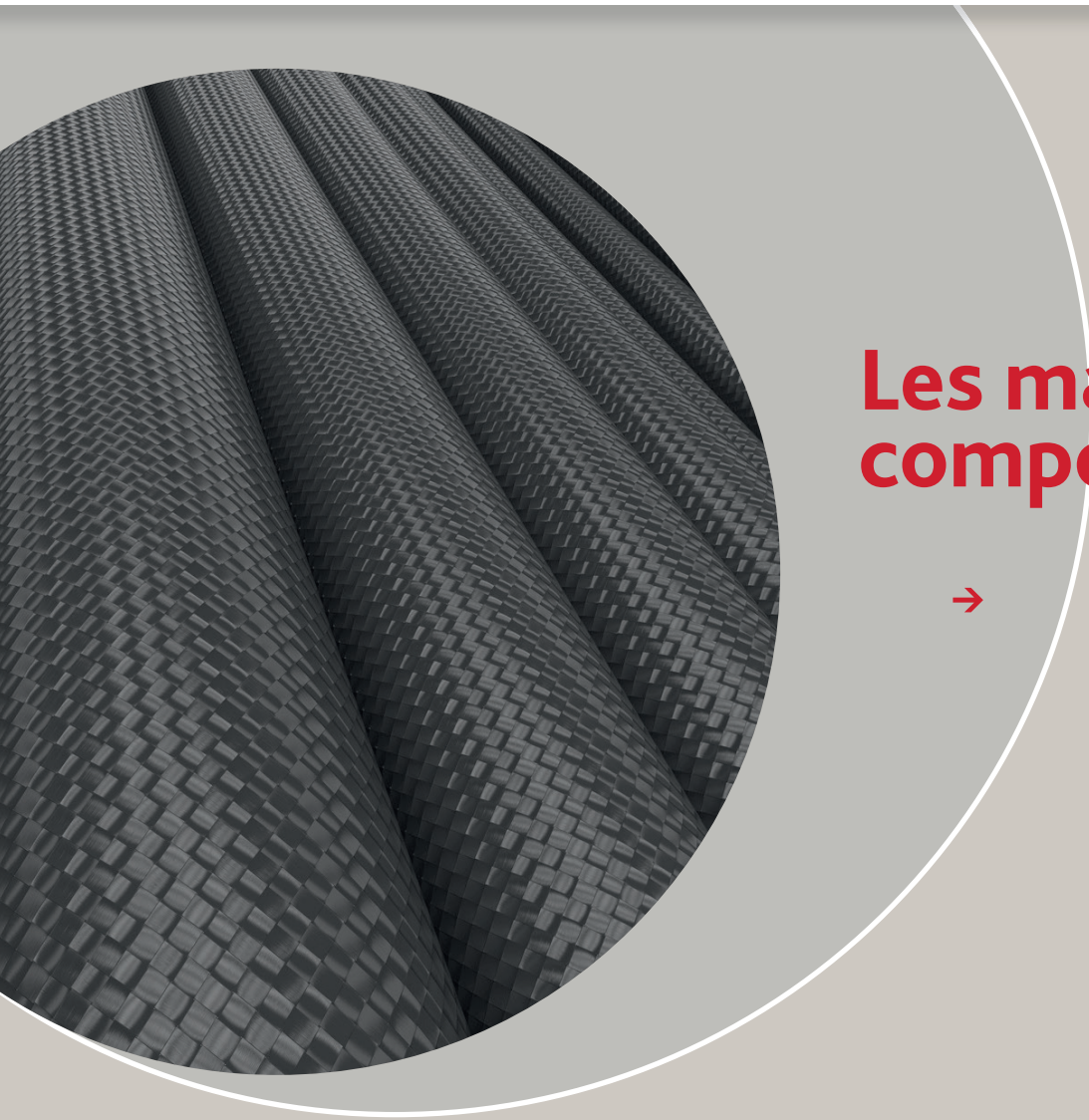


**DOSSIER
PÉDAGOGIQUE**



Les matériaux composites



Polymères thermoplastiques - Matrices - Silicones - Renforts - Principes de moulage - Charges et additifs - Polyuréthanes - Fibres - Polymères thermodurcissables



Les matériaux **composites**

Dossier créé avec la collaboration de
Marc Marzano - Action Composite
Pascal Celle - GNFA

→ SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| 1. Introduction..... | 5 |
| A. Le matériau composite : définition..... | 7 |
| B. L'intérêt des composites..... | 7 |
| C. Des exemples d'intégration de fonctions dans l'automobile..... | 8 |
| 2. Les composites dans l'industrie automobile..... | 9 |
| A. Le marché des composites..... | 9 |
| B. Les contraintes et avantages pour l'industrie automobile..... | 10 |
| C. L'évolution historique des composites dans l'automobile..... | 12 |
| 3. Les grandes familles de composites..... | 14 |
| A. Les composites à matrice organique..... | 14 |
| B. Les composites à matrice et renfort métalliques..... | 19 |
| C. Les composites à base d'élastomère..... | 20 |
| D. Les biocomposites..... | 24 |
| 4. Les constituants des matériaux composites..... | 25 |
| A. Les matrices..... | 25 |
| B. Les charges et additifs..... | 36 |
| C. Les gelcoats..... | 37 |
| D. Les renforts..... | 38 |
| E. Les âmes..... | 41 |
| 5. La structure des pièces composites..... | 42 |
| A. Les structures monolithiques..... | 42 |
| B. Les structures sandwich..... | 42 |
| C. Les structures 3D..... | 44 |
| 6. La mise en œuvre des matériaux composites..... | 45 |
| A. Les procédés manuels..... | 45 |
| B. Les procédés moyenne série..... | 49 |
| C. Les procédés grande série..... | 69 |
| D. Les procédés de moulage en continu..... | 79 |
| 7. Les endommagements et les limites des composites..... | 81 |
| A. Les défauts internes..... | 81 |
| B. Les effets à prendre en compte sur le comportement..... | 84 |
| C. Les défauts de surface..... | 84 |
| Bibliographie..... | 88 |

1 [INTRODUCTION]

Présents dans quasiment tous les secteurs industriels, les matériaux composites sont largement utilisés dans l'industrie automobile. Ils occupent ainsi une place importante dans le secteur de la grande série et du véhicule sportif, aussi bien pour des pièces d'aspect que de structure.

Depuis leur avènement dans les années trente et jusqu'à nos jours, les matériaux composites ont fortement participé au développement de nos technologies. Grâce à eux, la consommation des véhicules de transport a été notablement réduite ; le nautisme s'est démocratisé, les voitures de courses sont devenues de plus en plus rapides et l'airbus A380 a pu prendre son envol.

Les matériaux composites se démarquent par leur légèreté et leur facilité de mise en oeuvre. Leur résistance mécanique, physique et chimique offre un large éventail de possibilités en termes d'utilisation, de design, de géométrie et d'intégration de fonctions. S'adaptant parfaitement à toute sorte d'environnement, même les plus hostiles, ils s'intègrent totalement à notre quotidien à tel point qu'ils peuvent passer inaperçus.

L'industrie automobile reste un grand champ d'investigation pour les matériaux composites. A ce jour, plus de 30 000 tonnes de matières plastiques et composites sont utilisées pour la fabrication de pièces de carrosserie, notamment dans les pare-chocs, les ailes, les portes latérales, les ouvrants arrières, les pièces sous capot....

Capot de la Mégane R26-R



Source : www.focusauto.fr

Bac de roue de secours et plancher de coffre



Source : forum-auto.com

Calandre de poids lourds
Renault premium



Source : www.transportachat.com

Peau extérieure Hayon Peugeot



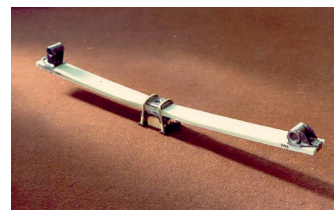
Source : www.voituredefuture.autodeclics.com

Arbre de transmission



Source : Tectos gmbh

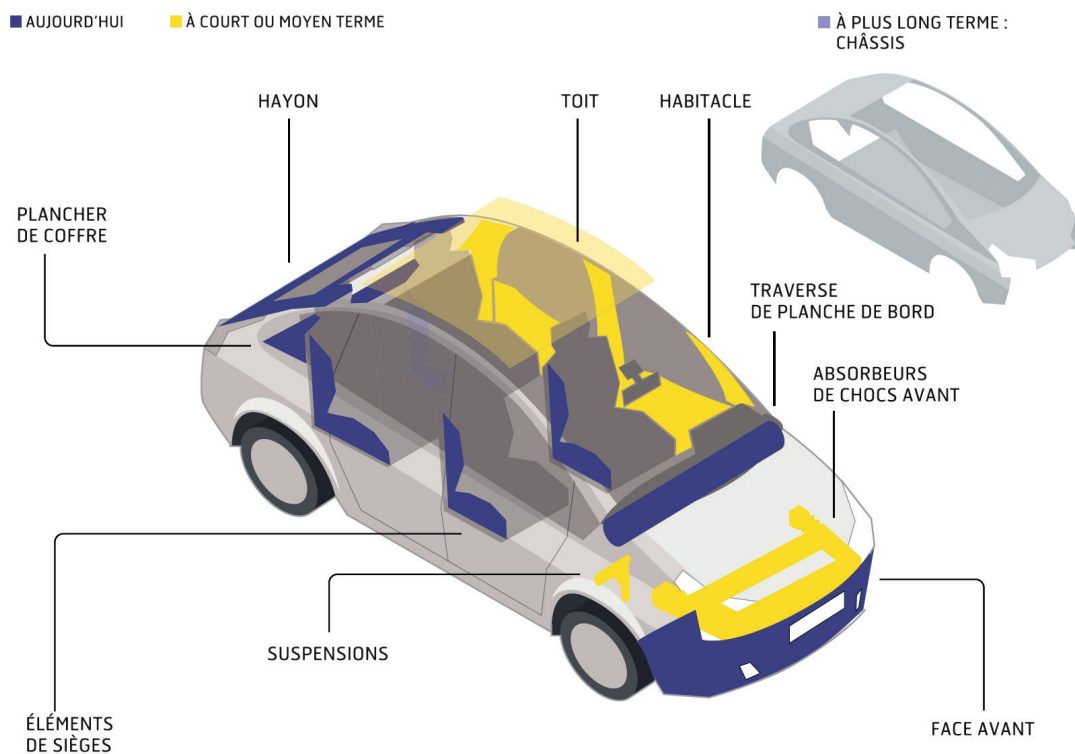
Lame ressort arrière



Source : Renault

Tableau 1 – Exemples de pièces automobiles en matériaux composites

1 [INTRODUCTION]



IDÉ / SOURCE : « LES ECHOS »

Photo 1 – La place des matériaux composites dans une automobile en 2014

Encore destinés à une élite de la production automobile, les matériaux composites devraient se développer en grande série à moyen terme. Dans le contexte de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, des objectifs limites ont été fixés au niveau européen. À ce jour, les émissions des véhicules représentent près de 12 % des émissions globales de CO₂ au niveau mondial.

Parmi les moyens permettant de diminuer les émissions de CO₂ des voitures, l'allègement est l'un des principaux leviers envisagés. Du fait de leur masse réduite, les matériaux composites sont l'un des meilleurs facteurs d'allègement permettant de respecter les futures normes d'émissions de COV.

D'autres part, ils autorisent une plus grande liberté de géométrie, favorisent l'intégration de fonction permettant de réduire le nombre de pièces dans un assemblage et ont des performances mécaniques spécifiques très élevées.

D'ici à 2020, les normes auront évolué et les nouvelles voitures en circulation en Europe ne devront consommer que 95 g de CO₂/km. La réduction de la masse des véhicules permettra une réduction de la consommation d'énergies et une plus grande autonomie pour les voitures électriques. Pour répondre à cette problématique de masse, l'utilisation des matériaux composites est impérative. Les constructeurs allemands ont misé sur le développement des composites à matrice thermodurcissable alors que les constructeurs Français se tournent vers les composites à matrice thermoplastique. Il faut également insister sur le fait qu'à ce jour, de nombreux projets sont en cours de développement.

1 — [INTRODUCTION]

→ A. LE MATÉRIAU COMPOSITE : DÉFINITION

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. (source Action Composite)

Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple, le béton, la boue, le contreplaqué...), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la figure 1.

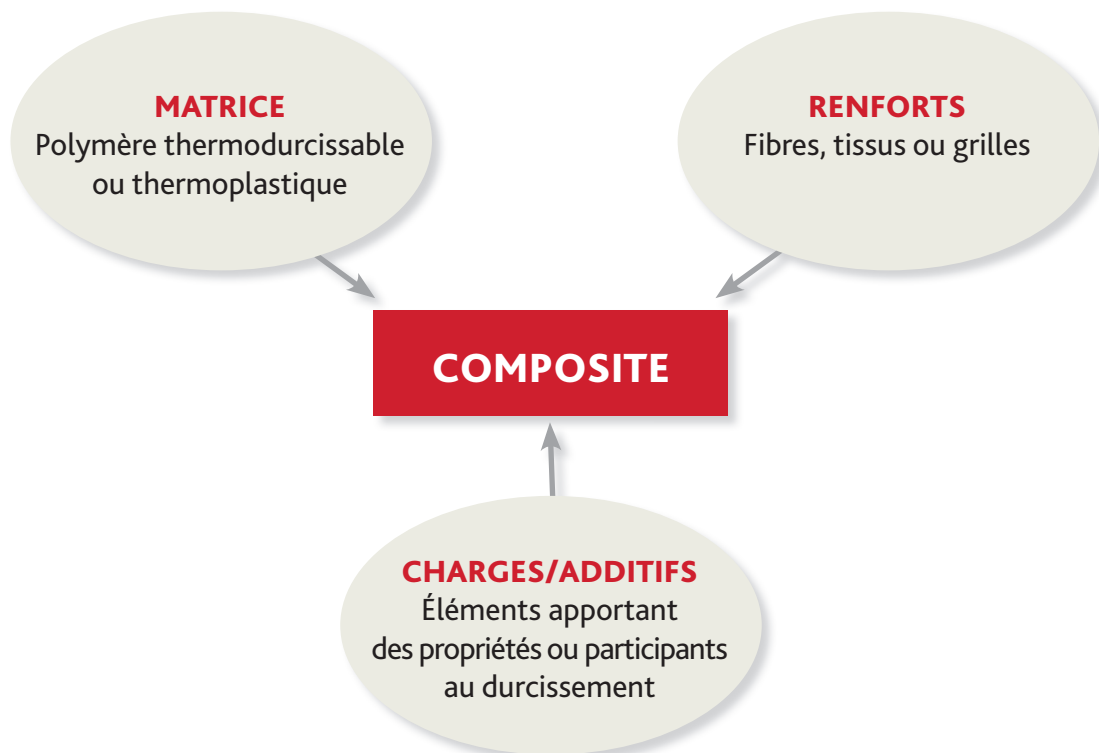


Figure 1 - Composition d'un matériau composite

→ B. L'INTÉRÊT DES COMPOSITES

Les matériaux composites, en fonction de leurs constituants, présentent un grand nombre d'intérêts.

D'un point de vue mécanique, ils offrent d'excellentes propriétés en traction, flexion, compression, cisaillement plan et transverse ainsi qu'une excellente absorption aux chocs. Leur résistance mécanique combinée à leur faible densité en font un élément incontournable des conceptions actuelles qu'elles soient structurelles ou non.

