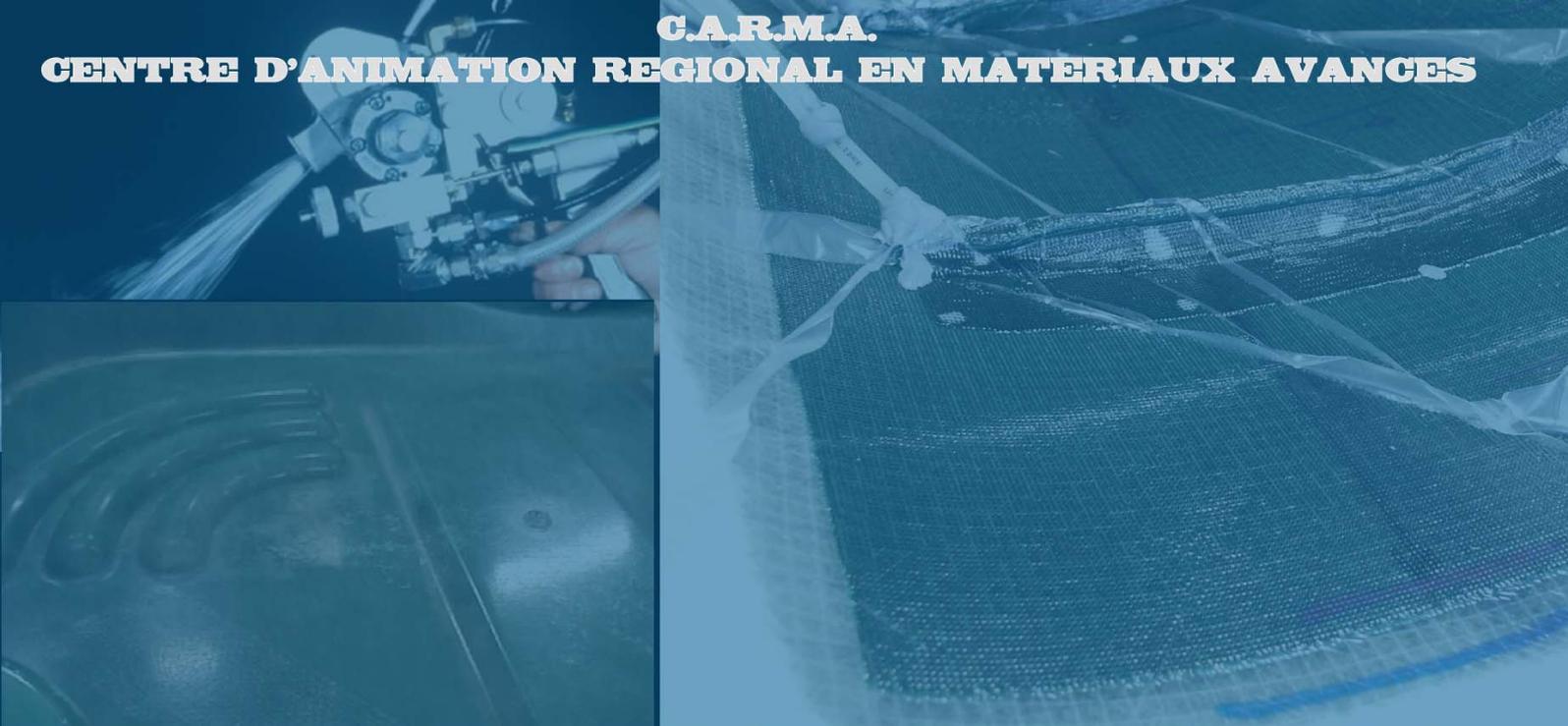


C.A.R.M.A.

GENTRE D'ANIMATION REGIONAL EN MATERIAUX AVANCES



GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES

Actualisation octobre 2006



SOMMAIRE

1. Les matériaux	3
1.1 Les renforts	3
1.1.1 Fibre de verre	3
1.1.2 Fibre de carbone	3
1.1.3 Fibre d'aramide	4
1.1.4 Fibre de bore	4
1.1.5 Fibre de silice (ou de quartz)	4
1.1.6 Fibres de polyéthylène de haut module	4
1.1.7 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	4
1.1.8 Architecture des renforts	4
1.1.9 Ensimage	6
1.2 Les charges	6
1.2.1 Les charges organiques	7
1.2.2 Les charges minérales	7
1.2.3 Oxydes et hydrates métalliques	8
1.2.4 Le verre	9
1.2.5 Le carbone	10
1.3 Les matrices	10
1.3.1 Les résines thermodurcissables	11
1.3.2 Les matrices thermoplastiques	13
2 Les technologies de mise en œuvre	15
2.1 Moulage au contact	15
2.2 Moulage par projection simultanée	16
2.3 Moulage sous vide	18
2.4 Moulage par injection basse pression de résine - RTM	19
2.5 Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression	20
2.6 L'infusion de résine sous membrane souple	22
2.7 Moulage par injection de compound - BMC	23
2.8 Moulage par compression de mat preimprégné - SMC	24
2.9 Moulage par enroulement filamentaire	26
2.10 Moulage par centrifugation	27
2.11 Moulage par pultrusion	28
2.12 Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées (R.R.I.M.)	30
2.13 Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S.R.I.M.)	31
3 Réglementation	32
3.1 Origine des émissions de COV	33

1. Les matériaux

Introduction

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes*.

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.

1.1. Les renforts

1.1.1. Fibre de verre



Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

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

1.1.2. Fibre de carbone



C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

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

1.1.3. Fibre d'aramide



Souvent appelée KEVLAR®, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. 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.

1.1.4. 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.

1.1.5. 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.

1.1.6. Fibres de polyéthylène de haut module

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

1.1.7. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

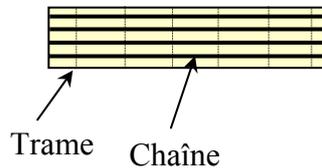
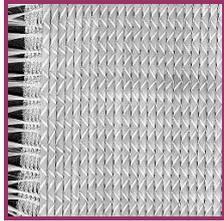
Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	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		

1.1.8. Architecture des renforts

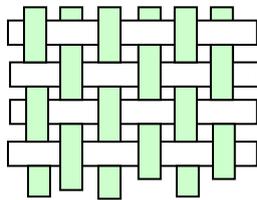
Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

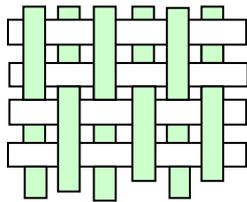
- **Les unidirectionnels (UD)** : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.



