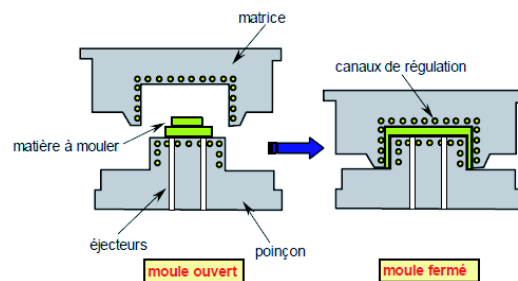
Mise en œuvre à la presse

➤ Pressage à chaud, voie sèche

Ce procédé de grande diffusion, le plus important en tonnage en France, utilise des semi-produits :

- SMC (sheet molding compound)
- BMC (Bulk molding compound)
- TMC (thick molding compound)

SMC : moulage par compression de mat pré-imprégné



Principe : Le mat préimprégné SMC (Sheet Molding Compound) est constitué d'une nappe de fils coupés ou continus, imprégnée par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat préimprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide.

BMC : Injection de compound

Principe : Le compound B.M.C (Bulk Molding Compound) préparé dans un malaxeur est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renforcée par des fils de verre coupés.

Le compound est moulé à chaud (130 - 150°C) par injection (principalement) entre moule et contre-moule en acier usiné.



Composites à matrice thermodurcissable

Forme de révolution

➤ Stratification, lamination ou moulage entre pellicules en continu

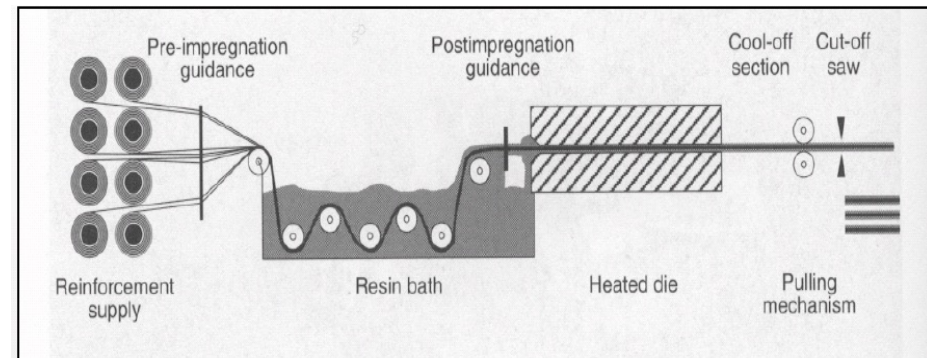
Une nappe de renfort (mat, tissus) et la résine sont déposées sur une pellicule se déplaçant sur une table plane. L'imprégnation se fait par l'intermédiaire de rouleaux presseurs. Une deuxième pellicule est appliquée sur la face supérieure du mélange verre/résine et pénètre dans un tunnel chauffant.

➔ 2 faces lisses et fabrication de plaques planes ou ondulées ou même de profilés ouverts de formes simples.

➔ Grandes séries à bas prix.

➤ Pultrusion réalisation en continu de profilés de sections constantes

Principe : Des renforts continus, rovings divers, mats et tissus en bandes de largeurs appropriées, tirés par un banc de traction situé en fin de ligne de production, sont successivement prédisposés de façon précise, imprégnés de résine et mis à la forme désirée par passage à travers une filière chauffée dans laquelle s'effectue le durcissement de la résine.