D'un point de vue physico-chimique, ils s'adaptent parfaitement à différents milieux ambiants et peuvent être très performants en termes de résistance aux produits chimiques, au feu, ou à la corrosion.

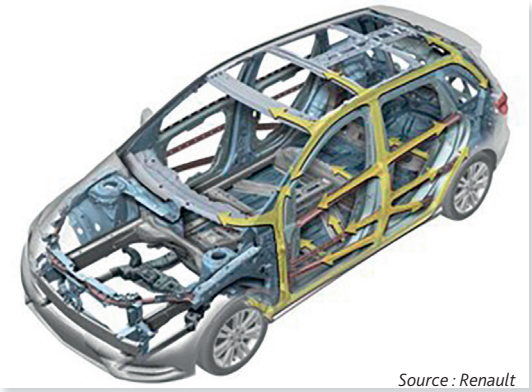
Néanmoins, leur plus grand intérêt réside dans la possibilité de pouvoir intégrer plusieurs fonctions en une seule opération réduisant de fait et de façon conséquente, le nombre de pièces d'un ensemble mécanique ou d'une conception et par là même son coût de revient.

Bien que leur fabrication nécessite des investissements parfois lourds en termes d'outillages de moulage, ils constituent un compromis technico-économique intéressant lorsqu'ils sont fabriqués en série.

1 — [INTRODUCTION]

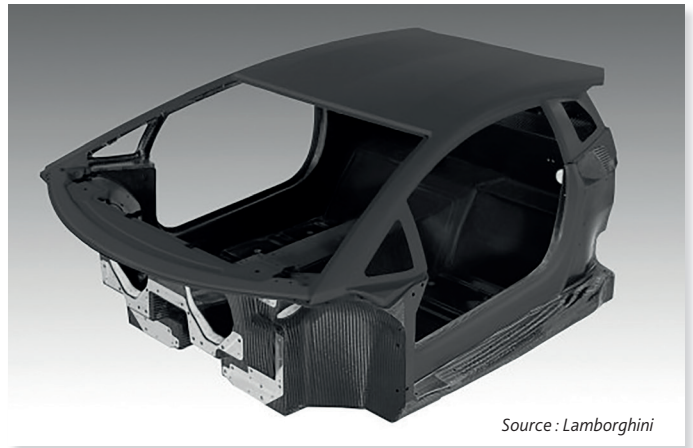
→ C. DES EXEMPLES D'INTÉGRATION DE FONCTIONS DANS L'AUTOMOBILE

Les photos ci-dessous nous montrent à quel point l'intégration de fonction a permis de réduire de façon conséquente le nombre de pièces d'un assemblage aussi complexe qu'une caisse autoporteuse.



Source : Renault

Photo 2 – caisse autoporteuse.
Construction classique en acier



Source : Lamborghini

Photo 3 - Châssis monocoque de Lamborghini Aventador LP 700-4 réalisé par drapage de prépregs en autoclave

● Higate : technologie hybride TD/TP

Une association adaptée aux ouvrants arrières

| | | Thermodur SMC | Thermoplast. PP | |
|------------------------------|------------------------|---------------|-----------------|------------------------------|
| Module | Mpa | 12 000 | 1 800 | } Doublure structurelle SMC |
| Contrainte Max | MPa | 160 | 20 | |
| Coeff dilatation | $10^{-6} \cdot K^{-1}$ | 17 | 45 | |
| Comportement impact | | ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | } Panneaux de carrosserie TP |
| Qualité aspect | | ■ ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | |
| Intégration fonction / style | | ■ ■ ■ | ■ ■ ■ ■ | |



Photo 4 – La technologie Higate associant thermodurcissables et thermoplastiques

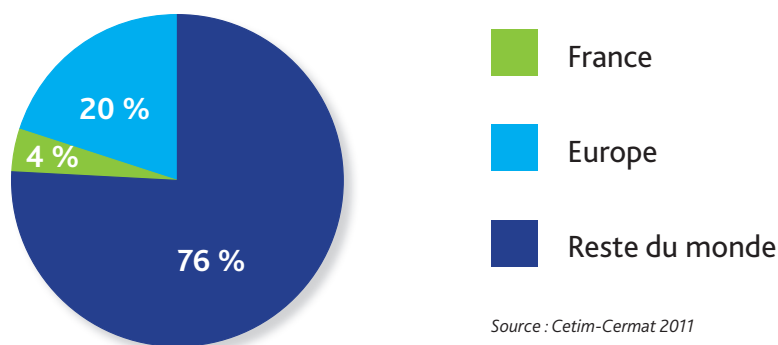
Les composites, qu'ils soient thermoplastiques ou thermodurcissables, occupent donc une part importante dans la conception des véhicules modernes.

2 [LES COMPOSITES DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE]

→ A. LE MARCHÉ DES COMPOSITES

En 2009, Frédérique Mutel, présidente du groupe JEC (première organisation dédiée à l'industrie des matériaux composites) présentait ainsi le marché des matériaux composites : « Le marché mondial des matériaux composites représente environ 62 milliards d'euros, pour 8,6 millions de tonnes et emploie 550 000 personnes ».

Figure 2 - La répartition géographique des composites



Les chiffres de 2010, nous indiquent qu'en France 300 000 tonnes de composites ont été produites pour un chiffre d'affaires de 2 milliards d'euros. Cette industrie compte environ 22 000 employés répartis dans plus de 500 entreprises dont 80% sont des PME.

| | |
|---|------|
| Transport (Renault, PSA, Alstom...) | 32 % |
| BTP (Vinci, Bouygues...) | 21 % |
| Energie (EDF...) | 15 % |
| Biens de consommation (Rossignol, Salomon...) | 10 % |
| Eolien (Vestas, GE Wind...) | 7 % |
| Tuyaux et réservoirs (Total, GDF-Suez...) | 7 % |
| Aérospatial (EADS, Dassault...) | 4 % |
| Nautisme (Bénéteau, Dufour...) | 4 % |

Source : Industrie et Technologies (Matériaux et chimie 2013)

Tableau 2 - Répartition du marché en France par secteur d'activités (en volume)

| | |
|---|------|
| Moulage par compression (SMC/BMC) | 35 % |
| Injection de granulés thermoplastiques (TPR) | 25 % |
| Moulage contact et projection | 18 % |
| Moulage par injection de résine liquide (RTM) | 5 % |
| Imprégnation en continu | 4 % |
| Moulage par injection-réaction (RIM) | 3 % |
| Drapage | 3 % |
| Estampage | 3 % |
| Pultrusion | 2 % |
| Enroulement filamentaire | 2 % |

Source : Industrie et Technologies (Matériaux et chimie 2013)

Tableau 3 - Répartition du marché en France par type de procédé (en volume)

Le procédé de fabrication le plus employé en France est la compression SMC/BMC car elle répond aux exigences de cadences élevées.

2 [LES COMPOSITES DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE]

→ B. LES CONTRAINTES ET AVANTAGES POUR L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

Les constructeurs automobiles utilisent de plus en plus les matériaux composites pour faire évoluer leurs offres en prenant en compte les contraintes économiques, concurrentielles mais aussi réglementaires : telles que les réglementations internationales relatives aux émissions sonores émises par le véhicule, à la sécurité lors de chocs ou encore à l'environnement (pollution, véhicules en fin de vie...). Ils doivent aussi limiter la consommation en carburant et la pollution par les gaz d'échappement, la solution passe donc par l'allègement du véhicule.

| CONTRAINTES | AVANTAGES |
|---|--|
| <p>Caractéristiques mécaniques plus faibles.</p> <p>Tenue au feu et résistance en température (plus faible que les métaux).</p> <p>Peinture type automobile plus difficile.</p> <p>Coût plus élevé :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluctuation des prix des matières premières, - nécessité de nouveaux investissements en production. <p>Complexité et difficulté du recyclage des thermosoudables.</p> | <p>Résistant à la corrosion.</p> <p>Gain de poids.</p> <p>Bilan énergétique, réduction des émissions.</p> <p>Réduction des émissions sonores.</p> <p>Optimisation des coûts de production.</p> <p>Complexité et diversité des formes possibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - souplesse d'utilisation, - meilleur rendu esthétique, - facilité de mise en forme favorisant l'amélioration de l'aérodynamisme. <p>Nombreuses techniques de fabrication possible.</p> <p>Confort accru (insonorisation et anti-vibration).</p> <p>Isolation électrique.</p> <p>Faible coefficient de friction.</p> <p>Meilleure indentation aux petits chocs.</p> <p>Antigravillonnage.</p> <p>Absorption progressive d'énergie lors de gros chocs.</p> |

Tableau 4 - Les critères de choix des composites par rapport aux métaux

Les caractéristiques mécaniques des composites sont plus faibles que celles des métaux notamment en matière de flexion, de résistance à la rupture, ou encore de températures limites d'utilisation. Mais cette faiblesse va participer à l'amélioration de la sécurité des véhicules grâce à leur destruction progressive (absorption progressive d'énergie) en cas de choc.

Les composites présentent aussi une meilleure indentation, c'est-à-dire que suite à des petits chocs urbains, il n'y a pas de marque ou d'empreinte sur leur surface contrairement aux métaux.

Il est nécessaire pour les constructeurs de réduire la cylindrée des moteurs mais la performance en pâtit et les clients sont déçus. La solution est donc d'alléger les véhicules pour conserver les mêmes performances.

L'absence de corrosion et le gain de poids grâce à une densité faible (acier : 7,8 ; aluminium : 2,7 ; composites : entre 1 et 2) font souvent pencher la balance dans le choix de ces matériaux.

Pour le bruit, le pouvoir amortissant des composites contribuent à la diminution des nuisances sonores soit en remplacement d'organes métalliques, soit en tant qu'écran acoustique.

2 [LES COMPOSITES DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE]

Les procédés de mise en oeuvre des pièces finies sont souvent plus lents, mais permettent d'obtenir des formes complexes, des intégrations de fonctions et des surmoulages d'éléments métalliques, entraînent souvent des investissements faibles et suppriment des usinages de finition tels que découpes ou ébavurages. Les économies se font ainsi sur les autres étapes.

Le prix au kilo des matériaux composites est souvent plus élevé (surtout par rapport à l'acier), mais la diversité des technologies de mise en oeuvre par moulage (injection, compression...) limite la quantité de matière engagée au juste nécessaire (pour compenser ainsi le coût au kilo).

En revanche, en ce qui concerne le recyclage, les composites sont lésés par rapport aux métaux, surtout ceux à base de résines thermodurcissables : en effet, une fois agglomérées, les fibres et la matrice en polymère sont effectivement difficiles à séparer, surtout à cause de leur grande variété chimiquement incompatible et de la présence d'additifs.

Mais ce problème ne constitue pas un frein pour les constructeurs qui intègrent dès le départ ces contraintes dans leur cahier des charges.

L'Union européenne leur impose de réduire la masse des déchets à la source lors de la production, de réutiliser des produits, de recycler tout ou partie des matériaux et d'incinérer des déchets avec ou sans valorisation des matières et des énergies. La mise en décharge en CET (centre d'enfouissement technique) n'est possible que si les conditions précédentes ne sont pas possibles.

| RÉSINES THERMODURCISSABLES | |
|----------------------------|---|
| Avantages | Coût Durabilité |
| Inconvénients | Emission de COV au cours de la mise en oeuvre Assemblages par collage délicats Faibles cadences Difficultés de recyclage des déchets industriels Difficultés de recyclage des produits en fin de vie Saturation des CET (Centre d'enfouissement technique) |
| RÉSINES THERMOPLASTIQUES | |
| Avantages | Absence d'émission de COV au cours de la mise en oeuvre Facilité d'assemblage Temps de cycle court (en fonction des procédés) Potentialités de recyclage Possibilité de formage à chaud |
| Inconvénients | Choix limité de résines disponibles à l'échelle industrielle Vigilance sur la qualité de l'interface fibre-matrice |

Tableau 5 - Les critères de choix des types de résine

→ C. L'ÉVOLUTION HISTORIQUE DES COMPOSITES DANS L'AUTOMOBILE

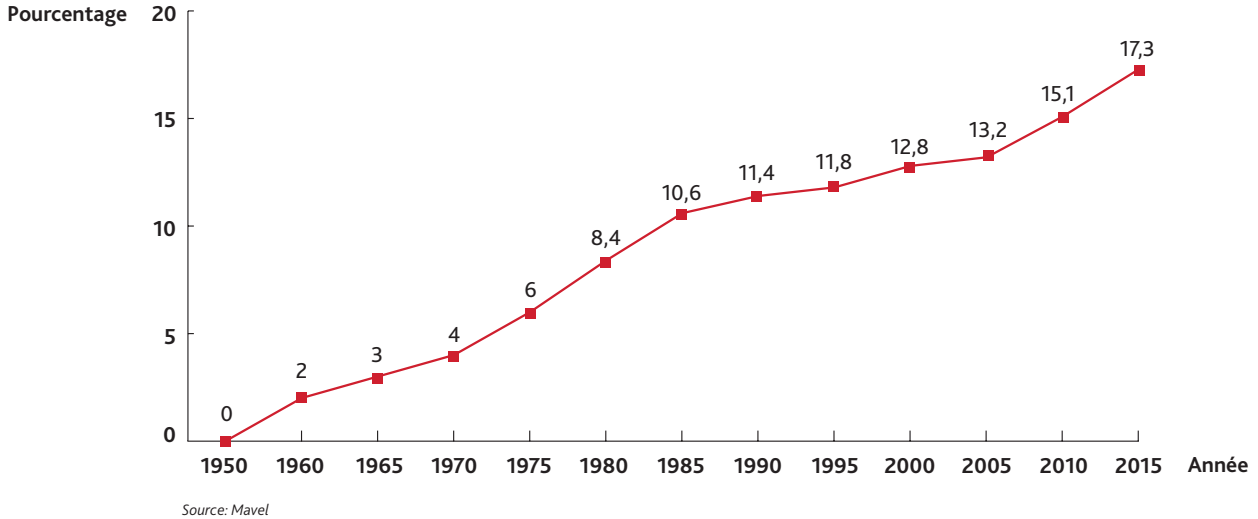


Figure 3 - L'évolution moyenne de la part pondérale des plastiques présents dans les véhicules au fil des ans

On s'aperçoit qu'au fil des décennies, la matière plastique est de plus en plus présente dans nos voitures. Par exemple, la quantité de plastiques sur une automobile mise en service après 2005 est supérieure à 13 % en masse (soit environ 200kg pour un véhicule moyen de 1 500 kg). Cela peut sembler peu par rapport au poids du véhicule mais si on relativise en termes de volume, les données sont complètement inversées. En effet : 13 % en masse de plastique conduisent à un volume supérieur à celui de l'acier (la densité est presque 8 fois supérieure).

La figure 4 nous montre à quel point l'allègement des véhicules est prépondérant pour réduire les émissions de CO₂.