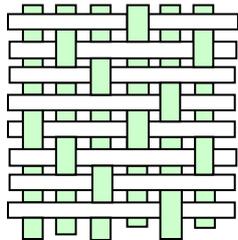
Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.



- **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.

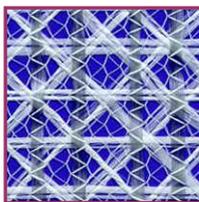


- **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.



- **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.

Comme un tissu est difficilement déformable sur une surface gauche, on réalise également pour des utilisations spécifiques des armures bi ou tridimensionnelles.



Tissu multiaxial



Tissu 3D ou tresse

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.



Tissu hybride carbone - aramide

1.1.9. Ensimage

Les renforts destinées 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 interfilamentaire (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.

1.2. Les charges

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.

A l'inverse des matières *thermoplastiques*, les matières *thermodurcissables* ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

1.2.1. Les charges organiques

- Charges cellulosiques, utilisées en tant que **charges des résines thermodurcissables** (phénoplastes et aminoplastes).
Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.
- Farines de bois
- Farines d'écorces de fruit et de noyaux
- Fibres végétales
- Pâtes de cellulose
- Amidons

1.2.2. Les charges minérales

- Craies et carbonates

La **craie** ou *blanc de Champagne* peut contenir jusqu'à 99 % de calcite, de la silice et d'autres corps minéraux. La taille moyenne de ses particules varie de 1 à 3 μm .

Le **calcaire** et le **marbre** contiennent 80 à 90 % de calcite et des quantités variables d'oxyde de magnésium et de silice. La taille des particules est comprise entre 0,5 et 30 μm .

Le **carbonate de calcium-magnésium** ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) est préparé à partir des minerais de dolomite. On l'utilise comme charge et aussi comme retardateur de flamme, ajouté à du trioxyde d'antimoine.

Le **carbonate de calcium précipité** est un mélange pratiquement pur à 99,00 % de calcite et d'aragonite, obtenu sous forme de particules très fines (0,05 à 16 μm).

Il est surtout utilisé avec le **PVC** et dans les **matières thermodurcissables** (SMC, BMC) ainsi que les **polyuréthanes** (RIM) en raison de son caractère **hydrophobe**.

- Les silices

La **silice** (SiO_2), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules.

Son incorporation dans la résine améliore les propriétés diélectriques, la résistance à la chaleur et à l'humidité des objets moulés, par exemple ceux en poly(méthacrylate de méthyle).

On constate également l'augmentation de la température de transition vitreuse, du module d'Young et de la résistance en compression, ainsi que la réduction du gonflement dans les solvants.

- Les talcs

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

Le talc est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il leur confère une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Notons également que l'introduction de talc facilite l'usinage des produits finis.

- La wollastonite

Cette charge se présente sous différentes formes : aiguilles, granulés, fibres.

Elle est surtout utilisée dans les polyamides, les ABS et les polysulfones, également en remplacement des fibres de verre dans les SMC et les BMC. Elle améliore en particulier la résistance au rayonnement ultraviolet et à l'hydrolyse. Elle est aussi employée dans les résines époxydes pour assurer une bonne stabilité dimensionnelle ainsi que l'isolation thermique et électrique, et permet un contrôle du retrait au moulage.

- Les argiles et alumino-silicates

Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la **silice** (42 à 70 %) et de l'**alumine** (14 à 45 %).

* Le kaolin contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau. On peut l'ajouter à des taux atteignant 60 % dans les compositions à base d'esters polyvinyliques, mais habituellement les poudres à mouler en contiennent de 20 à 45 %.

Le **kaolin calciné** est utilisé dans les mélanges pour l'isolation de câbles et dans les isolants.

Mélangé à de l'alumine et de la silice, le kaolin calciné est utilisé pour assurer la résistance aux acides.

* La vermiculite est utilisée comme charge de faible densité (2,4) dans les plastiques renforcés de fibres de verre.

* Le mica augmente la stabilité dimensionnelle des pièces moulées ; il améliore les propriétés électriques et thermiques, la résistance aux acides et aux bases, et diminue la reprise d'eau.

Comparé aux fibres de verre, il confère une moins bonne résistance aux chocs ; mélangé avec celles-ci, il permet une réduction des coûts.

1.2.3. Oxydes et hydrates métalliques

- Poudres et microsphères

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de **poudres fines** comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques, des résines époxydes, des polyesters insaturés. Tous permettent de diminuer le prix de revient et d'augmenter la densité de la matière élastique.

L'oxyde de béryllium est utilisé sous forme de **microsphères**, qui sont des microsphères de densité voisine de 0,003 et d'un diamètre de l'ordre de 40 μm .

- Alumine et trihydrate d'aluminium

On obtient l'**alumine** (Al_2O_3), anhydre ou hydratée, à partir de la bauxite. Cette charge apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique ; elle diminue le coefficient de dilatation thermique linéique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu.

L'hydrate d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ est une charge ignifugeante qui, du point de vue du prix, est concurrentielle ; elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion car elle se décompose de façon endothermique (effet de refroidissement) en alumine et en eau, aux températures supérieures à 220 °C.

- Trioxyde d'antimoine

On chauffe de l'antimoine dans l'air pour obtenir Sb_2O_4 qui donne SbO_3 par fusion et décomposition. Sa densité est de 4,2 et sa dureté Mohs comprise entre 6 et 7. Il apporte aux résines ignifugation et coloration blanche et on l'utilise en particulier dans les **PVC plastifiés**.

- Oxyde de beryllium

Utilisé sous forme de microsphères dans les résines époxydes, il augmente les conductivités électrique et thermique. Ces carbosphères sont aussi utilisées dans les mousses structurelles (PUR) à densité contrôlée, ainsi que pour la fabrication de pièces polyesters ultralégères.

- Les céramiques

Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0,4 et 2,4 et les dimensions de 1 à 3 000 μm . Une microsphère de 70 μm comportant un revêtement permettant une meilleure dispersion a été mise au point. Conseillée dans les résines polyesters en combinaison avec CaCO_3 , elle apporte une réduction de masse de 15 à 25 % avec une amélioration des résistances à la compression et au choc.

1.2.4. Le verre

- Poudres de verre

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13 μm est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.

- Billes de verres creuses

Les billes de verre creuses, de densité comprise entre 0,1 et 0,5, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant. Elles améliorent les résistances à l'eau et au vieillissement du PMMA, et diminuent la friabilité des pièces phénoliques.