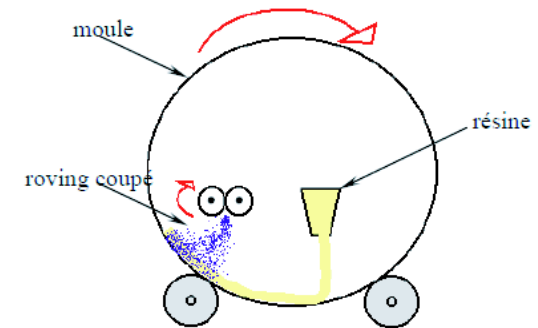


Composites à matrice thermodurcissable

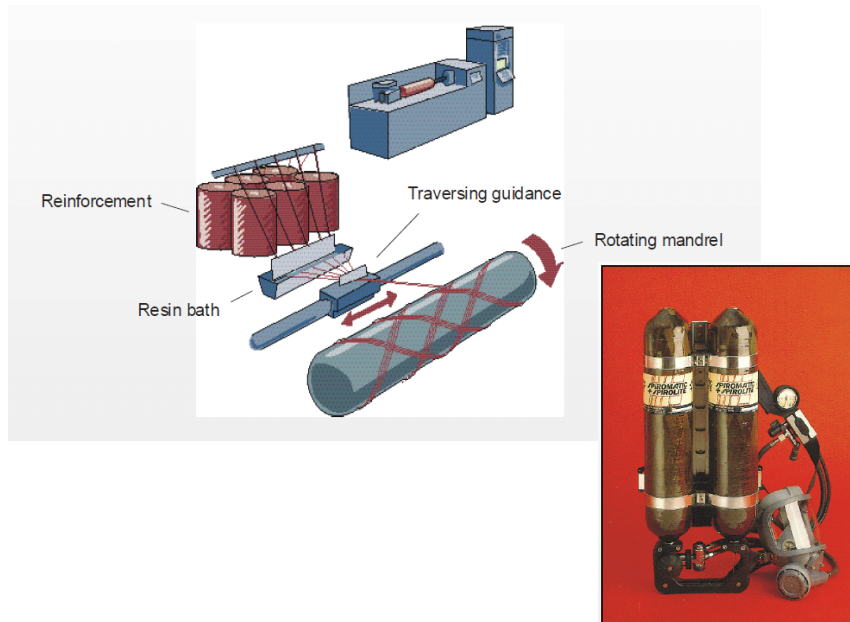
Forme de révolution

➤ Centrifugation, voie humide

Principe Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. A l'intérieur d'un moule cylindrique en rotation à basse vitesse, on dépose des fils coupés à partir de roving (ou du mat), de la résine et éventuellement des charges granulaires. Puis, on augmente la vitesse de rotation du moule pour densifier et débuller la matière. Après durcissement de la résine, éventuellement accélérée par un apport thermique, on peut extraire très facilement la pièce du moule.



➤ Bobinage filamentaire, voie humide ou sèche



Principe Procédé de moulage limité aux formes de révolution. Initialement, destiné à la réalisation d'enveloppes de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques par enroulement progressif sur un mandrin, selon un angle déterminé de fils de verre imprégnés de résine. Par la suite, le procédé a été étendu à des structures moins performantes en associant aux rovings bobinés d'autres types de renfort (fils coupés, mat, tissu) appliqués de façon adaptée.

Composites à matrice thermodurcissable

Mise en œuvre hautes performances, semi-produit et drapage

Utilisation de pré-imprégnés lorsque l'on recherche la performance maximale pour la pièce composite à réaliser.

Les avantages du procédé:

- contrôle parfait du pourcentage pondéral renfort/résine
- manipulation d'un seul produit
- augmentation de la sécurité et de l'hygiène

Techniques d'imprégnation :