CONTEXTE MONDIAL : RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂

- Règlement CO₂ avec pénalités financières pour le constructeur
- Fiscalité CO₂ avec bonus/malus pour le client

En 2014, la moyenne est de 136 g/km et l'objectif pour 2015 est de 130 g/km

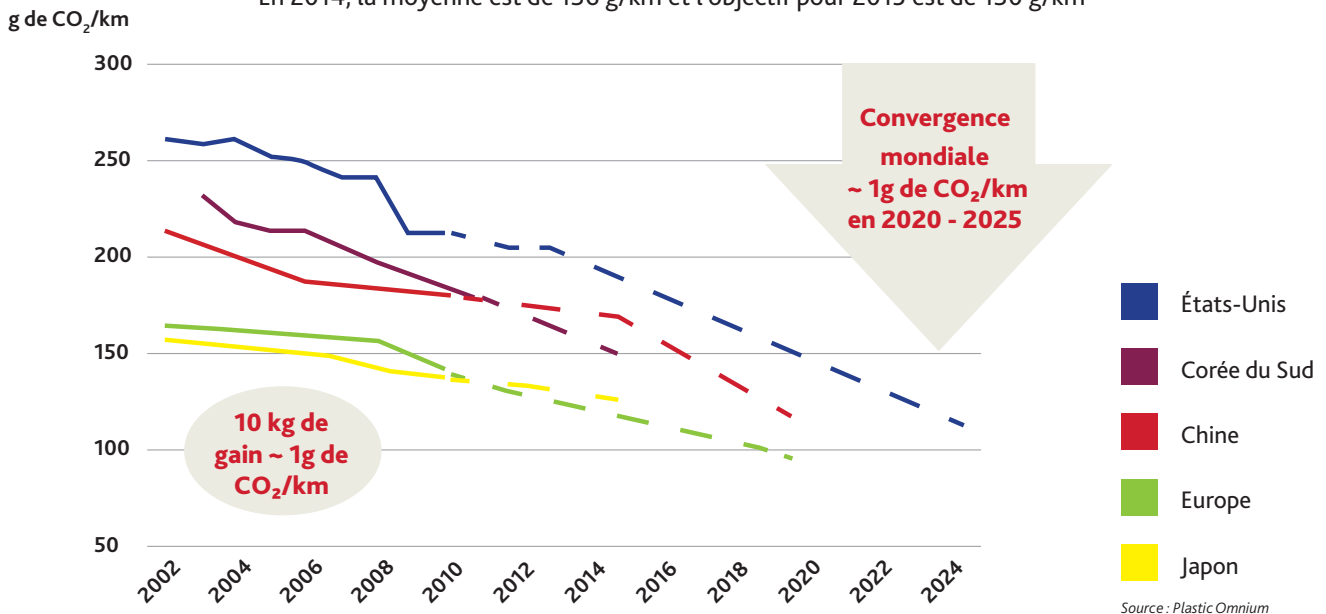


Figure 4 - Normes mondiales des émissions de CO₂ maximales des voitures grand public

2 [LES COMPOSITES DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE]

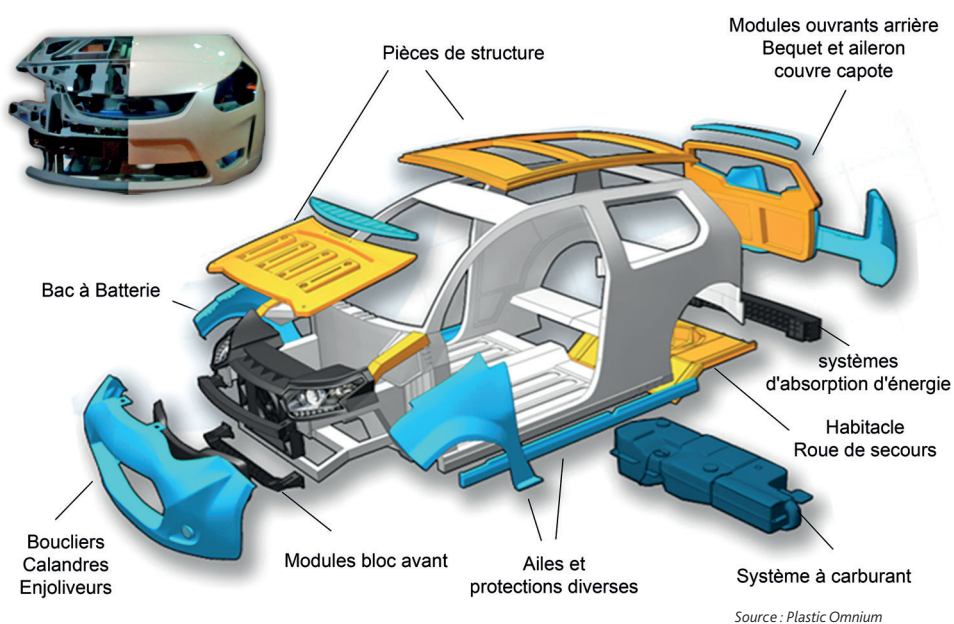


Photo 5 – Carrosserie carbone de la Tesla Roadster BRABUS ©

Applications et domaines d'utilisation des composites dans l'automobile :

Les matières plastiques font partie intégrante de :

- l'habillage intérieur des véhicules,
- l'habillage extérieur des véhicules,
- la carrosserie entière éventuellement,
- l'équipement électronique,
- certaines pièces mécaniques.



Suivant les domaines d'utilisation, les pièces seront fabriquées soit en matières thermoplastiques (garnitures d'habitacle, planche de bord, boucliers, ailes, baguettes de protection...), soit en matières thermodurcissables (ailes, capot, portes, hayon, ressort à lame, arbres de transmission...)

Figure 5 - Les matières plastiques dans l'automobile

3 [LES GRANDES FAMILLES DE COMPOSITES]

Comme nous l'avons vu précédemment, un matériau composite résulte de l'association d'une matrice, d'un élément renforçant et de différents additifs et adjuvants.

On désigne généralement sous le nom de matrice, un liant polymérique qui, associé à un renfort, permet de le maintenir dans ses formes en assurant la cohésion de l'ensemble et le transfert des efforts. C'est elle qui apporte les propriétés physico-chimiques du produit final. Les matrices peuvent être de différentes sortes permettant ainsi de différencier plusieurs types de composites et notamment :

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

→ A. LES COMPOSITES À MATRICE ORGANIQUE

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

→ Les composites à matrice thermoplastique

Les matrices polymères thermoplastiques peuvent se présenter sous différentes formes :

- Granulés,
- Poudre,
- Filament,
- Plaque.

De densité relativement faible, elles se ramollissent sous l'effet de la chaleur et deviennent malléables à chaud. Lors du refroidissement, le polymère durcit et se fige permettant ainsi au renfort de conserver sa forme. Cette transformation est totalement réversible et ne génère aucune chaleur intrinsèque.

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

Les principaux composites thermoplastiques utilisés dans le secteur automobile sont :

- Les TRE (Thermoplastique Renforcé Estampable à base de polypropylène et de fibre de verre – Photo 6) pour la fabrication de pare-chocs ou de bouclier (photo 7). Ils se présentent sous forme de plaque semi-rigide qui une fois ramollie sous infrarouge à 195 °C, se met en forme par estampage sous une presse réglée à 60°C. Les temps de cycle très courts permettent une production à grand volume de l'ordre de 60 pièces à l'heure.

Sous l'effet de la chaleur, le TRE devient pâteux et malléable



Source : Médiplast

Photo 6 – TRE



Source : Médiplast

Photo 7 – Mise en oeuvre du TRE

- Le TWINTEX® est un produit « co-mêlé » à base de filaments de verre de renforcement et de filaments thermoplastiques (polypropylène (PP), co-polyesters à base de polyéthylène téréphtalate (PET) ou polybutylène téréphtalate (PBT)) (figure 6).

Les polymères thermoplastiques utilisés pour le co-mélange avec les filaments de verre sont des polymères de haut poids moléculaire présents en proportion de 15 à 50 % en poids. Comme la plupart des polymères, ils ne figurent pas sur les listes de produits dangereux. (Définition OCV Réinforcements).

Il se présente sous la forme de préimprégné sec en plaque ou tissu, transformable à basse pression sous-vide, par compression à chaud, pultrusion, ou enroulement filamentaire (voir photo 8).

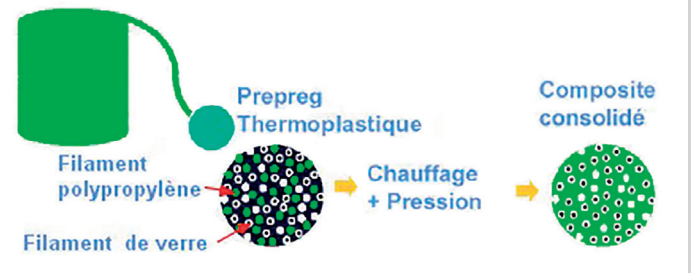
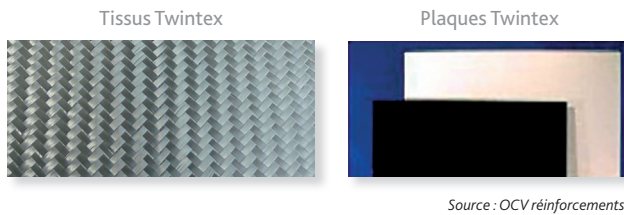


Photo 8 – Les différentes présentations du Twintex®

Figure 6 – Principe du comélage

- Les GFL (granulés fibre longues) sont des granulés constitués de fibres de verre disposées longitudinalement et enrobés d'une matrice thermoplastique (PP, PET, ou PBT...) comme le montre la figure 7.

Leur transformation se fait par injection HP et permet la réalisation en grandes séries. Les pièces obtenues possèdent de bonnes propriétés mécaniques et un très bel aspect de surface.



Figure 7 – Stratifils et GFL thermoplastiques

Source : OCV réinforcements



Photo 9 - Exemples de pièces pour l'automobile en matériaux composites thermoplastiques.

Source : HK-PRT

→ Les composites à matrices thermodurcissables

Les matrices thermodurcissables peuvent se présenter sous deux formes :

- Liquide visqueux appelé résine,
- Poudre.

Elles ont la particularité de durcir par apport de chaleur lors d'une réaction chimique appelée polymérisation. Cette réaction est irréversible et dégage une grande quantité de chaleur. On dit qu'elle est exothermique. Les thermodurcissables ne se ramollissent pas sous l'effet de la chaleur et forment après polymérisation une structure chimique tridimensionnelle qui confère au produit final des propriétés physico-chimiques et mécaniques intéressantes.

Les composites réalisés à partir de ces matrices peuvent être renforcés avec toutes sortes de fibres mais les plus communes restent la fibre de verre, la fibre de carbone ou la fibre d'aramide. Vous trouverez au chapitre 4 des explications détaillées sur ces matrices et renforts.

Les techniques de transformation des matériaux composites thermodurcissables sont nombreuses et font appel à un savoir-faire souvent artisanal. Néanmoins, les avancées technologiques dans les matériaux et les équipements ont permis de développer des procédés innovants permettant de répondre aux besoins des industriels pour des applications spécifiques. Le tableau ci-dessous indique la répartition des différents procédés de transformation en fonction des besoins dans le secteur de l'automobile.

| APPLICATIONS | PROCÉDÉS |
|--|--|
| Prototypage | Contact, moulage sous-vide. |
| Réparation | Contact, moulage sous-vide. |
| Tuning | Contact, moulage sous-vide, infusion, projection simultanée. |
| Fabrication moyenne série | Contact, projection simultanée, RTM, RTM light, infusion, moulage au sac. |
| Fabrication (très) grande série | Compression des SMC/BMC, enroulement filamentaire, pultrusion, RTM HP. |
| Fabrication à série limitée (véhicule haut de gamme) | Drapage de prépregs en autoclave, infusion, RTM light, compression BP de prépregs. |
| Fabrication spéciale (ex : disque de frein) | Compression HP. |

Tableau 6 - La répartition des différents procédés de transformation en fonction des besoins dans le secteur de l'automobile

3 — [LES GRANDES FAMILLES DE COMPOSITES]

Une présentation détaillée de ces procédés vous est proposée au chapitre 6 « La mise en oeuvre des matériaux composites ». Mais voyons quelques exemples de pièces en composites thermodurcissables (photo 10).

Capot Carbone (Source : Florian Madec composite)



Élément de carrosserie en infusion (Source : Applications Composites)

Console Lamborghini Aventador (Source : <http://voituredufutur.blogspot.fr>)



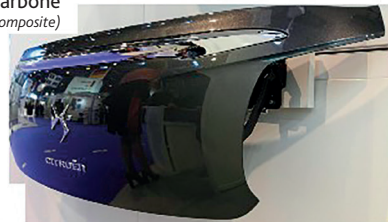
Toît de camion en SMC (Source : MCR)



Jante en prepreg carbone (Source : Florian Madec Composite)



Pare-buflle camaieu Renault 4x4 (Source : Renault)



Volet de coffre de la Citroën DS3 cabrio en SMC (Source : <http://voituredufutur.blogspot.fr>)



Élément de carrosserie au contact (Source : Application composites)



Face avant Peugeot 207 en SMC (Source : MCR)



Cadre de toit Citroën C4 en BCM (Source : MCR)

Photo 10 – Pièces automobiles réalisées en matériaux composites thermodurcissables

→ Les matériaux composites thermodurcissables carbonés-carbonés

Le carbone-carbone est un matériau composite composé d'une matrice en carbone et d'un renfort en fibres de carbone. Il appartient à la famille des composites à hautes performances thermiques ou composites thermostructuraux. Il est composé d'une matrice en carbone renforcée de fibres de carbone. Cette composition lui confère des qualités de résistance mécanique exceptionnelles même lorsqu'il est soumis à de très hautes températures.

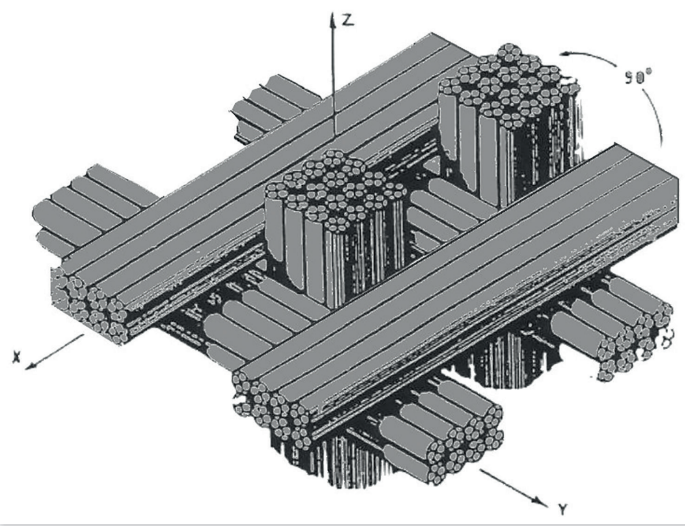


Figure 8 - Disposition des fils dans un composite 3D orthogonal à structure carbone-carbone

Sur les voitures de Formule 1, ces disques carbonés sont capables d'absorber et de dissiper une quantité de chaleur de plus de 1,5 million de joules pour stopper un véhicule à plus de 250 km/h. Cette quantité passe à plus d'1 milliard de joules pour un Airbus A340 lors de l'atterrissage.

(1 joule = 1 Newton par mètre)



Source : Suchier SA

Photo 11 - Disque de frein carbone pour formule 1



© JF Galeron (Messier-Bugatti)

Photo 12 - Les disques de frein carbone permettent aux Ferrari de faire face à des décélérations pouvant atteindre 5G depuis des vitesses de l'ordre de 340 km/h

Les carbonés-carbonés conservent leurs propriétés mécaniques quelle que soit la température. Lors de la mise à feu puis de la combustion d'un moteur fusée, ou lors du freinage d'urgence d'un avion de plusieurs tonnes, ils chauffent mais gardent presque toutes leurs propriétés.

Utilisables jusqu'à 3 500°C, ils présentent un intérêt majeur pour toutes les applications à haute température et notamment les pièces moteur.