Les densités de ces microsphères creuses du type **borosilicate de sodium et de calcium** sont comprises entre 0,38 et 0,45 ; parallèlement, leur résistance à la compression varie de 1,7 à 31 MPa. Les applications sont nombreuses (bâtiment, automobile et aéronautique).

- Microsphères de verre

L'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35 % la masse des pièces obtenues soit à partir de BMC ou de SMC destinées en particulier à l'industrie automobile, soit également à partir de résines phénoliques pour l'industrie aéronautique. On utilise par ailleurs ce type de charge, dans le cas du PPO modifié, pour la réalisation des capotages de machines de bureau. Elle permet la réduction du temps de cycle de moulage de 20 à 30 %. Il en est de même dans le cas du moulage des mousses structurales en polyuréthanes.

1.2.5. Le carbone

- Le noir de carbone

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant, pigment, barrière anti-UV, antioxydant.

Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation et celle du PVC. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules. Par contre, la conductivité électrique des matériaux chargés augmente avec le taux de carbone et avec la finesse des particules

1.3. 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.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- 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 pontonne (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"

Principales différences entre matrices TP et TD

1.3.1. Les résines thermodurcissables

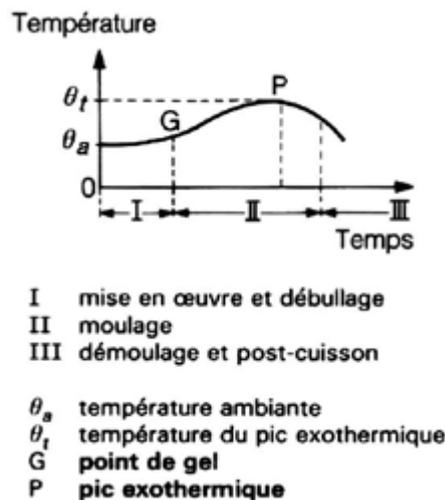
- **Polyesters insaturés** : C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.



Il existe différents types de résines :

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

Avantages	Inconvénients
Bonne accroche sur fibres de verre Translucidité Bonne résistance chimique Mise en œuvre facile Tenue en température (> 150 °C) Prix réduit	Inflammabilité (sauf résines chlorées) Tenue vapeur et eau bouillante Retrait important (6 à 15 %) Durée de conservation en pot limitée Emission de styrène

- **Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

- **Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.
- **Epoxydes** : Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :
 - du durcissement à chaud ou à froid ;
 - de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

Avantages	Inconvénients
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue Faible retrait (1 à 2 %) Excellente adhérence sur fibres Auto-extinguibilité Mise en œuvre facile, sans solvant	Prix élevé Sensibilité à l'humidité et aux UV Vieillessement sous température Sensibilité aux chocs Temps de polymérisation

- **Polyuréthanes et polyurées** : Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :
 - Polyols + polyisocyanates = polyuréthanes ;
 - Polyéthers + polyamines = polyurées.

Avantages	Inconvénients
Facilité de moulage in situ Tenue chimique Vieillessement	Résistance mécanique réduite Combustibilité Coloration en masse difficile : foncée

- **Polyimides** : Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.
- **Bismaléimides** : Matrices très peu utilisées en Europe. Elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre.

Matrices TD	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
	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Epoxyde	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 ⁻⁵
Phénolique	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 ⁻⁵
Polyester	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 ⁻⁵
Polycarbonate	1 200	2 400		0,35	60		6*10 ⁻⁵
Vinylester	1 150	3 300			75	4	5*10 ⁻⁵
silicone	1 100	2 200		0,5	35		
Uréthane	1 100	700 à 7 000			30	100	
Polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	8*10 ⁻⁵

1.3.2. Les matrices thermoplastiques

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100 °C, hors POM) sont les suivantes :

- Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Polytéréphthalate éthylnique et butylnique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;
- Polysulforés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide-imide (PAI) ;
- Polyéther-imide (PEI) ;
- Polyéther-sulfone (PES) ;
- Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Matrices TP	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
	Mv	E	G	k	C _r	A	α
PP	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 ⁻⁵
PPS	1 300	4 000			65	100	5*10 ⁻⁵
PA	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 ⁻⁵
PES	1 350	3 000			85	60	6*10 ⁻⁵
PEI	1 150	3 300			105	60	6*10 ⁻⁵
PEEK	1 300	4 000			90	50	5*10 ⁻⁵

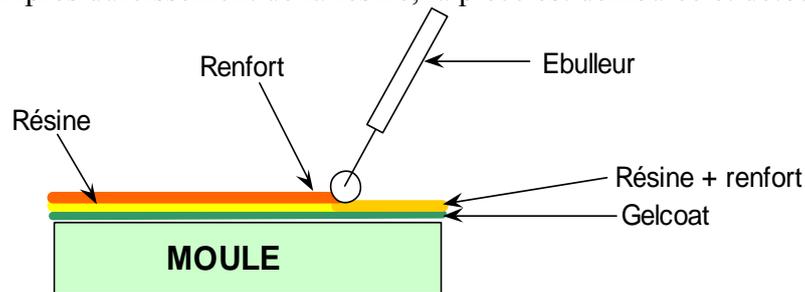
2. Les technologies de mise en œuvre

Les technologies dites en moule ouvert :

2.1. 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.



- **Cas d'utilisation**

- Procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces / an
- Pièces de grandes à très grandes dimensions
- Revêtement sur supports divers et in situ

- **Caractéristiques principales**

Avantages	Limites
Très larges possibilités de forme	Une seule face lisse
Pas de limite dimensionnelle	Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.)
Une surface lisse gelcoatée (aspect, tenue à la corrosion)	Qualité tributaire de la main d'œuvre
Propriétés mécaniques moyennes à bonnes	Faible cadence de production par moule
Investissements spécifiques très faibles	Espace de travail important
Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne	Conditions de travail médiocres

- **Matières premières**

- Renforts : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (taux de renfort volumique allant jusqu'à 35 % dans le cas du verre)
- Résines : polyesters, époxy, phénoliques, vinylesters
- Divers : catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone

- **Matériel**

- Moule : simple coque généralement en composite, éventuellement en plusieurs éléments assemblés
- Outillages à mains : ciseaux, pinces, ébulleurs, pistolet à peinture ou gel-coateuse

- **Energies**

- Electricité : éclairage, ventilation, chauffage
- Air comprimé : motorisation outillage, démoulage

- **Domaines d'application**

- Nautisme
- Piscine
- Génie chimique
- Transport, carrosserie (petites séries)
- Bâtiment, travaux public (coffrage)