- en milieu solvant
- à chaud

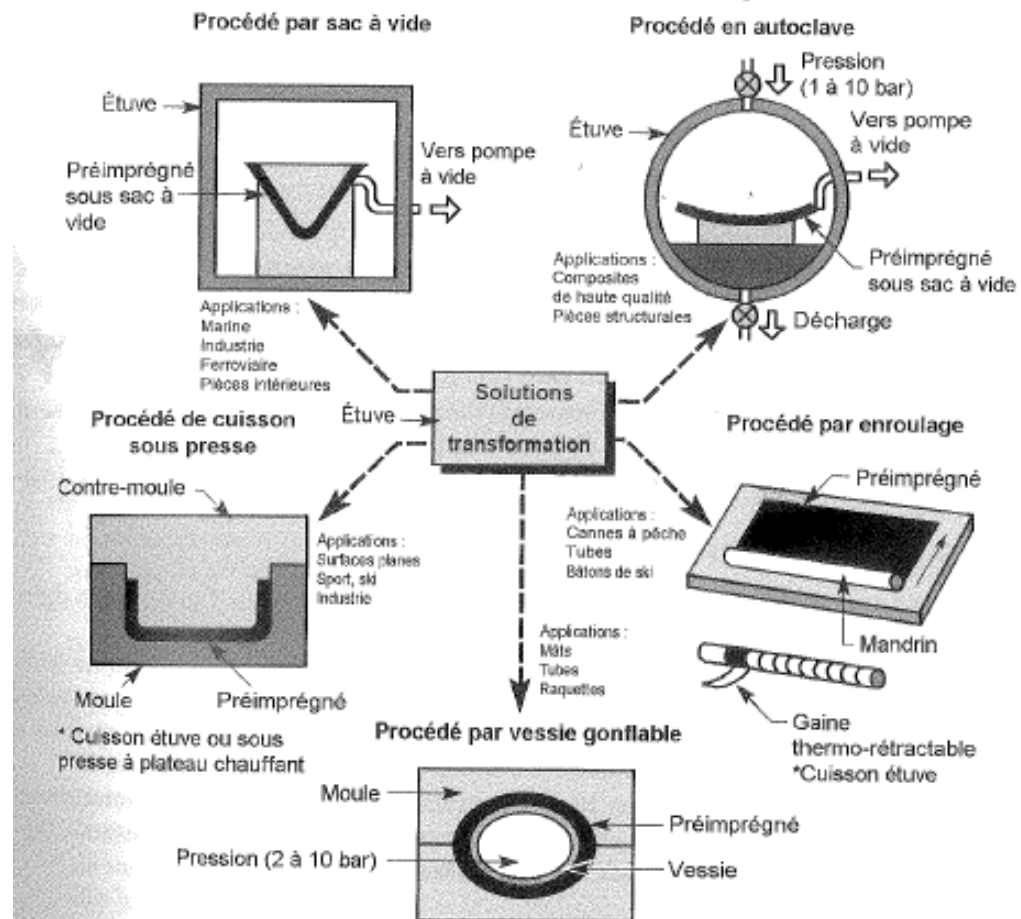


Figure 5.4 – Procédés de transformation des préimprégnés hautes performances (Hexcel).

Transformations du pré-impregne

Composites à matrice thermoplastique

3 familles de composites à matrice thermoplastique :

- sous forme de **granulés**, composites à fibres très courtes (environ 0.3mm) et ceux à fibres longues (supérieures au mm). (année 1970)
- thermoplastiques renforcés estampables (**TRE**) (année 1980)
- **pré-imprégnés thermoplastiques** à fibres continues (depuis 1990)

Pour ces 3 familles, le procédé par voie humide est absent → semi-produits

Progressivement, les thermoplastiques seront amenés à remplacer les thermodurcissables

Les thermoplastiques pallient aux inconvénients des thermodurcissables en offrant les avantages suivants :

- pas de dégagement de solvants, pas de réaction chimique pendant la transformation
- formulation simple (prête à l'emploi)
- stockage et consommation illimités
- cycle de transformation plus rapide et absence d'ébavurage ;
- recyclabilité par simple refusion
- tenue aux chocs et à l'impact améliorée.

Composites à matrice thermoplastique

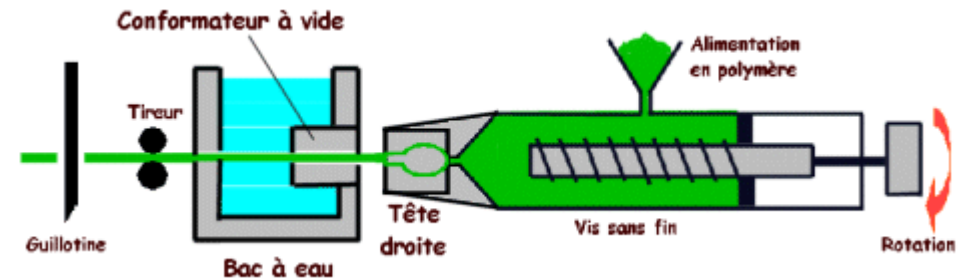
Granulés avec fibres et charges

Large gamme de polymères disponibles formulés avec des charges ou des renforts ayant pour fonction:

- d'améliorer les propriétés du polymère de base,
- de diluer le polymère pour des raisons économiques