→ B. LES COMPOSITES À MATRICE ET RENFORT MÉTALLIQUES

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

Développé à partir des années 1960-1965, ce type de composite était destiné à des applications exclusivement orientées vers l'aéronautique et l'espace car le coût des fibres était très élevé.

Dans les années 80, l'apparition des fibres céramiques a permis d'élargir leur champ d'application à l'automobile. Ces matériaux restent encore en pleine évolution et de nombreuses recherches restent à faire pour déterminer l'ensemble de leurs propriétés.

La matrice métallique peut être :

- monophasée (métal pur ou solution solide : magnésium, titane...)
- multiphasée (alliage durci par précipitation : aluminium et ses alliages, acier ...).

Les renforts utilisés peuvent être de deux types :

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

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

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

Mais les techniques de transformation restent complexes et doivent se réaliser à la température de fusion du matériau.



Source : MIT

Photo 13 - Exemples d'applications des composites à matrice métallique.

| | Propriétés recherchées | Applications | Technologies |
|---------------------------|-----------------------------------|--|------------------|
| SECTEUR AUTOMOBILE | Résistance à l'usure | Chemises et pistons Éléments de freinage Insert de culasse | Moulage-forgeage |
| | PM à faible densité Allègement | Bielles Axes de piston | Moulage-forgeage |

Tableau 7 – tableau de synthèse « composites à matrice métallique »

→ C. LES COMPOSITES À BASE D'ÉLASTOMÈRE

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

Les élastomères constituent une grande famille sous laquelle se regroupent les caoutchoucs naturels, les néoprènes, les nitriles, les EPDM, etc. mais aussi et plus particulièrement les matériaux composites, les polyuréthanes et les silicones.

Tous ces élastomères peuvent être renforcés par des fibres de toutes natures sans exception particulière.

Notre étude portera principalement sur deux catégories d'élastomères :

- Les polyuréthanes,
- Les silicones.

→ Les polyuréthanes (PU)

Les polyuréthanes sont des plastiques thermodurcissables (PU) ou thermoplastiques (TPU) constituant la famille des polycondensats destinés, à l'origine, à se substituer aux fibres synthétiques et aux caoutchoucs naturels.

Ils se déclinent en différentes densités qui les classent en deux catégories :

- Les polyuréthanes expansés (mousses souples et rigides),
- Les polyuréthanes compacts (élastomères, peintures, vernis adhésifs, , etc.).

Depuis de nombreuses années, l'industrie automobile utilise des mousses de polyuréthane structurales pour les pièces externes comme les pare-chocs ou les éléments de carrosserie, et des mousses souples pour les habillages intérieurs comme les tableaux de bord, les fauteuils ou encore les parements de portières.

Les polyuréthanes résultent d'une réaction qui met en oeuvre un polyol (principal ingrédient de la résine) et un isocyanate (durcisseur), le tout accompagné de quelques substances supplémentaires (catalyseur, agent de régulation de la taille des cellules, et éventuellement, agent gonflant, agent plastifiant, colorants, produits anti-feu, etc.)

Cette réaction est exothermique et peut s'accompagner ou non de dégagement gazeux, permettant une expansion plus ou moins marquée.

Les différents composants entrent donc dans l'élaboration d'un polyuréthane. Parmi eux :

- Polyols,
- Catalyseurs,
- Agents gonflant,
- Charges minérales.
- Isocyanates,
- Surfactants (tensioactifs),
- Colorants,

La structure moléculaire des polyuréthanes est généralement tridimensionnelle comme pour les thermodurcissables. Selon la nature des polyols et isocyanates et les rapports de mélange des différents composants, le produit final sera plus ou moins rigide. D'autre part, la nature des catalyseurs influe sur la vitesse de réticulation et sur la qualité du produit final. Il est donc possible d'obtenir une infinité de formulations. Ces choix seront en fonction des caractéristiques finales souhaitées.

La gamme des produits PU est donc relativement large et couvre plusieurs domaines.

On distingue :

• *Les mousses PU souples*

Elles sont issues de formulations dont le coefficient d'expansion est très important.

| TYPE DE MOUSSE | DENSITÉ | APPLICATIONS |
|-----------------------------|---------|---|
| Mousse classique ou à chaud | | Sièges et dossiers automobiles. |
| Mousse haute résilience | | Sièges et dossiers automobiles. |
| Mousse à peau ou antichoc | 0.9 à 1 | Volant, appui-tête, selle de moto. |
| Mousse semi-rigide | | Panneaux de portes, tableaux de bord, ciel de toit, isolation phonique... |

Tableau 8 – Mousses utilisées dans l'automobile

Appui-tête (Source : TechniSit)



Panneau de porte Peugeot 308 (Source : L'automobile Magazine)



Coiffe de siège (Source : TechniSit)



Photo 14 – Pièces automobiles en mousse de PU souple et à peau

3 [LES GRANDES FAMILLES DE COMPOSITES]

• Les mousses PU structurales compactes

Elles sont issues de formulations dont le coefficient d'expansion est très faible, aux caractéristiques mécaniques intéressantes.

| CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES | VALEURS |
|---|----------------------------------|
| Masse volumique | De 600 à 1 050 kg/m ₃ |
| Résistance aux chocs | De 18 à 45 kJ/m ² |
| Module d'élasticité en flexion | De 950 à 2 000 MPa |
| Dureté | De 70 à 76 Shore D |
| Élongation à la rupture | De 7 à 14 % |
| Résistance à la traction | De 18 à 50 MPa |
| Fléchissement à la chaleur après 1 h à 120 °C | De 1 à 10 mm |

Tableau 9 - Mousses PU structurales compactes



Ceinture de caisse Saxo Citroën (Protecteur ailes AV/AR, protecteur de caisse, protecteur de porte)



Calandre Masscott Renault IV



Poutre Opel Astra



Pare-chocs Zeta Lancia

Source : Technique de l'ingénieur

Photo 15 – Pièces en mousse de polyuréthane structurale

• Les élastomères PU

Un élastomère est un PU exempt d'agents gonflants, contenant un allongeur de chaîne.

On distingue deux types d'élastomère PU :

- Les élastomères PU thermodurcissables de coulée,
- Les élastomères thermoplastiques.

- Les élastomères PU thermodurcissables

Les élastomères PU thermodurcissables de coulée sont caractérisés par une dureté Shore A de 30 à 85 et une bonne élasticité. À cela s'ajoute une bonne résistance à l'abrasion et une inertie chimique vis-à-vis des solvants. Ces produits sont largement employés dans le secteur de l'automobile pour de nombreuses applications comme par exemple :

- la bande de roulement,
- les pièces de rotation,
- les courroies de transmission et bandages,
- les joints de scellement pour gainage électrique,
- les chaînes pour pneu (neige).



Source : www.grossiste-chinois-import.com

Photo 16 - Chaîne à neige en PU

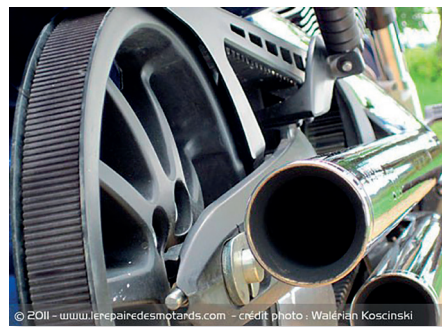


Photo 17 - Courroie de transmission

- Les élastomères PU thermoplastiques (TPU)

Les PU thermoplastiques (TPU) sont obtenus en chaînes linéaires par réaction d'un diisocyanate avec un polyester ou un polyol bifonctionnel. L'allongement de la chaîne polyol ou polyester apporte de la flexibilité et permet de faire des élastomères thermoplastiques.

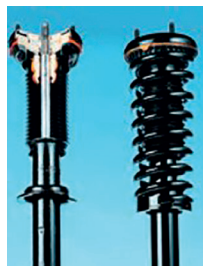
La mise en oeuvre se fait comme pour les thermoplastiques par injection, extrusion, calandrage ou par coulée de liquides réactifs.

Applications : fabrication d'engrenages, de courroies de transmission, d'éléments d'habillage intérieur, de soufflet d'amortisseurs...



Source : www.cmbmodelisme.fr

Photo 18 – Courroie de transmission



Source : BASF

Photo 19 – Soufflet d'amortisseur



Source : BASF

Photo 20 – Tableau de bord et poignet intérieure de portière

→ Les silicones

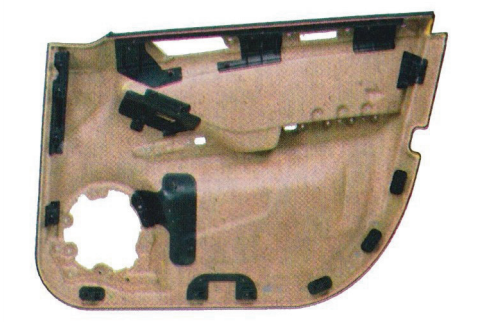
Utilisées de manière très spécifique dans le secteur automobile, les matrices silicones présentent des propriétés intéressantes et seront traitées dans la partie matériaux du chapitre 4.

→ D. LES BIOCOMPOSITES

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



Source : www.caradisiac.com



Source : Flexform Technologies

Photos 21 - Panneau de port Mercedes Class-M et Class-R en fibres naturelles



Source : Daimler Chrysler

Photo 22 - Capot roue de secours Mercedes Class A en fibre naturelle

Les fibres principalement utilisées dans les biocomposites sont le lin, le sisal et le kénaf.

Toutes trois présentent des propriétés mécaniques intéressantes malgré une reprise d'humidité rapide et conséquente qui doit être maîtrisée lors de la mise en œuvre.

D'autres fibres sont en voie de développement et l'avenir de ces fibres reste très prometteur. Transformées sous-vide, par injection ou par compression, ces fibres sont, pour l'instant, associées à des matrices polyester, époxy voire phénolique. Mais des développements sur l'utilisation de matrices thermoplastiques et de matrices végétales comme les matrices PLA à base de cellulose sont en cours.

Notons que la principale contrainte au développement massif des biocomposites reste la difficulté de produire de gros volumes de fibre (limitation des cultures) et la constance de la qualité des fibres.

→ A. LES MATRICES

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

- elles maintiennent la disposition géométrique des fibres,
- elles apportent au composite ses caractéristiques chimiques et thermiques,
- elles transfèrent les sollicitations mécaniques.

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

- les matrices thermodurcissables,
- les matrices thermoplastiques,
- les matrices métalliques,
- les matrices biodégradables.

→ Les matrices thermodurcissables

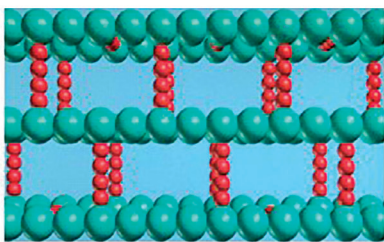
Les matrices thermodurcissables sont les plus couramment utilisées pour la fabrication de pièces en matériaux composites.

LES THERMODURCISSABLES



Liquide visqueux
Poudre

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



Structure moléculaire tridimensionnelle

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

Parmi ces matrices, on distingue principalement :

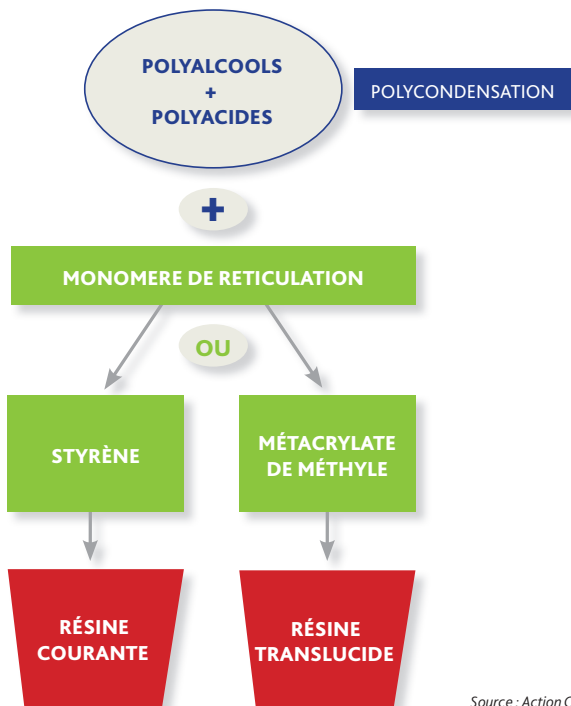
- les matrices polyester (usage courant),
- les matrices époxydes (tenue mécanique et chimique),
- les matrices vinylesters (tenue chimique),
- les matrices phénoliques (résistance au feu),
- les matrices polyuréthanes (densité et dureté variables),
- les matrices polyimides (tenue température > 260°C),
- les matrices silicones.

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ Les matrices polyesters

Les matrices polyesters sont largement utilisées dans les applications composites. Ce sont des polycondensats de diacides saturés et insaturés avec des polyalcools de type glycol, dissous dans un monomère de réticulation (styrène ou méthacrylate de méthyle) (figure 9).

Les propriétés des résines polyesters sont résumées dans le tableau 10 ci-dessous.



Source : Action Composite

| AVANTAGES | INCONVENIENTS |
|--|--|
| - Bon accrochage sur la fibre de verre | - Retrait important (6 à 7% en volume) |
| - Facilité de mise en œuvre | - Inflammable |
| - Assez bonne tenue chimique | - Durée de conservation limitée |
| - Prix faible | - Temps de travail limité |

Tableau 10 – Propriétés des résines polyester

Figure 9 – Composition d'une résine polyester

On distingue de nombreuses variétés de résines polyesters mais les plus utilisées sont les orthophtaliques et isophtaliques.

| | RÉSINE POLYESTER ORTHOPHTALIQUE | RÉSINE POLYESTER ISOPHTALIQUE |
|--------------------------|---|---|
| Tenue en température | 80 – 90°C | 110 – 120°C |
| Propriétés mécaniques | Moyennes | Elevées |
| Résistance à l'hydrolyse | Faible | Elevée |
| Coût | Modéré | Plus chère |
| Applications | Pièces de qualité standard, grande diffusion. | Moule, pièces techniques, bateaux, carrosserie. |

Tableau 11 – Différences entre résine polyester orthophtalique et résine polyester isophtalique

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le durcissement d'une résine polyester est appelé polymérisation ou réticulation. La polymérisation est une réaction chimique nécessitant l'utilisation d'un accélérateur et d'un catalyseur dans la résine.

L'accélérateur est généralement un sel de cobalt (Octoate ou naphtéate) et le catalyseur un peroxyde organique (ex : peroxyde méthyl éthyl cétone (PMEC)).

Cette réaction exothermique, (qui dégage de la chaleur) peut se caractériser par la courbe ci-dessous (figure 10).