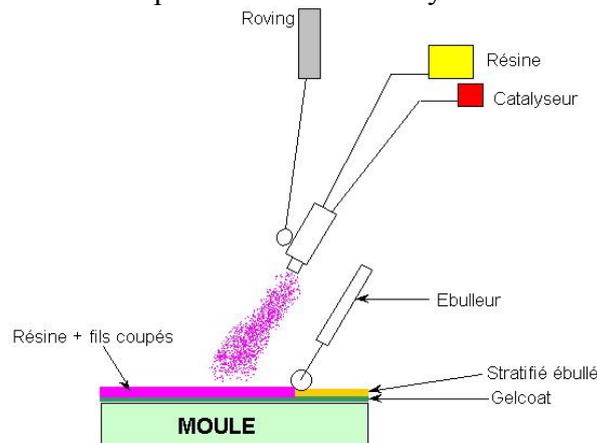
2.2. Moulage par projection simultanée

- **Principe**

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 préaccélérée est catalysée en continu lors de sa projection.



- **Cas d'utilisation**

- Production de pièces de moyennes à grandes dimensions
- Recherche de réduction des coûts par rapport au contact
- Petite et moyenne série

- **Caractéristiques principales**

Avantages	Limites
Très larges possibilités de forme et dimensions Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection Productivité plus élevée qu'au contact Coût du roving < mat Investissements très modérés Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne	Une seule face lisse Propriétés mécaniques moyenne Qualité tributaire de la main d'œuvre Conditions de travail très médiocres si absence d'agencements nécessaires

- **Matières premières**

- Renfort : fibre de verre sous forme de roving assemblés, taux de renfort de 25 à 35 % en volume.
- Résines : principalement polyesters mais aussi phénoliques ou hybrides
- Divers : catalyseurs, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant

- **Matériel**

- Moules en composites (simple coque)
- Machine de projection (mélange interne ou externe)
- Dispositif de ventilation, extraction des vapeurs de styrène
- Petit outillage de stratification à la main

- **Energies**

- Electricité : éclairage, ventilation, chauffage
- Air comprimé : motorisation outillage, démoulage

- **Applications**

- Production de bateaux
- Revêtements
- Bâtiments : façade, articles sanitaires
- Travaux public : coffrages
- Capotage industriel
- Panneaux sandwichs pour camions isothermes



Les technologies dites en moule fermé :

2.3. Moulage sous vide

- **Principe**

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

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée 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.

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

- **Cas d'utilisation**

- Production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses
- Amélioration des conditions de travail et d'hygiène (réduction des émanations de styrène)

- **Caractéristiques principales**

Avantages	Limites
Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées Qualité non tributaire de la main d'œuvre Qualité constante Bonne cadence de production Nécessite peu de surface Investissements très modérés Bonnes conditions de travail et d'hygiène	Possibilités de formes plus réduites qu'au contact Mise au point parfois difficile

- **Matières premières**

- Renforts : mats fils coupés ou fils continus, préformes, tissus
- Résines : polyester, vinylester, phénolique, époxy
- Divers : catalyseur, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant

- **Matériel**

- Moules et contre-moules en composites ou pellicules souples
- Pompes à vide avec réservoir tampon

- **Energies**

Electricité, air comprimé souhaitable (démoulage)

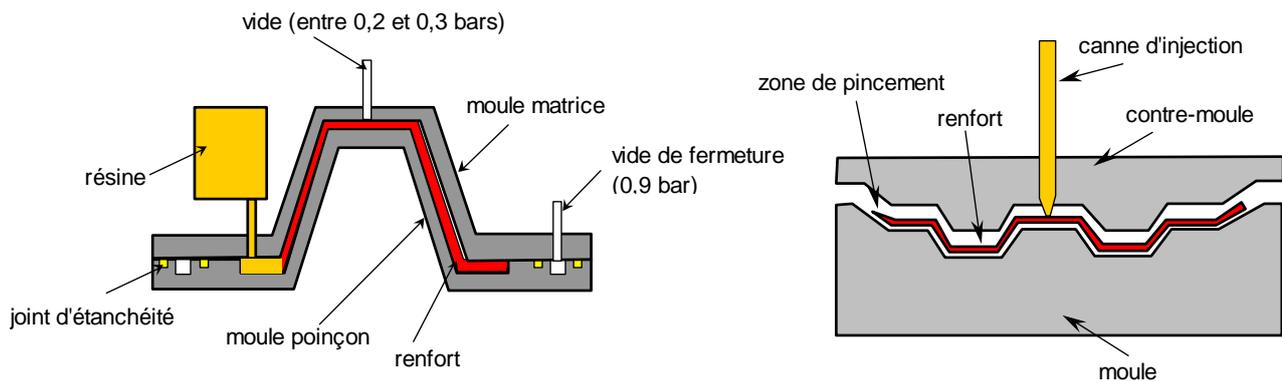
- **Domaines d'application**

- Bâtiment : coupoles d'éclairage zénithal
- Transports : panneaux sandwichs pour caion isothermes, conteneurs
- Pièces diverses : casques de protection enveloppants, capotages...

2.4. Moulage par injection basse pression de résine - RTM

• Principe

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) 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, accélérée et catalysée, 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.



• Cas d'utilisation

- Procédé pour moyennes séries : 1000 - 10000 pièces/an
- Pièces demandant une reproductibilité d'épaisseur

• Caractéristiques principales

Avantages	Limites
Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées Dimensions jusqu'à 7 m ² Qualité non tributaire de la main d'œuvre Qualité constante Cadence de production élevée Nécessite peu de surface Investissements très modérés Bonnes conditions de travail et d'hygiène	Limité aux formes peu ou moyennement complexes Taux de renforcement et caractéristiques mécaniques moyennes à élevées Nécessité d'effectuer des finitions post moulage

• Matières premières

- Renforts : mats de fils coupés ou continu, préformes, voiles de surface ou/et tissus de verre, carbone, aramide. Taux de renfort : 20 - 60 %
- Résines : polyesters, phénoliques (résols), époxydes, vinylesters
- Divers : catalyseurs, accélérateur, pigments, charges, agents démoulants, solvant de rinçage