→ 2 types de charges :

- renforçantes
- non renforçantes

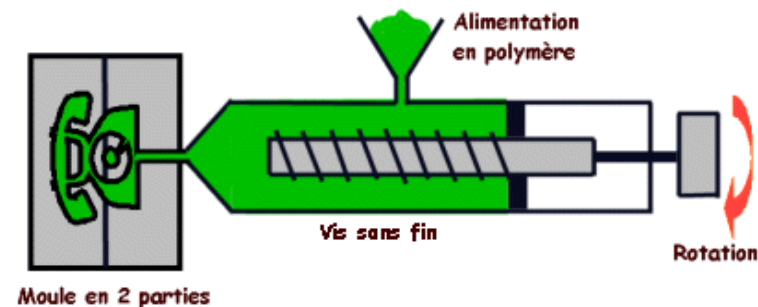


Mode de fabrication des granulés : - extrudeuses mono-vis

- extrudeuses bi-vis

- co-malaxeurs

Ces granulés sont ensuite **injectés** à chaud grâce à une presse à injecter



Composites à matrice thermoplastique

Thermoplastiques renforcés estampables

Ce sont des matériaux composites à matrice thermoplastique renforcée le plus souvent par des fibres de verre de longueur 25 à 50 mm ou sans fin.

Principalement, pour l'industrie automobile pour de grande pièce structurale à mise en œuvre à cadence rapide.

Fabrication des TRE :

Ces flancs sont des plaques consolidées constituées de fibre de verre imprégnées de la résine thermoplastique choisie.

La réalisation utilise les mats de fibres non tissées mais aiguilletés qui sont pris en sandwich entre des feuilles extrudées de thermoplastique. L'ensemble passe dans un laminoir en continu où l'imprégnation à chaud et la consolidation sont effectuées. Le produit solide est ensuite découpé à des dimensions correspondant aux spécifications de l'utilisateur.

Composites à matrice thermoplastique

Thermoplastiques renforcés estampables

Moulage des pièces à partir de TRE:

Les plaques TRE sont préchauffées dans un four infrarouge ou à air chaud (200-220°C) qui plastifie la matière. Les plaques sont immédiatement placées dans un moule à froid et sous l' action de la pression di poinçon, la plaque chaude prend la forme de l' empreinte et se solidifie par refroidissement.

2 techniques : l' **estampage** et l' **emboutissage (thermoformage)**

Composites à matrice thermoplastique

Préimprégnés thermoplastiques à fibres continues

➤ **Procédés de réalisation des semi-produits**

Un certain nombre de techniques de pré-imprégnation et de méthodes de fabrication de semi-produits ont été mises au point:

- imprégnation à l' état fondu
- imprégnation en solution (avec un solvant pour les polymères amorphes)
- co-tissage des fibres de renfort et des fibres matrice
- imprégnation des fibres de renforcement à l' aide de poudres

➤ **Mise en œuvre à partir de ces semi-produits:**

2 techniques:

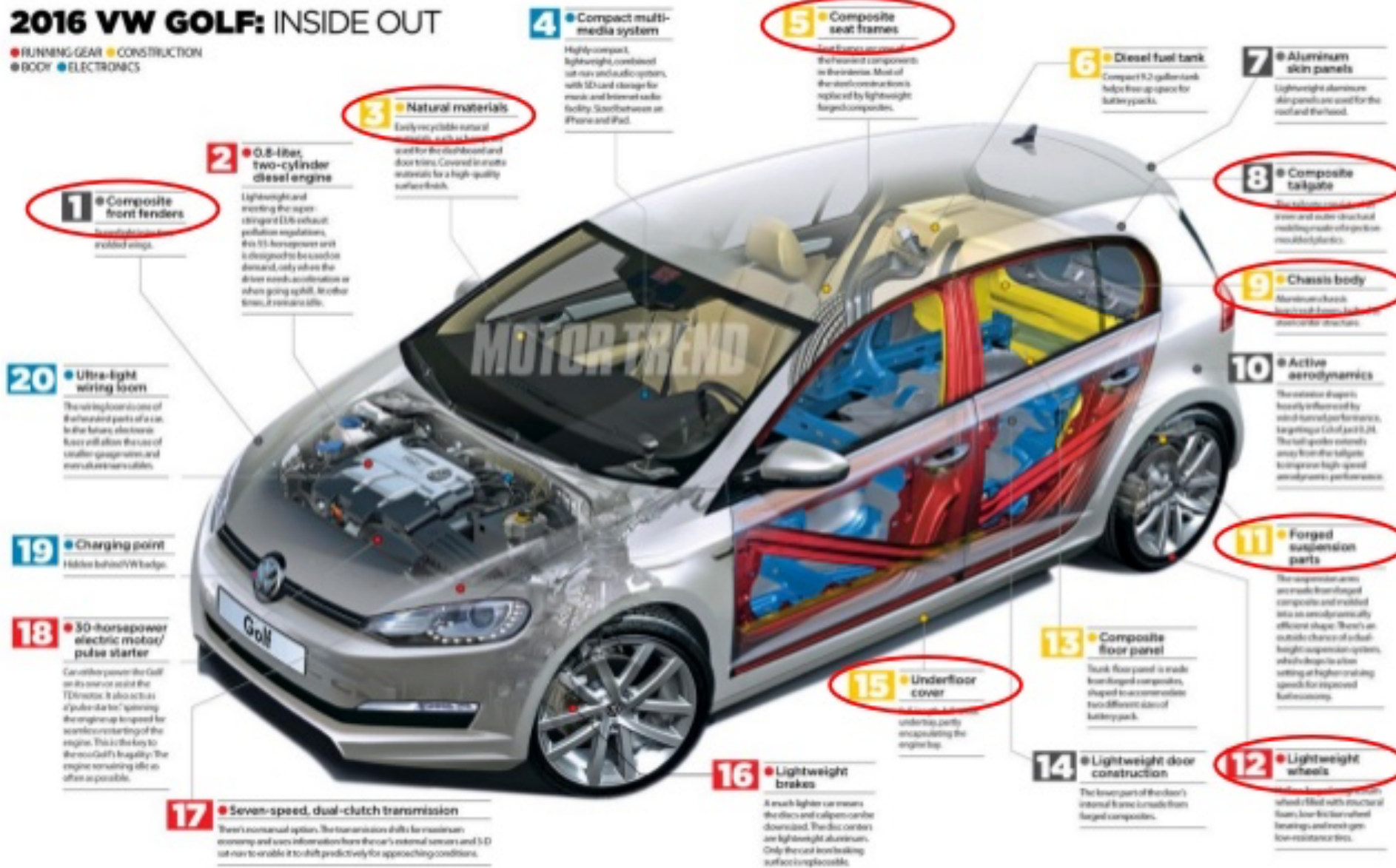
- **Tôlerie :**
 - à la presse, thermoformage et thermo-estampage
 - à l' autoclave
 - Au sac à vide
 - formage par pression hydrostatique
- **Consolidation en continu :**
 - ✓ Bobinage filamentaire
 - ✓ pultrusion



Multiple Composite Materials

2016 VW GOLF: INSIDE OUT

● RUNNING GEAR ● CONSTRUCTION
● BODY ● ELECTRONICS



1 • Composite front fenders

Replaces steel front fenders to avoid wings.

2 • 0.8-liter, two-cylinder diesel engine

Lightweight and meeting the super-charging (EGR) exhaust pollution regulations, this 55-horsepower unit is designed to be used on demand, only when the driver needs acceleration or when going uphill. In other times, it remains idle.

3 • Natural materials

Ecologically sound natural wood is used for the dashboard and door trims. Covered in a high-quality surface finish.

4 • Compact multi-media system

Highly compact, lightweight, combined sat-nav and audio system, with 10 hard storage for music and Internet radio facility. Sits between an iPhone and iPad.

5 • Composite seat frames

Four frames are one of the heaviest components in the interior. Most of the steel construction is replaced by lightweight forged composites.

6 • Diesel fuel tank

Compact 5.2-gallon tank helps free up space for battery packs.

7 • Aluminum skin panels

Lightweight aluminum skin panels are used for the roof and the hood.

8 • Composite tailgate

The vehicle can be lifted from the rear and outer structural molding made of injection-molded plastics.