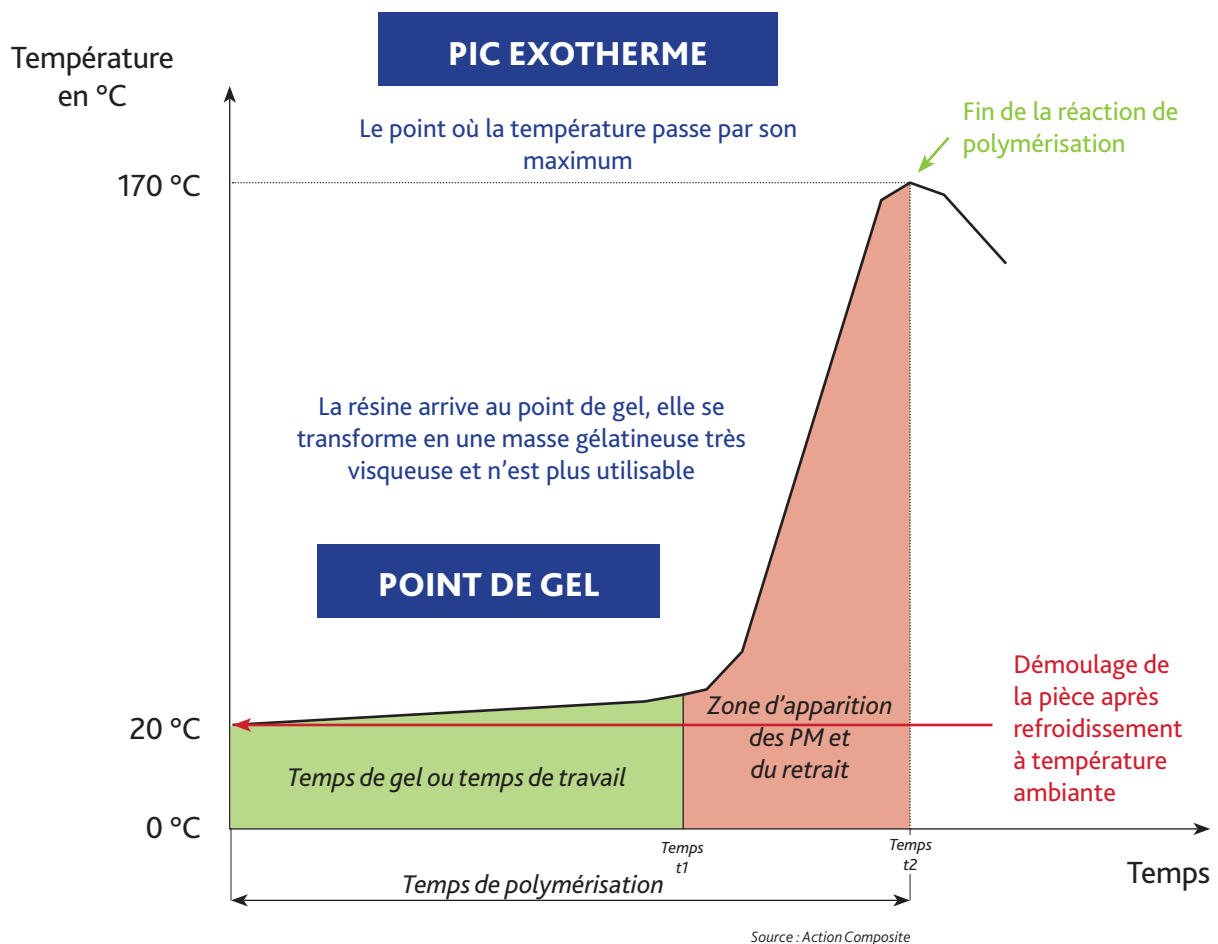


Figure 10 – Courbe de polymérisation d'une résine polyester

En fin de polymérisation lorsque la température est redevenue normale (20°C), on constate un phénomène de retrait. Celui-ci peut être plus ou moins important en fonction de la violence de la réaction et génère des déformations voire dans certains cas des fissurations en surface.

Lié à la température, il apparaît chaque fois que l'on a un effet de masse. Ce phénomène commun à toutes les résines reste difficile à maîtriser et suit le processus expliqué figure 10.

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

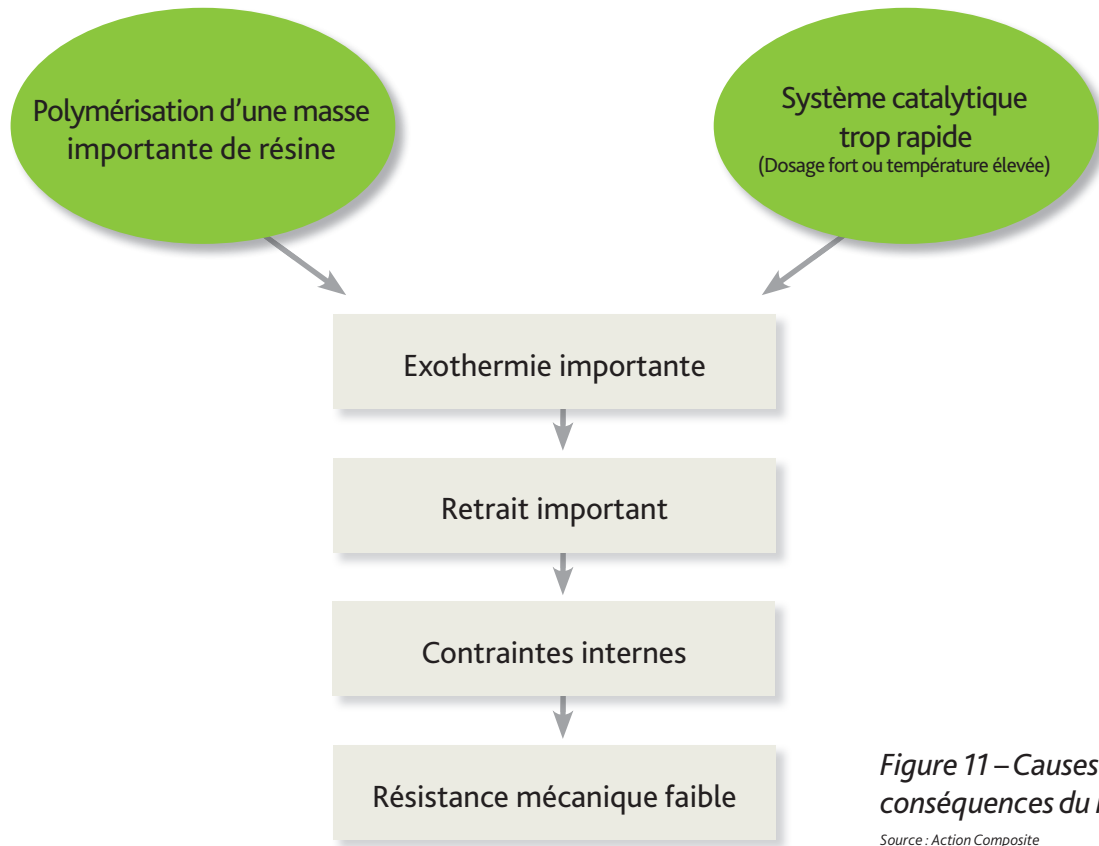


Figure 11 – Causes et conséquences du retrait

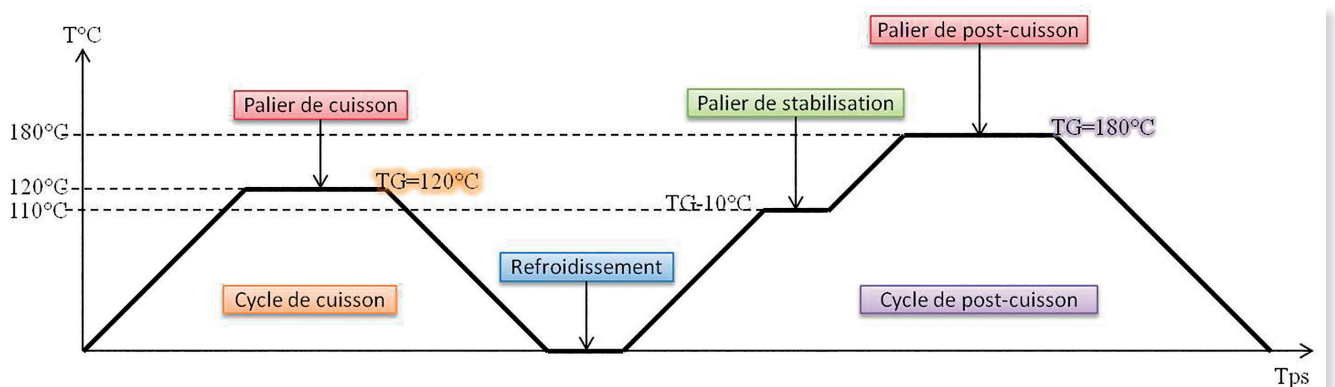
Source : Action Composite

→ Les matrices époxydes

Les matrices époxydes sont utilisées dans la fabrication de composites hautes performances. Elles sont obtenues par condensation de bisphénol A avec l'épichlorhydrine du glycérol en milieu basique.

Le polymère présente des groupements fonctionnels époxydes qui génèrent la réticulation par le biais d'une réaction chimique de polyaddition et l'utilisation d'un durcisseur de type amine.

Cette réaction plutôt lente, est souvent complétée d'une post-cuisson (figure 12) afin d'obtenir des propriétés mécaniques optimales.



TG = Température de transition vitreuse correspondant au passage d'un état solide à un état viscoélastique. C'est un changement de phase réversible sous l'effet de la température présentant un point de ramollissement de la résine polymérisée.

Figure 12 – Cycle de post-cuisson d'une résine époxyde

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Les résines époxydes présentent de nombreux avantages.

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|---|--|
| Densité 1.2 à 1.4 | Cycle de moulage long |
| Retrait < 1 % | Nécessite des démoulants appropriés |
| Excellente propriété mécanique | Tenue thermique en continue limitée à 180 °C |
| Bonne résistance chimique aux bases et solvants | |
| Propriétés thermique élevées | |
| Bonne stabilité dimensionnelle | |
| Pouvoir adhésif important | |
| Bonne résistance à la fatigue | |

Tableau 12 – propriétés des résines époxydes

Malgré leurs excellentes propriétés, les résines époxydes sont peu utilisées dans le secteur de l'automobile pour les pièces de grandes séries, du fait de leur coût élevé. Elles restent le privilège des élites et rentrent dans la fabrication des voitures de prestige et des voitures de course comme la Formule 1.

Principalement associées aux renforts de carbone ou d'aramide, elles présentent malgré tout des limites et notamment en milieu oxydant où elles se dégradent très vite ou en présence d'arcs électriques.

→ Les matrices vinylesters

Les matrices vinylesters résultent de l'association de résines époxydes et d'acide méthacrylique. (Voir figure 13). Essentiellement utilisées dans le domaine anticorrosion car elles sont particulièrement résistantes aux agressions chimiques de toutes sortes, elles offrent aussi des propriétés mécaniques supérieures aux résines polyester et sont de ce fait utilisées dans divers domaines tels que le sport, le nautisme, l'automobile, la protection balistique, etc.

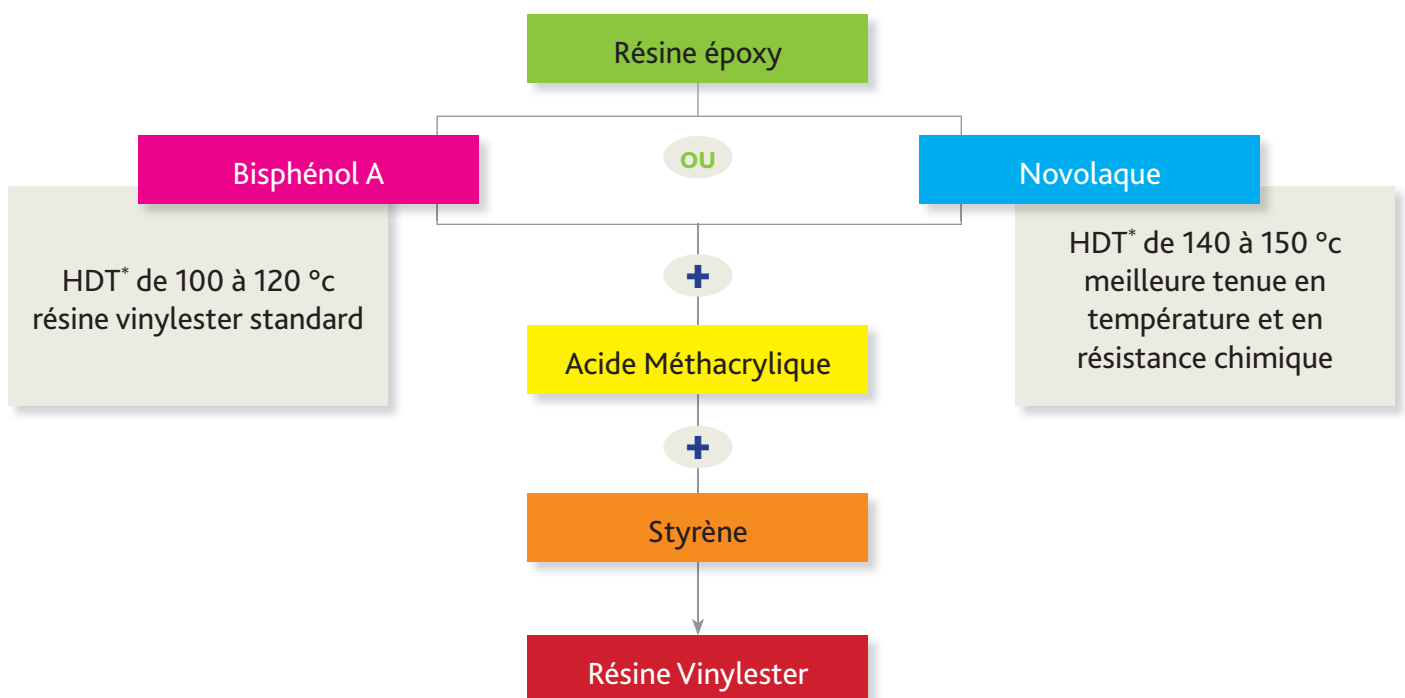


Figure 13 - Fabrication d'une résine vinylester

*Heat Distortion Temperature

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Ci-dessous, un résumé des avantages et inconvénients des résines vinylesters :

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|-----------------------------------|---|
| Densité 1.1 à 1.2 | Polymérisation plus lente qu'un polyester |
| Excellente tenue chimique | Nécessite des démoulants appropriés |
| Bonne propriété mécanique | Retrait volumique de 6 à 8 % |
| Bonne tenue thermique | |
| Résine souple | |
| Bonne résistance à la fissuration | |
| Qualité alimentaire possible | |

Tableau 13 – Avantages et inconvénients des résines vinylesters

→ Les matrices phénoliques

Les matrices phénoliques sont la résultante d'une réaction de polycondensation entre un phénol et un aldéhyde formol avec élimination d'eau. Les phénols (crésol et récorsicol) confèrent à la résine un classement au feu et fumée M1F1 sans ajout d'additifs spécifiques.

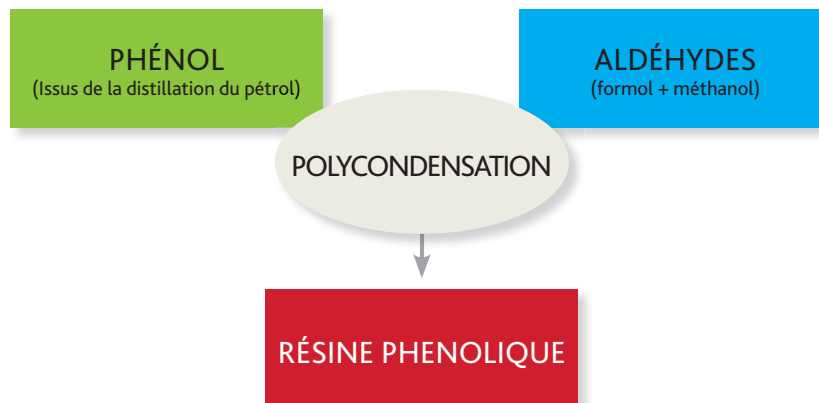


Figure 14 – Fabrication d'une résine phénolique

Utilisées principalement dans des applications nécessitant une résistance au feu importante, elles polymérisent à l'aide d'un catalyseur acide et ne présentent pas de propriétés mécaniques élevées.