- **Matériel**

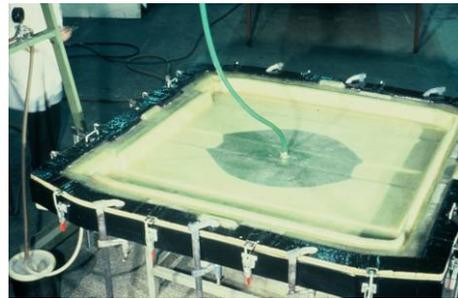
- Moule et contre-moule en composite rigides et résistants avec système de fermeture rapide. Variantes métallo-composites et métalliques.
- Appareillage d'injection de résine : pot sous pression ou système à pompes doseuses
- Appareillage de manutention des moules (ouverture/fermeture)

- **Energies**

- Electricité, air comprimé

- **Domaines d'application**

- Eléments de carrosserie pour véhicules de tourisme ou utilitaires
- Petits articles sanitaires
- Cuves de petites et moyennes dimensions
- Capotages
- Pièces industrielles diverses
- Fourches de vélo, raquettes de tennis



2.5. Moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression

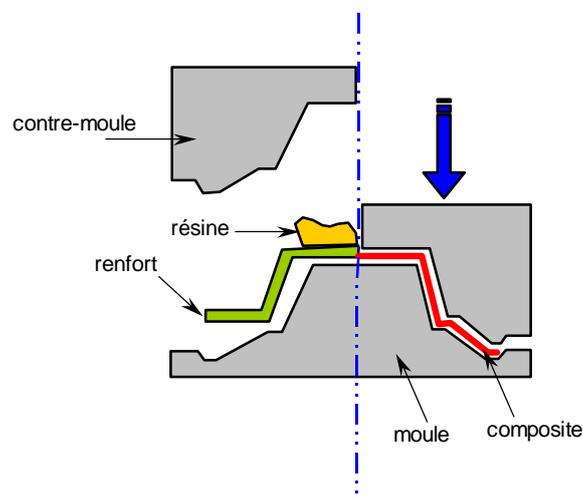
- **Principe**

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 versé 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 métaloplastiques, voire métalliques, et d'un système de régulation thermique basse température.



- **Cas d'utilisation**

- Production en moyenne séries (500 à 5000 unités)

- **Caractéristiques principales**

Avantages	Limites
Deux faces lisses Dimensions jusqu'à 7 m ² Qualité non tributaire de la main d'œuvre Qualité constante Cadence de production élevée Nécessite peu de surface Investissements très modérés Conditions de travail et d'hygiène normales	Limité aux formes peu complexes Limité aux dimensions moyennes (2m ²) Durée de vie des moules courtes (1500 à 4000 pièces) Nécessité d'effectuer des finitions post moulage

- **Matières premières**

- Renforts : mat de fils continus, liant basse solubilité
- Résine : polyester
- Divers : catalyseurs, accélérateurs, charges, pigments, agents démoulants

- **Matériel**

- Presse compression basse pression (30 t/m² utiles) à vitesse de fermeture réglable
- Moule et contre-moule : caissons en composites et béton de résine

- **Energie**

- Electricité, air comprimé

- **Domaines d'application**

- Capotages divers
- Bacs de manutention



2.6. L'infusion de résine sous membrane souple

Le principe repose sur le 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.

- **Cas d'utilisation**

- Production : petite séries (facilement adaptable, permet la réalisation de grande surface)
- Pièces à très bonne résistance mécanique

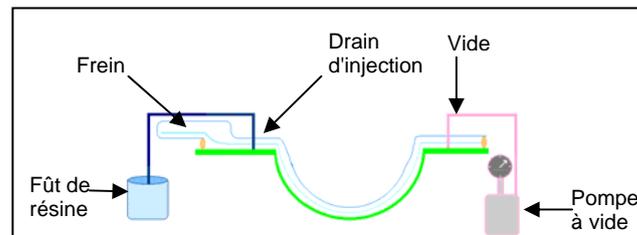
- **Matières premières**

- Résines : polyester, époxyde
- Renforts : Tous types de renfort (tissus, matériaux sandwiches etc.)

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Pas d'émission de COV Excellente reproductibilité et homogénéité des caractéristiques Taux de renfort pouvant atteindre 65 % Bon compactage des tissus Bonne imprégnation	Difficulté de mise en œuvre et de la gestion des paramètres Matériel non réutilisable

- **Matériel**



- Pompe à vide
- Fût de résine
- Moule femelle gel-coaté, tissus de drainage (Soric[®], mousses Diab[®], filet Diatex[®]) et une bâche souple

- **Energie**

- Electricité

- **Domaine d'application**

- Industrie automobile/nautique
 - Capot voiture
 - Coque bateau



Les technologies pour grandes séries :

2.7. Moulage par injection de compound - BMC

- **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. 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.

- **Cas d'utilisation**

- Production en grandes séries
- Pièces de taille petite et moyenne, plus ou moins épaisses

- **Caractéristiques principales**

Avantages	Limites
Possibilité de formes très complexes, finitions intégrés Grande précision de moulage Bon état de surface Cadences de moulage élevées en fonction de l'épaisseur Coût de matière réduit Non tributaire de la main d'œuvre Bonnes conditions de travail et d'hygiène	Investissements assez élevés Propriétés mécaniques modestes Nécessité de doser la matière Limites dimensionnelles

- **Matières premières**

Compound du commerce ou compound préparé en interne :

- Résine polyester (principalement), catalyseur à chaud, agent de démoulage, charges, pigments, éventuellement agents anti-retrait et de mûrissement
- Renfort : fils de verre coupés (6 à 25 mm) à raison de 10 à 28 %

- **Matériel**

- Préparation : moyens de pesée, malaxeur pour la préparation du compound
- Moulage : moule en acier usiné chromé thermorégulé, presse d'injection ou de compression à vitesse de fermeture réglable

- **Energies**

- Electricité, air comprimé

- **Exemple d'application**

- Pièces pour appareillages électriques
- Pièces automobiles sous capot
- Pièces industrielles diverses

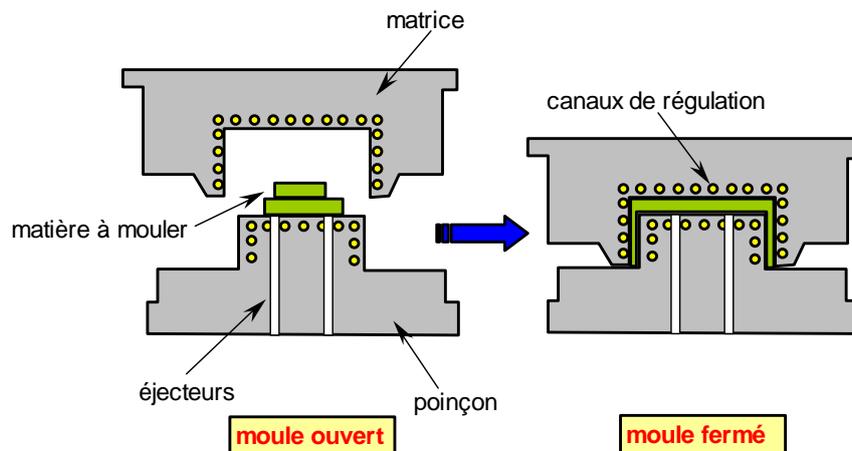


2.8. Moulage par compression de mat préimprégné - SMC

- **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) entraîne le fluage de la matière et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court (en fonction de l'épaisseur) permet un démoulage rapide.