9 • Chassis body

Aluminum chassis body with a full steel structural structure.

10 • Active aerodynamics

The exterior design is heavily influenced by wind tunnel performance, targeting a Cd of just 0.28. The tail spoiler extends away from the tailgate to improve high-speed aerodynamic performance.

11 • Forged suspension parts

The suspension arms are made from forged composites and molded into an aerodynamically efficient shape. There's an outside chance of a dual-height suspension system, which drops to allow sitting at higher cruising speeds for improved fuel economy.

12 • Lightweight wheels

Lightweight wheels with a 17-inch diameter, filled with structural foam, low-friction wheel bearings and steel gas-flow resistance tires.

13 • Composite floor panel

Trunk floor panel is made from forged composites, shaped to accommodate two different sizes of battery packs.

14 • Lightweight door construction

The lower part of the door's internal frame is made from forged composites.

15 • Underfloor cover

Underfloor partly encapsulating the engine bay.

16 • Lightweight brakes

A much lighter car means the discs and callipers can be downsized. The disc centers are lightweight aluminum. Only the cast iron backing surface is replaceable.

17 • Seven-speed, dual-clutch transmission

There's a manual option. The transmission shifts for maximum economy and uses information from the car's external sensors and 3-D sat-nav to enable it to shift predictively for approaching conditions.

20 • Ultra-light wiring loom

The wiring looms are one of the heaviest parts of a car. In the future, electronic looms will allow the use of smaller gauges wires and more uniform cables.

19 • Charging point

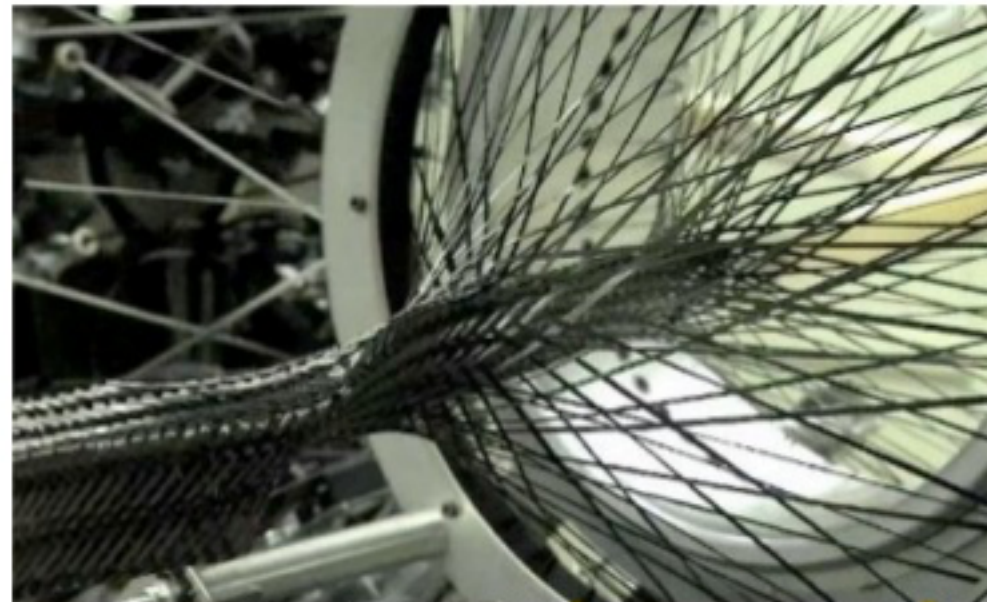
Hides behind VW badge.

18 • 30-horsepower electric motor/pulse starter

Can either power the Golf on its own or assist the TDI motor. It also acts as a 'pulse starter' spinning the engine up to speed for warm-starting of the engine. This is the key to the Golf's frugality: The engine remaining idle as often as possible.



Lexus Carbon Fiber Loom



- To manufacture the Lexus LFA, Lexus created the world's **first laser-controlled carbon fiber loom**
- It is 6 feet across that **creates a weave** which can be molded into almost **any shape** for the vehicle
- 3D weaving technology **reduces the volume** of materials used by 50 % and increases their **strength**