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|---|---|
| Densité 1.25 à 1.3 | Faibles propriétés mécaniques |
| Excellente tenue au feu (M1F1) | Dégagement d'eau lors de la mise en œuvre |
| Autoextinguible par dégagement d'eau à 400 °C | Coloration difficile (brun foncé) |
| Bonne tenue thermique | |
| Propriétés ablatives | |
| Prix modéré | |

Tableau 14 – Avantages et inconvénients des résines phénoliques

→ Les matrices polyuréthanes

Les polyuréthanes sont des polycondensats appartenant à la famille des plastiques alvéolaires thermodurcissables qui sont des matériaux à base de polymères constitués d'une phase gazeuse dispersée dans une phase solide plastique.

Les polyuréthanes peuvent se décliner en différents produits :

- polymères à chaînes linéaires longues ou courtes conduisant à des élastomères ou à des fibres textiles,
- résines réticulées,
- mousses thermodurcissables souples ou rigides,
- vernis, peintures, adhésifs.

Le tableau 15 ci-dessous résume l'ensemble des caractéristiques de ces différents produits.

| | Résine PU réactive | PU de coulée | Mousse souple | Mousse Rigide | Mousse expansive | Elastomère PU |
|---------------------------|--------------------|--------------|---------------|---------------|------------------|--------------------|
| Nombre de composants | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| Densité réticulée moyenne | 1,1 | 1,62 | 0,06 | 0,035 | 0,025 | 1,35 |
| Dureté Shore | 70 | 80 | Variable | Variable | | 65A |
| Apport de chaleur | Non | Non | Non | Non | Non | Non |
| Temps de travail | 3 min | 4 min | 30 sec | 30 sec | | 6 min |
| Exothermie | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Démoulage | 20 min | 30 min | 30 min | 20 min | 30 min | 3h |
| Retrait | > 0,4 % | > 0,25 % | | | | > 2 % |
| Tenue en température | 80°C | 80°C | 80°C | 80°C | 80°C | 80°C |
| Chargeable | Oui | Non | Non | Non | Non | Oui |
| Thixotropable | Non | Non | Non | Non | Non | Oui |
| Coloriable | Oui | Oui | Oui | Oui | Non | Oui |
| Nettoyage | Acétone | Acétone | Acétone | Acétone | Acétone | Acétone |
| Applications | Pare chocs | Prototypage | Garnissage | Âme sandwich | Remplissage | Bande de roulement |

Tableau 15 – Caractéristiques des résines et mousses polyuréthanes.

→ Les matrices polyimides

Les matrices polyimides sont des résines thermostables qui conservent leurs caractéristiques à des températures très élevées :

- à environ 250°C sur de longues périodes (1 000 heures),
- à 500 °C sur de courtes périodes (1 heure),
- à 1 000°C pendant quelques secondes.

Leur température d'utilisation peut varier de 300° à 320°C et leur structure moléculaire est infusible et insoluble. Le tableau 16 résume l'ensemble de leurs principales propriétés.

| | |
|--|----------------------------------|
| Densité | 1,85 avec 60 % de fibres |
| Reprise d'humidité | 0,3 % à 0,5 % à 23°C en 24 h |
| Température de transition vitreuse (TG) | 350°C |
| Température de déformation sous charge (HDT) | 300°C |
| Coefficient de dilation linéique | Faible et constant jusqu'à 300°C |
| Conductibilité thermique | 0,4 W/(m.k) |
| Fluage à 200°C | Néant |
| Module d'élasticité en traction à 23°C | 30 000 Mpa |
| Résistance à la rupture en traction à 23°C | 160 Mpa |
| Résistance à la rupture en traction à 250°C | 120 Mpa |
| Allongement à rupture en traction à 23°C | <1% |
| Module d'élasticité en flexion à 23°C | 30 000 Mpa |
| Module d'élasticité en flexion à 250°C | 24 000 Mpa |
| Résistance à la rupture en flexion à 23°C | 360 Mpa |
| Résistance à la rupture en flexion à 250°C | 250 Mpa |
| Résistance à la rupture en compression à 23°C | 230 Mpa |
| Résistance à la rupture en compression à 250°C | 170 Mpa |

Tableau 16 – Principales propriétés des résines polyimides

Notons que dans la gamme des résines thermostables, on trouve les résines cyanate-ester dont les propriétés mécaniques sont équivalentes mais à des températures légèrement plus élevées (entre 350 et 400°C).

Les résines thermostables sont utilisées pour la fabrication de pièces de structure dites chaudes (pièces moteur...).

→ Les matrices silicones

Les matrices silicones sont des élastomères contenant des charges et ayant la particularité de pouvoir vulcaniser à température ambiante. Elles appartiennent à la famille des polysiloxanes.

Lorsque l'on parle de silicones, il faut distinguer :

- les huiles de silicones dont l'utilisation est prohibée dans l'industrie des matériaux composites,
- les élastomères contenant de la silice broyée à très haute viscosité et vulcanisant à froid ou à chaud utilisés pour des applications spécifiques comme la reproduction ou l'encapsulage,
- les résines de silicone qui ont une configuration tridimensionnelle et qui sont utilisées sous forme de préimprégnés moulés à 170°C, réservés en général au domaine électrique.

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Les propriétés générales des silicones vulcanisées sont :


- anti-adhérence,
- finesse de reproduction,
- souplesse,
- résistance au déchirement (valeur > 10 N/mm = résistance à l'entaille),
- retrait faible à quasi nul,
- vulcanisation à température ambiante sans exothermie,
- facilité de mise en oeuvre,
- résistance thermique (de -80° à + 250°C),
- propriétés diélectriques (isolant),
- dureté à l'écrasement.

Dans le secteur automobile, ces matrices sont peu utilisées si ce n'est dans la fabrication de durites haute température.

→ Les matrices thermoplastiques

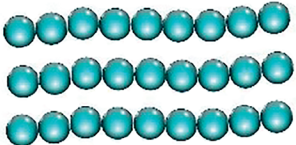
Les matrices thermoplastiques occupent une place de plus en plus importante dans la fabrication des matériaux composites.

LES THERMOPLASTIQUES



Granulés
Poudre
Plaque

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



Structure moléculaire linéaire

Économiques et moins polluantes lors de leur transformation, elles offrent une bonne résistance à l'impact et permettent des cadences de production élevées grâce à des cycles relativement courts. (Voir figure 15)

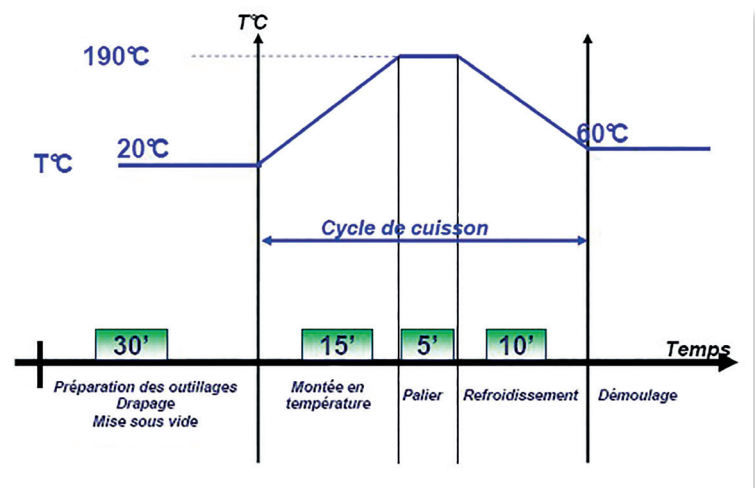


Figure 15 – Exemple de cycle de cuisson d'un composite thermoplastique

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

Les principales matrices utilisées pour la fabrication de pièces en composites thermoplastiques ainsi que leurs propriétés, sont résumées dans le tableau 17 figurant en page suivante.

| Polymères | Abréviations | Principaux intérêts | Limites d'utilisations | Applications |
|------------------------------|---|--|--|---|
| Les polyamides | PA6, PA6.6, PA11, PA12 | <ul style="list-style-type: none"> - Bonnes propriétés mécaniques en général - Bonne stabilité dimensionnelle - Bonne rigidité - Bonne tenue en température - Bonne tenue chimique - Bonne résistance aux chocs | <ul style="list-style-type: none"> - Retrait élevé - Reprise d'humidité lente et limitée | <ul style="list-style-type: none"> - Face avant technique - Capotage divers, support de bobinage |
| Les polyesters saturés | PBT (polybutylène téréphtalate) PETP (polyéthylène téréphtalate) | <ul style="list-style-type: none"> - Bonnes propriétés mécaniques en température - Rigidité élevée - Bonnes propriétés diélectriques - Dureté élevée - Faible reprise d'humidité | <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance aux acides et aux bases - Faible résistance aux solvants | <ul style="list-style-type: none"> - Engrenages, carter, pièces de carrosserie (grille) |
| Les polyoléfines | PP (polypropylène) PEHD (polyéthylène haute densité) | <ul style="list-style-type: none"> - Excellente tenue aux solvants - Grande résistance aux solvants - Bonne rigidité - Bonnes propriétés mécaniques - Excellente résistance mécanique | <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance aux chocs à des températures moyennes à basses - Stabilité thermique modérée. Risque de fissuration à basse température | <ul style="list-style-type: none"> - Face avant technique - Faux plancher, bandes de protection latérales, pare-chocs - Batteries - Isolants de câble |
| Les styréniques | ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène) | <ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance aux chocs - Bonne rigidité - Bonne stabilité thermique | <ul style="list-style-type: none"> - Résistance médiocre au vieillissement | <ul style="list-style-type: none"> - Pièces de carrosserie pouvant être chromées, coques de siège auto. |
| Les polyphénylène-oxydes | PPO | <ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance aux chocs - Bonne tenue au fluage - Bonne stabilité dimensionnelle - Bonnes propriétés électriques - Faible retrait | <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance aux hydrocarbures | |
| Les polycarbonates | PC (polycarbonates) | <ul style="list-style-type: none"> - Bonne transparence - Bonne résistance aux chocs - Bonne tenue thermique - Faible reprise d'humidité - Faible fluage | <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance aux bases. - Faible résistance à la fissuration - Tenue moyenne au vieillissement - Prix élevé | <ul style="list-style-type: none"> - Optique de phare |
| Les polyacétals | POM | <ul style="list-style-type: none"> - Bonne dureté - Bonne rigidité - Excellente résistance mécanique - Faible perméabilité - Bonnes propriétés électriques - Bonne résistance à l'hydrolyse | <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance aux bases et aux acides - Faible résistance aux UV | <ul style="list-style-type: none"> - Engrenages, biellettes, cames, organes de pompe, lave glace, flotteur de réservoir d'essence. |
| Les polyphénylène-sulfures | PPS | <ul style="list-style-type: none"> - Grande rigidité - Grande résistance en température - Bonnes propriétés mécaniques | <ul style="list-style-type: none"> - Faible résistance aux chocs - Prix élevé | <ul style="list-style-type: none"> - Pièces de carburateur |
| Les polysulfones aromatiques | PSU, PPSU | <ul style="list-style-type: none"> - Bonnes propriétés mécaniques - Bonne rigidité - Excellente tenue chimique - Faible retrait - Bonnes propriétés électriques | <ul style="list-style-type: none"> - Faible tenue aux UV et au vieillissement - Faible résistance aux hydrocarbures - Prix élevé | <ul style="list-style-type: none"> - Pièces sous capot |
| Les polythéréthérétones | PEEK | <ul style="list-style-type: none"> - Grande rigidité - Bonnes propriétés mécaniques - Grande résistance en température même élevée - Très bonne résistance chimique - Bonne stabilité dimensionnelle - Très haute résistance à l'hydrolyse | <ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux UV - Faible résistance au vieillissement - Prix élevé | <ul style="list-style-type: none"> - Paliers de frottement, cage de roulement, engrenage... |

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Pour clore ce chapitre sur les matrices vous trouverez dans le tableau 18 ci-dessous les propriétés comparées des différentes matrices thermoplastiques et thermodurcissables.

| Polymère | Densité | Résistance traction (MPa) | Module flexion (GPa) | Tenue chaleur en continue (°C) |
|--------------|---------|---------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Polyester | 1.2 | 50-60 | 3 | 120 |
| Vinylester | 1.15 | 70-80 | 3.5 | 140 |
| Phénolique | 1.2 | 40-50 | 3 | 120-150 |
| Epoxyde | 1.1-1.4 | 50-90 | 3 | 120-200 |
| Polyuréthane | 1.1-1.5 | 20-50 | 1 | 100-200 |
| Polyimide | 1.3-1.4 | 30-40 | 4 | 250-300 |
| PP | 0.9 | 20-30 | 1-1.6 | 58-115 |
| PC | 1.2 | 60-70 | 2.2-2.6 | 120 |
| PBT | 1.3 | 45-55 | 2.2-2.5 | 80-110 |
| PET | 1.3 | 55-75 | 2-2.2 | 105-120 |
| PPO-PPE | 1-1.1 | 55-65 | 2.4-2.6 | 80-105 |
| POM | 1.4 | 60-70 | 7-9 | 95-105 |
| PA | 1.1 | 60-90 | 6-9 | 80-120 |
| PSU | 1.5 | 55-90 | 2.3-2.6 | 150-200 |
| PPS | 1.6 | 75 | 3.4 | 220 |
| PAI | 1.3-1.4 | 195 | 4.9 | 275 |
| PEI | 1.5 | 105 | 3 | 170 |
| PES | 1.6 | 85 | 2.6 | 180 |
| PEEK | 1.5 | 100 | 3.7 | >240 |
| PCL | 1.3-1.4 | 140 | 10.5 | >200 |

PAI = Polyamide-imide

PEI = Polyéther-imide

PES = Polyéther-sulfone

PEEK = Polyéther-éther-cétone

Tableau 18 – Propriétés des différentes matrices thermoplastiques et thermodurcissables

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ B. LES CHARGES ET ADDITIFS

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

| Les charges influencent | Et améliorent |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - L'aspect du produit - La viscosité - La densité - L'opacité - La thixotropie - Le temps de gel - La conduction calorifique - Le prix de revient | <ul style="list-style-type: none"> - La résistance à l'humidité - La résistance aux agents chimiques - La résistance aux intempéries - La résistance à l'exothermie - Le retrait - La résistance au feu - La résistance à la chaleur - La résistance aux chocs |

Le tableau 19 présente les principales charges et additifs utilisées ainsi que les propriétés qu'elles apportent.

| Nature de la charge | Densité réelle | Utilisation |
|----------------------|----------------|---|
| Bisulfure molybdène | 10.2 | Lubrifiant interne |
| Carbonate calcium | 2.7 | Diminue du retrait - Augmente la viscosité - Réduit le coût |
| Carbone black | 3 | Pigment pouvant inhiber la polymérisation |
| Corindon | 4 | Augmente la dureté - Augmente la résistance à l'abrasion |
| Dolomie | 2.9 | Opacifie les Gelcoats |
| Hydrate d'alumine | 5.2 | Augmente la tenue au feu |
| Kaolin | 2.6 | Réduit le poissant |
| Mica | 2.8 | Confèrent des propriétés diélectriques et thermiques pour réaliser des pièces isolantes |
| Microbille de verre | 2.5 | Augmente la dureté - Augmente la résistance à l'abrasion Augmente la résistance à la rayure |
| Microsphère de verre | 0.9 | Diminue la densité des résines |
| Oxyde de titane | 2.5 | Coloration ultra-blanche |
| Poudre d'alu | 2.6 | Augmente la conduction thermique |
| Poudre d'ardoise | 2.6 | Rend diélectrique |
| Poudre de Quartz | 2.65 | Augmente la dureté - Augmente la résistance à l'abrasion Augmente la résistance à la rayure - Confère des propriétés diélectriques |
| Silice colloïdale | 2.2 | Agent thixotrope |
| Talc | 2.9 | Diminue le retrait - Augmente la viscosité - Augmente la ponçabilité - Réduit le coût - Confère des propriétés diélectriques |

Tableau 19 – Caractéristiques des principales charges et additifs utilisés

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ C. LES GELCOATS

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

- aspect de surface,
- brillance,
- coloration,
- protection des stratifiés,
- dureté,
- résistance à l'abrasion,
- résistance à la corrosion,
- résistance aux chocs,
- résistance aux UV,
- résistance à la rayure,
- résistance aux agressions chimiques,
- résistance au feu,
- résistance à l'hydrolyse....