- **Cas d'utilisation**

- Production en grandes séries
- Pièces d'aspect

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Possibilité de formes très complexes, finitions intégrées Capacité dimensionnelle élevée : jusqu'à 3-5 m ² Grande précision de moulage Etat de surface carrosserie prêt à peindre Bonnes propriétés du matériau : mécaniques, thermiques, tenue au feu, anti-corrosion Cadences de moulage élevées Coût de matière réduit Non tributaire de la main d'œuvre Larges possibilités d'automatisation Bonnes conditions de travail et d'hygiène	Investissements élevés à très élevés Cadence de moulage et constance de qualité encore un peu insuffisantes pour la grande série automobile

- **Matières premières**

Mat préimprégné du commerce ou compound préparé en interne :

- Mélange d'imprégnation : polyesters, agents compensateurs de retrait, charges, catalyseurs, inhibiteurs, agents de mûrissement, agents de démoulage, pigments
- Renfort : fils de verre spécifique sous forme de roving (taux de renfort 25 à 50 % pondéral)

- **Matériel**

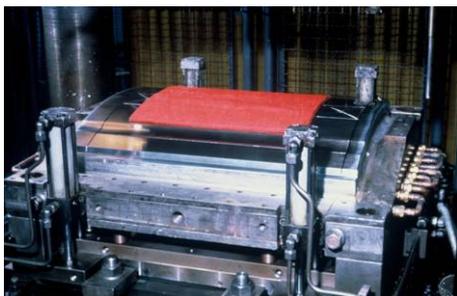
- Eventuellement, ligne de production de mat préimprégné
- Presse compression haute pression, à vitesses de fermeture réglables
- Moules en acier chromés thermorégulés

- **Energies**

Electricité, air comprimé, éventuellement circuit de chauffage (huile, vapeur)

- **Domaines d'applications**

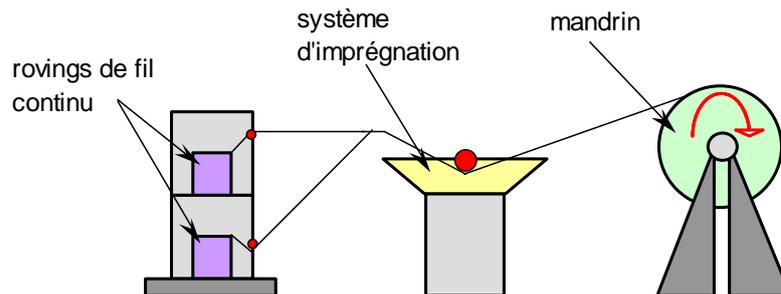
- Industrie automobile (tourisme et utilitaire) : pièces de carrosseries sous capots, pièces de protection
- Industrie électrique : coffrets de comptage, réglette d'éclairage
- Pièces industrielles diverses



2.9. Moulage par enroulement filamentaire

- **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.



- **Cas d'utilisation**

- Toutes pièces de révolution à produire en série
- Pièces nécessitant une résistance élevée

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Pièces à haute, voire très haute résistance (taux de renfort jusqu'à 80 % pondéral, fils continus orientés selon la direction des contraintes) Très grande latitude dimensionnelle (de quelques mm à plusieurs mètres en diamètre et longueur) Part de main d'œuvre réduite : mécanisation Cadences de production élevées	Formes de révolution seulement Une seule face lisse Investissements assez élevés (lignes industrielles)

- **Matières premières**

- Renforts : rovings spécifiques à l'enroulement (éventuellement préimprégnés), roving coupé, mats de fils coupés, tissus uni/bi-directionnels, mats de surface
- Résines : polyester, époxy, vinylester, phénoliques
- Divers : catalyseurs, accélérateurs

- **Matériel**

- Machines d'enroulement, très nombreux types adaptés à chaque cas d'application
- Mandrins

- **Energie**

- Electricité, air comprimé

- **Domaine d'application**

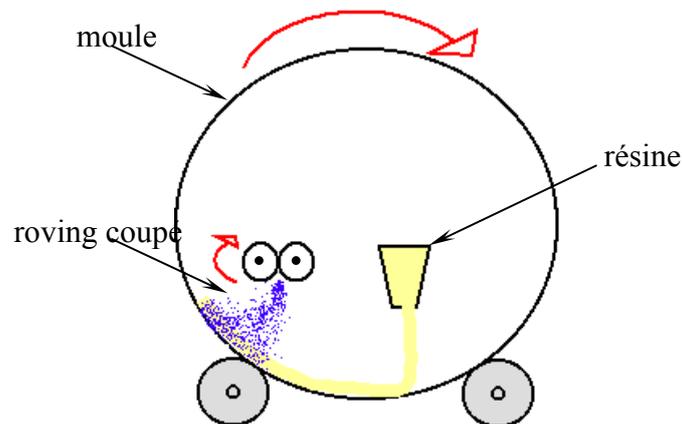
- Tuyaux devant résister à de fortes pressions, citernes de transport, réservoirs de stockage
- Appareillage de génie chimique
- Industrie électrique
- Armement (tubes lance-roquettes...)
- Automobile : ressorts de suspension
- Sport : perche, canne à pêche, bouteille de plongée



2.10. Moulage par centrifugation

- **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 catalysée et accélérée 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.