Source : Action Composite

Les gelcoats se présentent sous forme de liquides homogènes onctueux, colorés et thixotropés (propriété qui permet à un fluide d'être très visqueux au repos et très fluide sous agitation). Ils se composent :

- d'une résine de base,
- de charges diverses,
- de pigments,
- de différents additifs.

Il existe différentes qualités de gelcoat en fonction de la nature des résines utilisées dans leur composition :

- les gelcoats polyesters compatibles avec les stratifiés à base de résine polyester,
- les gelcoats époxydes compatibles avec les stratifiés à base de résine époxydes,
- les gelcoats vinylesters compatibles avec les stratifiés à base de résine vinylester, polyester ou époxyde.

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

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

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ D. LES CHARGES ET ADDITIFS

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

Ils se caractérisent par la nature des fibres qui les composent et leur présentation commerciale.

Le tableau 20 résume l'ensemble des fibres les plus couramment utilisées ainsi que leurs propriétés.

| Type de fibres | Densité | Module en traction GPA | Résistance à la rupture MPA | Allongement % | Coefficient de dilatation 10-6/°C |
|-----------------------|---------|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| Fibre de verre | 2.54 | 72 | 2800 | 2 | 7.2 |
| Fibre de carbone HR | 1.76 | 230 | 3290 | 1.4 | 3 |
| Fibre de carbone HM | 1.81 | 399 | 2450 | 0.5 | - 0.5 |
| Fibre d'aramide | 1.44 | 130 | 2340 | 2.8 | - 4 |
| Fibre de bore | 2.6 | 414 | 2900 | 0.8 | 4.5 |
| Fibre de polyéthylène | 0.97 | 119 | 2625 | 4 | 10 |
| Fibre de basalte | 2.8 | 89 | 4800 | 3.15 | 8 |
| Fibre de sisal | 1.4 | 15 | 770 | 2.2 | 4 |
| Fibre de lin | 1.49 | 10 | 800 | 3 | 4 |
| Fibre de silicium | 3.18 | 428 | 3100 | 0.72 | 5 |

Tableau 20 – Propriétés des différentes fibres de renforcement



Photo 23 – Tissus de verre, carbone et aramide

→ Les fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les placent au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

→ Les fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres utilisées comme précurseurs sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Dans le principe d'élaboration, le PAN subit un traitement thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille, est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

→ Les fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonées, mais leur résistance à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, différents ensimages de fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides.

→ Les fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramique sont souvent constitués de renforts et de matrices en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. On retrouve ces fibres dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs. Quelques exemples de fibres céramiques :



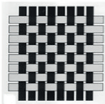

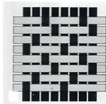

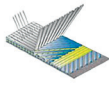
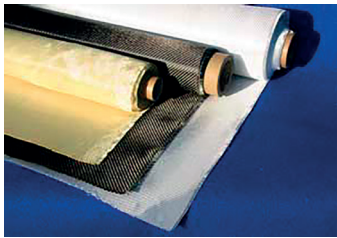

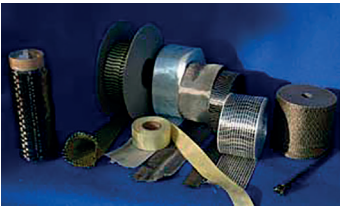
- les fibres de Carbure de Silicium,
- les fibres de Bore.

→ Les fibres de basalte

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

D'autre part, elle est imperméable et résiste aux radiations, aux acides ainsi qu'aux UV.
Toutes ces fibres se présentent sous différentes formes comme indiqué dans le tableau 21 suivant.

4 [LES CONSTITUANTS DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

| Présentations commerciales | Descriptifs |
|--|--|
| <p>Fils ou stratifils roving</p> <p>Ensemble de fils de base ou de filaments parallèles assemblés sans torsion.</p> |  |
| <p>Mat à fils coupés ou mat à fibres longues</p> <p>Nappe obtenue à partir de fils continus ou coupés disposés sans orientation préférentielle et liés entre eux par un liant chimique.</p> |  |
| <p>Tissus</p> <p>Entrecroisement de fils de chaîne et de fils de trame se caractérisant par :</p> <ul style="list-style-type: none"> • son mode de tissage <div data-bbox="151 1205 751 1330" style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">      </div> <ul style="list-style-type: none"> • la nature des fils qui le composent : <ul style="list-style-type: none"> - tissus roving (fabriqué à partir de fils roving) - tissus sillionne (fabriqué à partir de fils sillionne*) - tissu verranne (fabriqué à partir de fils verranne**) |   |
| <p>Nappes et rubans</p> <p>Bandes de tissus présentées sous différentes largeurs</p> |  |

* Fil de base roving constitué de filaments continus et ayant subi une torsion
 ** Fil constitué de filaments discontinus

Tableau 21 – Présentation commerciale des différentes fibres

→ E. LES ÂMES

Une âme est un élément renforçant utilisé pour la réalisation de structure sandwich. Elle a pour rôle de maintenir l'écartement entre deux peaux afin de donner une rigidité à l'ensemble de la structure.

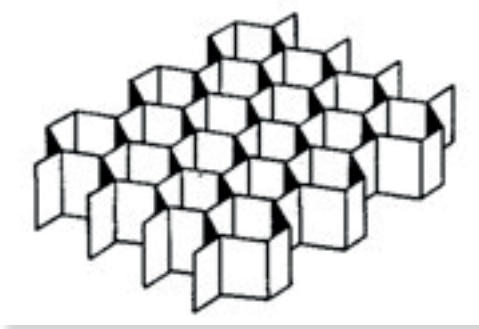
Le choix d'une âme sandwich est principalement dicté par les propriétés mécaniques et thermiques imposées par le cahier des charges. Les âmes utilisées pour la fabrication de structures sandwich peuvent être de différentes natures en fonction du cahier des charges de la pièce.

Les plus courantes sont :

- Les plastiques alvéolaires (mousses) :
 - polyuréthane,
 - phénolique,
 - PVC,
 - polystyrène (utilisé avec des résines spéciales).



Source : Airex

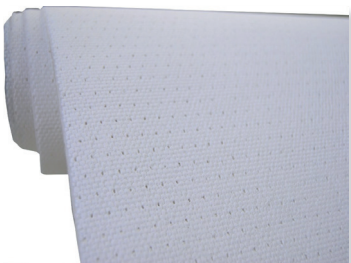


- Les nids d'abeille :
 - de papier kraft,
 - de papier aramide,
 - d'alliage d'aluminium,
 - d'alliage de titane,
 - de polypropylène.

- Le bois :
 - balsa,
 - contreplaqué,
 - latté.



Source : Baltek



Source : Composietenshop

- Les feutres type « Coremat »

5 — [LA STRUCTURE DES PIÈCES COMPOSITES]

Les pièces en matériaux composites peuvent se décliner suivant trois types de structures :

- les structures monolithiques,
- les structures sandwich,
- les structures 3D.

→ A. LES STRUCTURES MONOLITHIQUES

Ces structures sont les plus courantes. La pièce est constituée d'un empilage de couches de renfort appelées strates.

Il est possible de mixer différentes couches de renfort en fonction des propriétés mécaniques souhaitées. Ainsi, on peut alterner des couches de mats isotropes dans le plan avec des couches de tissus anisotropes afin de renforcer la résistance de la pièce en fonction des différentes sollicitations mécaniques.

L'orientation des fibres joue aussi un rôle très important dans la résistance de la pièce. Généralement les structures monolithiques sont réservées à des pièces de faibles épaisseurs (entre 3 et 5 mm) mais il est possible d'avoir des épaisseurs de pièces plus importantes en respectant certaines étapes intermédiaires de stratification afin de minimiser au maximum les phénomènes de retrait.

→ B. LES STRUCTURES SANDWICH

On appelle pièce à structure sandwich toute pièce stratifiée composée d'une âme comprise entre deux parements.



Les structures sandwich ont la particularité de pouvoir à la fois rigidifier et alléger une structure tout en lui apportant de nouvelles propriétés comme par exemple une isolation phonique ou thermique selon le matériau d'âme choisi.

Les principaux avantages de ces structures sont :

- la légèreté (économie de poids à résistance égale),
- très grande rigidité,
- grande résistance en flexion,
- isolation thermique.

La figure 16 nous montre l'influence de l'épaisseur de l'âme sur la rigidité et le poids. Plus l'âme est épaisse, plus le panneau est rigide et résistant pour un poids très faible.

| | Structure monolithique | épaisseur de l'âme t | épaisseur de l'âme $3t$ |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Rigidité | 1.0 | 7.0 | 37.0 |
| Résistance à la flexion | 1.0 | 3.5 | 9.2 |
| Poids | 1.0 | 1.03 | 1.06 |

Source : Hexcel

Figure 16 - Évolution de la rigidité et du poids d'un sandwich en fonction de l'épaisseur

5 — [LA STRUCTURE DES PIÈCES COMPOSITES]

Pour les sandwichs de structure qui répondent à des sollicitations mécaniques importantes, on utilise généralement des âmes en nid d'abeille comme le montre la figure 17.

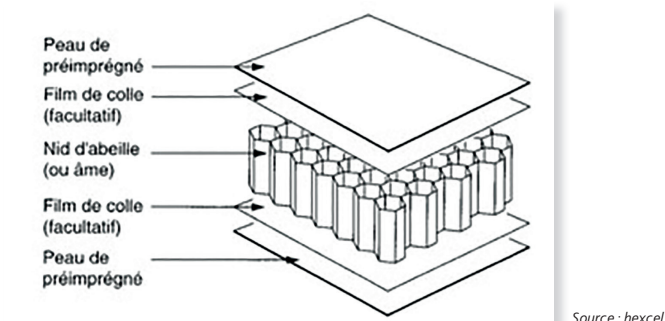


Figure 17 – Sandwich nid d'abeille avec peaux en Prépreg

Les âmes en mousse sont plutôt réservées pour la réalisation de structures sandwich isolantes (figure 18).

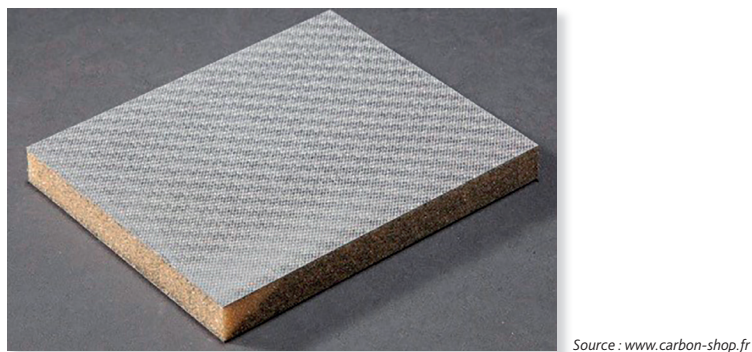


Figure 18 – Sandwich carbone/mousse

Mais il est possible de cumuler les deux effets dans une même structure en utilisant par exemple des nids d'abeille thermoplastiques du type Nidaplast (figure 19) ou des âmes de balsa (figure 20).



Figure 19 – Panneau Nidaplast

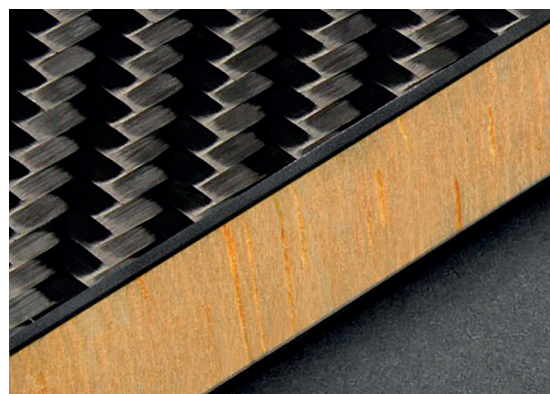


Figure 20 – Sandwich carbone/balsa

5 — [LA STRUCTURE DES PIÈCES COMPOSITES]

→ C. LES STRUCTURES 3D

Les structures 3D sont obtenues soit par tressage, soit par l'utilisation de renforts tissés en trois dimensions type Parabeam® comme le montre la figure 21 ci-dessous.

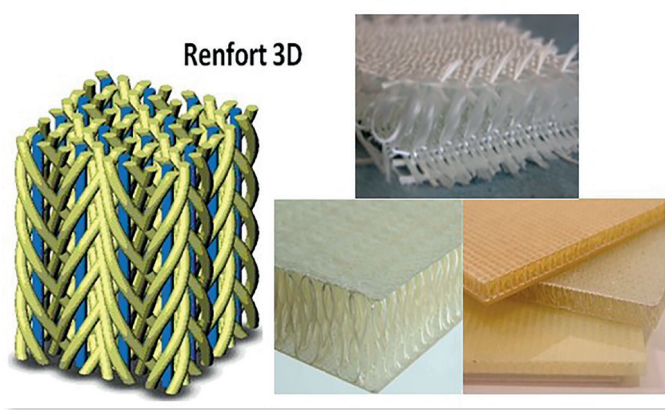


Figure 21 – Renforts 3D et renfort Parabeam® avant et après imprégnation

Le tressage s'effectue sur des métiers à tisser spécifiques qui permettent de réaliser soit des gaines ou chaussettes (figure 22) qui sont utilisées à posteriori, soit directement une préforme de la pièce qui sera ensuite injectée (figure 23 et 24).

Les structures ainsi obtenues possèdent des propriétés mécaniques élevées et restent légères. Très utilisé dans la fabrication des cadres de vélo de compétition, le tressage se retrouve dans la fabrication de pale d'hélice ou de pièce de révolution High Tech.