- **Cas d'utilisation**

- Production de tuyau (écoulement gravitaire et basses pression)
- Production de grandes viroles (moulage par rotation : centrifugation basse vitesse)

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Deux faces parfaitement lisses Grandes possibilités dimensionnelles Matériau de très bonne qualité (pas de bulles) Aucune perte de matière Haut niveau de mécanisation, possibilité d'automatisation complète Bon niveau de productivité	Seulement les formes cylindriques (ou très faiblement coniques) Pas de possibilité de variation d'épaisseur Caractéristiques mécaniques moyennes Investissements élevés ; les moules doivent être parfaitement équilibrés

- **Matières premières**

- Résines : polyesters, vinylesters, éventuellement époxy
- Renforts : roving coupé in situ (mats disposés à l'arrêt pour petits diamètres)
- Divers : systèmes catalytiques, pigments, sable

- **Matériel**

- Machine de centrifugation, dispositif d'alimentation / coupe de roving, résine
- Moules : diamètre 0,1 à 0,5 mètres

- **Energie**

- Electricité, air comprimé

- **Exemple d'application**

- Tuyaux : jusqu'à 2 m de diamètre
- Cuves (diamètre 1 à 2 m)
- Silos (diamètre 4 à 5 m, longueur 10 à 12 m)
- Cages de pressoirs à vin

2.11. Moulage par pultrusion

- **Principe**

Le procédé est destiné à la réalisation en continu de profilés de sections constantes.

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.

- **Cas d'utilisation**

Réalisation de profilés en quantités significatives (plusieurs milliers de mètres linéaires).

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Toutes formes de sections, même creuses, angles vifs Aspect de surface lisse, moyen Très grande résistance mécanique, surtout longitudinale Bonne productivité : 0,2 à 2,5 m/min selon résines et sections Très faible part de main-d'œuvre Bonnes conditions de travail et d'hygiène niveau de productivité	Pas de possibilité de variation de sections Profilé nécessairement rectiligne sauf Pull Forming Investissement relativement élevé

- **Matières premières**

- Renforts : rovings directs, fils texturés, mats fil continu (liant insoluble), tissus
- Résines : polyester, époxy, vinylester, acrylique, phénolique
- Divers : systèmes durcisseurs, charges, pigments, lubrifiants

- **Matériel**

- Ligne de pultrusion : cantres (alimentation renforts), organes de guidage, système d'imprégnation, filière avec système de chauffage, banc de traction, banc de découpe.

- **Energie**

- Electricité, air comprimé

- **Domaine d'application**

- Boulons d'ancrage, âmes d'isolateurs électriques haute tension, cannes à pêche
- Tubes de structure
- Tous profilé isolant électrique ou résistant à la corrosion
- Racks à bagages pour bus

2.12. Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées (R.R.I.M.)

- **Principe**

Il s'agit principalement du moulage de polyuréthanes rigides.

Le renfort, fibre de verre broyée, est incorporé dans le polyol, à raison de 10-20 % pondéral (sur le produit final).

Le processus de moulage reste le même que pour les PU non renforcés : alimentation dosée sous pression de chacun des deux composants (polyol et isocyanate), mélange, injection dans un moule fermé, réaction, durcissement, démoulage.

- **Cas d'utilisation**

- Production : moyennes à grandes séries
- Pièces pour lesquelles les propriétés des PU sont insuffisantes

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Pièces de formes complexes, de moyennes dimensions Faible densité Propriétés mécaniques nettement meilleures que celles de PU purs Réduction du retrait thermique Tenue en température Aspect correct après peinture	Investissement relativement élevé

- **Matières premières**

- Résines : polyols et isocyanate
- Renfort : fibre de verre broyée (0,1 à 0,3 mm)

- **Matériel**

- Machine à injecter les polyuréthanes
- Moule / contre-moule : composite, alliage léger, acier (selon les séries à produire), système de fermeture de moule

- **Energie**

- Electricité, air comprimé

- **Domaine d'application**

- Industrie automobile
 - Extension d'ailes
 - Eléments d'aménagement d'intérieur d'habitacle

2.13. Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S.R.I.M.)

- **Principe**

Il s'agit d'un moulage entre moule et contre-moule. Le renfort sous forme de mats ou de tissus (20 à 60 % pondéral) est disposé préalablement dans le moule chauffé (100 - 150 °C).

Le système de résine à deux composants très réactifs est injecté sous pression (20 - 30 bars). Après durcissement (1 à 3 min), la pièce peut être démoulée.

- **Cas d'utilisation**

- Production : moyennes à grandes séries (mais inférieure au RRIM)
- Pièces à bonne résistance mécanique

- **Matières premières**

- Résines : polyuréthanes, polyisocyanurate, polycarbonate
- Renforts : mats de fils continus préformés, tissus

- **Principales caractéristiques**

Avantages	Limites
Pièces de formes type "embouti", moyenne complexité Matériau de moyenne densité (1,2 à 1,7) Bonnes propriétés mécaniques Temps de cycle de moulage compatibles avec la grande série (1 à 2 min) Procédé entièrement automatisable	Limites dimensionnelles Investissement relativement élevé (procédé encore au stade de développement industriel)

- **Matériel**

- Machine d'injection des mélanges à deux composants
- Moule acier usiné, poli, avec système de chauffage
- Presse pour ouverture / fermeture du moule sous pression

- **Energie**

- Electricité, air comprimé

- **Domaine d'application**

- Industrie automobile
- Poutre de pare-chocs
- Traverse, longeron, châssis

3. Réglementation

Dans le cadre de la convention de Genève sur la pollution atmosphérique, les Composés Organiques Volatils (COV) font l'objet de protocoles internationaux de réduction des émissions. Le dernier des protocoles concernant les COV a été signé à Göteborg en 1999. Il a pour objectif la réduction des surfaces acidifiées et eutrophisées en Europe à l'horizon 2010 ainsi que la réduction du nombre de jours de dépassement des seuils de protection de la santé pour l'ozone. Pour la France, les plafonds d'émissions de polluants tous secteurs confondus (transports, habitation, usage de solvants, agriculture...) sont les suivants :

	Emissions annuelles (kt)			
	SO ₂	NO _x	COV	NH ₃
Emissions en France en 1998	840	1650	2340	830
Plafonds d'émissions en France en 2010 selon le protocole de Göteborg	400	860	1100	780
Plafonds d'émissions en France selon le directive plafonds d'émissions (position du 2 aout 2001)	375	810	1050	780

La réglementation française a été récemment modifiée afin de prendre en compte les exigences issues de la **directive européenne n° 1999/13 du 11 mars 1999 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations**. L'arrêté du 2 février 1998 modifié et les nombreux arrêtés types en cours d'élaboration fixent des contraintes applicables aux installations nouvelles dès leur entrée en service et aux installations existantes au 30 octobre 2005, sauf exceptions ou dérogations.

L'exploitant a deux options :

- soit respecter les valeurs limites de COV, pour les émissions canalisées et diffuses ;
- soit mettre en place un schéma de maîtrise des émissions (SME) (art. 27.e) de l'arrêté du 02/02/1998) : ce schéma garantit que le **flux total annuel** des émissions de COV ne dépasse pas celui qui serait atteint si les valeurs limites d'émissions canalisées et diffuses étaient appliquées. Il permet de s'exempter du respect des valeurs limites d'émission (canalisées et diffuses, à l'exception des solvants à phrases de risque particulières*, qui restent soumis à des valeurs limites). Pour les COV, la mise en place d'un SME n'est pas une obligation mais **une opportunité à évaluer par l'exploitant**. Il permet un étalement dans le temps des investissements et des efforts de recherches correspondants. Le SME s'applique à la fois aux COV ayant pour origine les solvants mais aussi à tout COV ayant une origine différente. La circulaire du 23/12/2003 fixe les modalités de calcul de l'émission cible à respecter.

La filière des composites polyesters fait intervenir :

- les fournisseurs de matières de base (fibres de verre, matières plastiques, produits chimiques variés tels que catalyseurs, etc.);
- les industriels du tissage de fibres, les entreprises spécialisées dans les formules et les semi-produits, etc.
- les transformateurs qui élaborent des éléments en composites pour leur propre compte ou pour le compte de donneurs d'ordre ;
- les entreprises utilisatrices.

3.1. Origine des émissions de COV

Les émissions de COV proviennent principalement de l'utilisation de styrène et de solvants de nettoyage.

Le styrène est un monomère réactif qui participe activement à la polymérisation des résines polyester. Une grande partie de ce composé participe à la réaction et une petite partie se volatilise sous forme de COV. Le styrène se retrouve notamment dans des produits tels que les résines, les gel-coat, les colles polyester.

La technologie employée influence également les émissions, sachant que les procédés en moule ouvert sont les plus émetteurs.

- **Styrène n'ayant pas réagit**

Les émissions de styrène dépendent de la surface d'échange entre le styrène et l'atmosphère.

Plus cette surface est importante, plus les émissions sont importantes. Dans les procédés en moule ouvert, les émissions évoluent en fonction du temps, de la façon représentée à la figure 1.

On distingue :

- Les émissions dynamiques : émissions ayant lieu pendant la projection ou l'imprégnation au rouleau ;
- Les émissions statiques : émissions pendant la phase de repos, de roulage et de polymérisation.

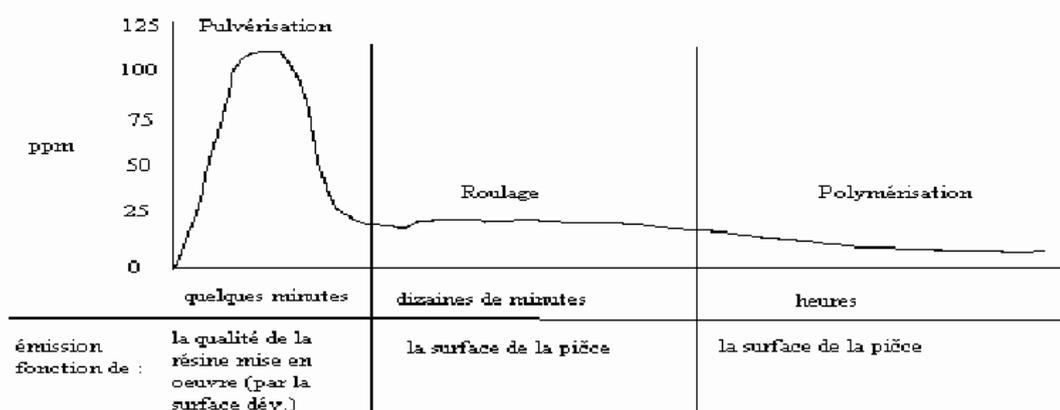


Figure 1 : Evolution de la concentration de styrène en fonction du temps
(Application en moule ouvert : contact et projection simultanée)

Cette courbe peut également évoluer en fonction du procédé d'application.

En moyenne, la répartition des émissions est la suivante :

Application par pulvérisation	Application manuelle (contact)
Pulvérisation : 55 % Roulage : 30 % Polymérisation : 15 %	Application : 50 % Roulage : 30 % Polymérisation : 20 %

L'évaporation de styrène dépend de nombreux facteurs qu'il est nécessaire de comprendre pour pouvoir mettre en œuvre les solutions de réduction des émissions.

Paramètres influençant les émissions dynamiques :

- La teneur en styrène de la résine. Les émissions augmentent avec la teneur en styrène de la résine. Les résines à faible teneur en styrène (FTS) permettent de réduire les émissions dynamiques et statiques.
- La température ambiante qui influence le taux d'évaporation.
- La température du produit qui influence la viscosité.
- La circulation de l'air sur la pièce (en cabine, vitesse d'air doit être de 0,6 m/s).
- Les techniques de pulvérisation. Plus la pression au sortir de la buse de pulvérisation est élevée, plus l'overspray et la surface d'échange sont importants. L'émission est proportionnelle au débit de projection et inversement proportionnelle à la taille des gouttes (taille moyenne : 150 à 200 μ , surface d'évaporation : 50 m²/kg).
- Le savoir-faire des opérateurs. L'angle de projection et la distance à la pièce influencent les émissions. La distance optimale se situe entre 0,5 et 0,8 m.
L'angle optimal est de 90 °. Une distance élevée et un mauvais angle de pulvérisation augmentent les surfaces d'échange et le risque de perte de produit.

Paramètres influençant les émissions statiques :

- La teneur en styrène des résines.
- Le traitement des résines en faibles émissions (Low Styren Emission, LSE). L'adjonction de certains additifs dans la résine (cires et paraffines, faiblement solubles dans la résine) permet la formation d'un film barrière à la surface de la résine lors de la phase de polymérisation et de durcissement. Ce traitement permet de réduire les émissions de styrène durant la phase de polymérisation uniquement.
- Les mélanges réactifs réalisés. Les temps de gel dépendent des mélanges réactifs réalisés. Les émissions augmentent avec le temps de gel.

• L'usage de solvant de nettoyage

On se référera à la définition de solvant donnée au chapitre 4.2.

Le nettoyage est une activité indissociable du procédé de moulage car les outils d'application (rouleaux pinceaux, pistolets, têtes d'injection, etc.) doivent être nettoyés régulièrement. Les principaux solvants de nettoyage utilisés sont l'acétone et le chlorure de méthylène. La quantité de solvants de nettoyage varie en fonction du type de procédés mis en œuvre, des pratiques mises en œuvre (fermeture des contenants) et du tonnage de produit transformé.