Source : Chomarar

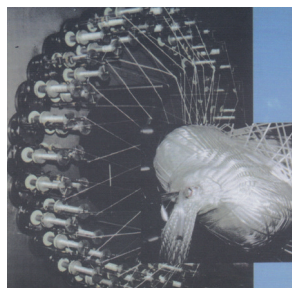
Figure 22 – Tressage d'une chaussette tubulaire



Source : Industrie et technologies

Figure 23 – Machine de tressage*

* La société Munich Composites réalise ses pièces de cadre en fibres de carbone par tressage. Le métier permet d'automatiser entièrement le placement des fibres. La préforme obtenue est ensuite durcie par injection de résine



Source Solutions Composites - Maurice Reyne

Figure 24 - Tressage d'un réservoir

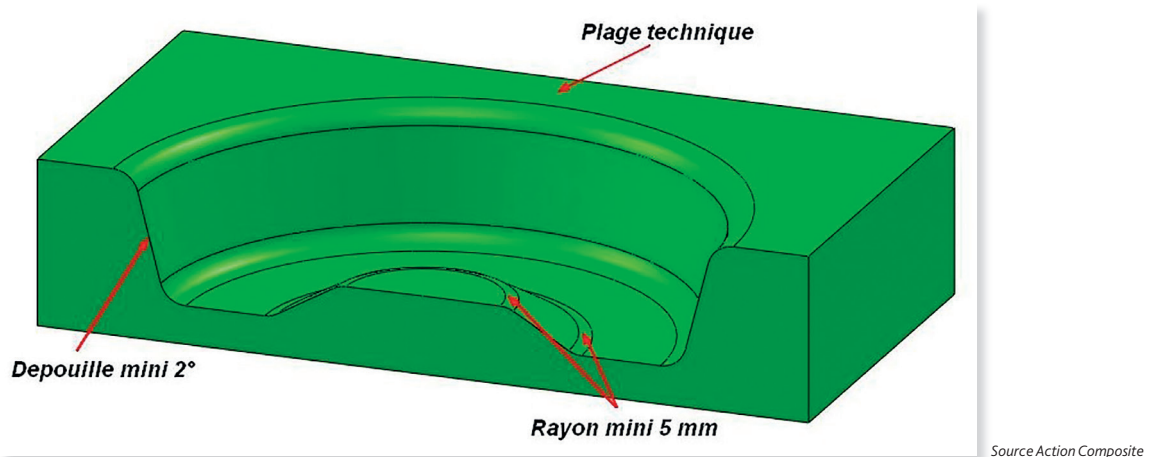
6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ A. LES PROCÉDÉS MANUELS

→ Le contact

Ce procédé entièrement manuel permet la réalisation de pièces de toutes dimensions aux formes simples ou complexes. Parfaitement adapté pour la réalisation de moules, de prototypes et pour la réparation, il nécessite peu de moyen, et permet la réalisation de petites à moyennes séries (de 500 à 800 pièces/moule/an environ).

Les pièces sont fabriquées à température ambiante et sans pression, à partir d'un moule ouvert tel que défini à la figure 25. Elles possèdent une seule face d'aspect et des propriétés mécaniques intéressantes.



Source Action Composite

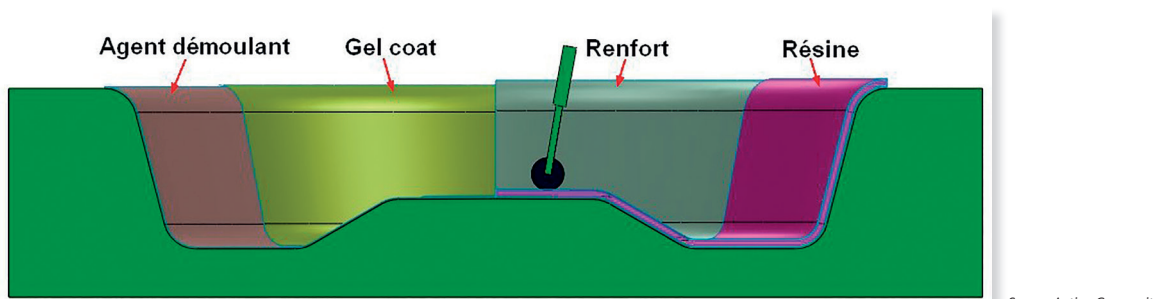
Figure 25 – Moulage au contact

Principe :

Le moulage au contact consiste à imprégner manuellement des renforts disposés dans un moule préalablement enduit d'un agent démoulant et recouvert d'une couche de surface appelé gelcoat (Figure 26).

L'imprégnation est réalisée au moyen d'un pinceau et d'un débulleur afin d'éliminer les bulles d'air insérées dans la stratification, et compacter correctement l'ensemble des renforts ainsi disposés et imprégnés (Photo 24).

La polymérisation se fait à température ambiante. Après durcissement du stratifié, la pièce est démoulée à l'aide d'un jet d'air comprimé et usinée aux dimensions finales.



Source Action Composite

Figure 26 – Principe de stratification au contact dans un moule négatif



Source : Medioplast

Les cadences journalières sont faibles et dépendent de la taille et de la complexité des pièces.

Les moules sont peu coûteux ce qui permet de les multiplier en fonction de la surface disponible au sol.

Le tableau 22 résume les principales caractéristiques du procédé.

Photo 24 – Débulleur et pinceau : les outils nécessaires à la stratification au contact

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Tous types de formes sans limitation |
| Dimensions des pièces | Sans limitation |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - Mat de verre - Tous types de tissus à base de fibre de verre, carbone, aramide - Renforts divers Résine : - Polyester - Epoxyde - Vinylester - Phénolique Charges : - Tous types de charges mais principalement le carbonate de calcium, le talc ou le trihydrate d'alumine (autoextinguibilité) |
| Aspect des pièces | Une seule face lisse Qualité des pièces liée au savoir faire de l'opérateur |
| Propriétés mécaniques | Moyennes à bonnes en fonction du taux de renfort |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 20 à 35% en poids pour des stratifiés constitués uniquement de mats 40 à 55% en poids pour des stratifiés constitués uniquement de tissus 20 à 45% en poids pour des stratifiés mixtes |
| Nature des outillages | Composites (Verre/polyester ou verre/époxyde) Bois apprêté Planche usinable Alu ou tôle acier |
| Moyen de mise en œuvre | Pinceau, débulleur |
| Coût d'investissement | Faible |
| Qualification de la main d'œuvre | Faible |
| Cadence maximale | De 100 à 800 pièces/an/moule |
| Série | Petite série, prototypes, moules, pièces aux formes complexes ou à plans de joint, réparation |
| Hygiène sécurité | Nécessite de travailler sous ventilation et EPI obligatoires Dégagement de vapeurs nocives Installations électriques antidéflagrantes |
| Utilisation du procédé | Prototypes fonctionnels. Carrosseries de véhicules utilitaires, transport public et automobiles petites séries. Pièces de customisation.... |

Tableau 22 - Principales caractéristiques du procédé contact

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ La projection simultanée (PS)

La projection simultanée est un procédé semi-mécanisé qui permet la réalisation de pièces de grandes dimensions aux formes simples ou complexes. Rapide et facile à mettre en œuvre, il nécessite l'utilisation d'une machine de projection (voir figure 27) assurant la découpe du fil, l'imprégnation et sa projection sur le moule.



Source : Medioplast



Source : Medioplast

Figure 27 – Machine de projection simultanée

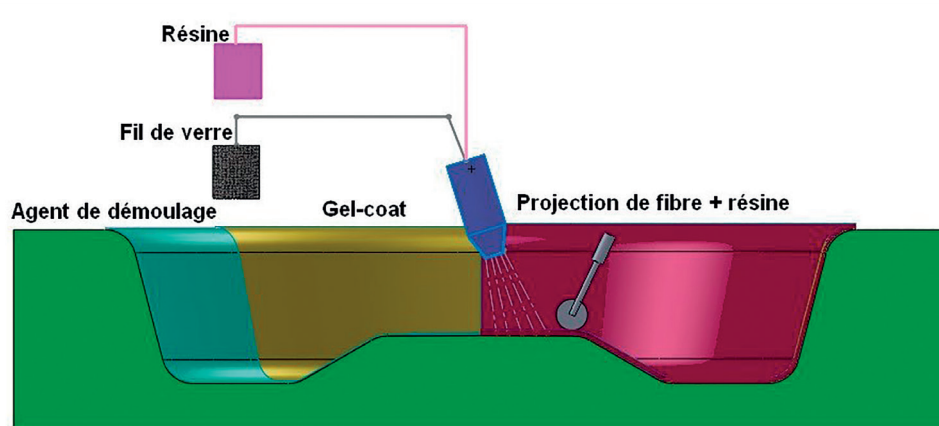
Les phases de préparation et de dosage de résine, de découpe des renforts et d'imprégnation sont ainsi réduites à une seule opération, générant un gain de temps et de productivité conséquent.

Principe :

La projection simultanée est réalisée dans un moule ouvert préalablement enduit d'un agent de démoulage et d'un gelcoat en couche de surface.

Ce procédé se distingue du contact par l'utilisation d'une machine qui permet la projection simultanée de fibres coupées et de résine sur le support. La couche projetée épousant parfaitement les formes du support, est alors compactée à l'aide d'un débulleur. L'épaisseur de la pièce est obtenue par la succession de couches projetées et débullées.

La polymérisation se fait à température ambiante. Après durcissement du stratifié, la pièce est démoulée à l'aide d'un jet d'air comprimé et usinée aux dimensions finales.



Source Action Composite

Figure 28 – Principe de la stratification par projection simultanée

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Les pièces sont fabriquées à température ambiante, sans pression et possèdent une seule face d'aspect. Il est possible comme au contact, de renforcer localement certaines parties de pièce ou de réaliser des structures sandwich. Les propriétés mécaniques obtenues sont intéressantes.

Les cadences journalières restent malgré tout, faibles et les séries réalisées peuvent atteindre les 1 000 pièces/an/moule.

Des systèmes automatisés de projection simultanée existent mais leur coût de mise en route et d'entretien reste très élevé.

Limite du procédé :

Ce procédé génère une pollution importante due à la projection simultanée de fibre et de résine. Il nécessite de travailler dans des zones aménagées parfaitement ventilées dont le coût d'installation est loin d'être négligeable. Ce point d'hygiène est une contrainte forte du procédé qui bien que performant disparaît peu à peu des ateliers au profit de procédés dit « plus propres ». Le tableau 23 ci-dessous résume les caractéristiques principales de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|--|
| Formes possibles | Tous types de formes sans limitation |
| Dimensions des pièces | Sans limitation au-delà de 0,7 m ² |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - Fil de verre de type stratifil Résine : - Polyester - Vinylester Charges : - Tous types de charges mais principalement le carbonate de calcium, le talc ou le trihydrate d'alumine (autoextinguibilité) |
| Aspect des pièces | Une seule face lisse Qualité des pièces liée au savoir faire de l'opérateur |
| Propriétés mécaniques | Moyennes (structure irrégulière) |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 20 à 35% en poids pour des stratifiés constitués uniquement de stratifils 20 à 45% en poids pour des stratifiés mixtes stratifils/tissus |
| Nature des outillages | Composites (Verre/polyester ou verre/époxyde) Bois apprêté Planche usinable Alu ou tôle acier |
| Moyen de mise en oeuvre | Machine de projection, débulleur |
| Coût d'investissement | Machine de projection, débulleur |
| Qualification de la main d'œuvre | Faible à modérée selon la dimension des pièces |
| Cadence maximale | De 100 à 1 000 pièces/an/moule |
| Série | Petite série, pièces de grandes dimensions aux formes complexes ou à plans de joint. |
| Hygiène sécurité | Obligation de travailler sous ventilation et EPI obligatoires Dégagement important de vapeurs nocives Installations électriques antidéflagrantes |
| Utilisation du procédé | Carrosseries de véhicules utilitaires, remorques de camion, bus voiture sans permis, automobiles petites séries.... |

Tableau 23 - Principales caractéristiques de la projection simultanée

→ B. LES PROCÉDÉS MOYENNE SÉRIE

Cette catégorie regroupe un certain nombre de procédés réalisés en moules fermés utilisant des moyens et des appareillages simples, à faible investissement. S'adaptant à des séries de 1 000 à 5 000 pièces, ils offrent plusieurs intérêts comme par exemple l'obtention de deux faces lisses ou des épaisseurs constantes.

Ils sont techniquement et économiquement très intéressants et ont été le point de départ d'une évolution technologique conséquente dans la transformation des matériaux composites.

Du fait de leur simplicité, ils restent la base de tous les procédés modernes qui ont conduit à une optimisation toujours croissante des propriétés, de l'aspect et de la qualité des pièces composites produites à ce jour.

→ L'injection basse pression (RTM – Resin Transfert Molding)

Le RTM est un procédé semi-automatisé permettant la réalisation de pièces aux formes peu ou moyennement complexes et de dimensions inférieures à 6 m². Les pièces obtenues sont d'épaisseur constante avec deux faces lisses gelcoatées ou non. Les cadences de fabrication peuvent varier de une à trois pièces/heure/moule et les séries peuvent atteindre jusqu'à 5 000 pièces /an/moule.

Notons que de nouveaux procédés dérivés du RTM font leur apparition pour la réalisation de très grandes séries comme le RTM haute pression, développé pour l'industrie automobile par la société Dieffenbacher, et le HS-RTM (High Speed RTM), identique au RTM mais avec des cadences de fabrication de 30 pièces à l'heure.

Le moule participe en grande partie à la réussite du moulage RTM. Celui-ci peut être réglé en température et doit répondre à certains critères de conception comme défini dans la figure 29.

Principe :

L'injection basse pression RTM consiste à injecter une résine liquide, chargée ou non, dans l'empreinte fermée d'un moule et d'un contre-moule préalablement rempli de renforts secs. Sous l'action de la pression d'injection, la résine flue au travers du renfort et imprègne la totalité de la pièce. L'injection de résine est réalisée au moyen d'une machine d'injection assurant le mélange résine/catalyseur (figure 30).

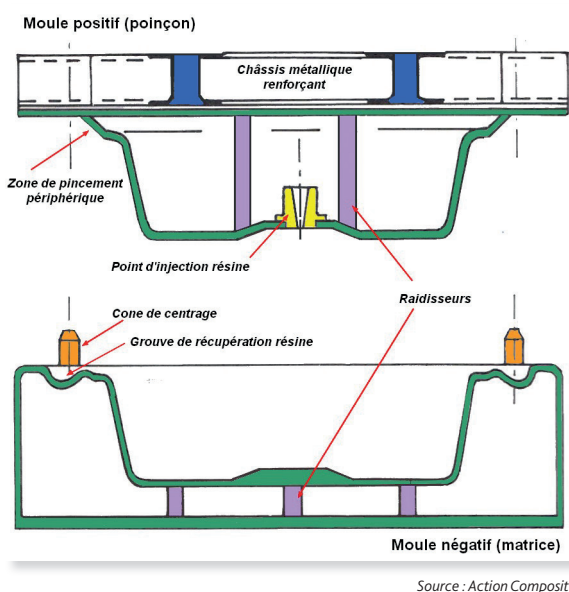
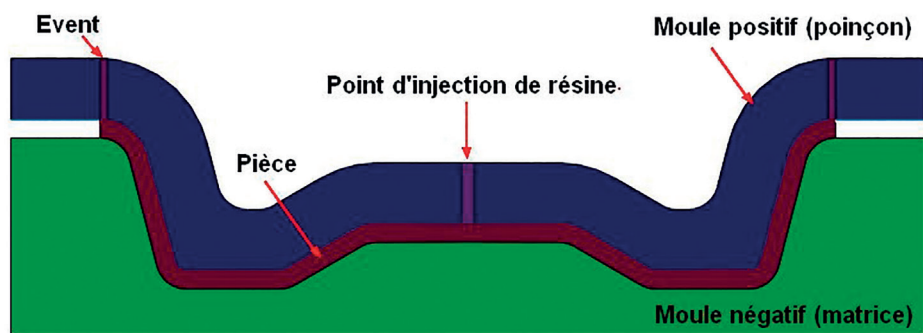


Figure 29 – Schéma de principe d'un moule RTM



Figure 30 – Machine d'injection pour le RTM



Source : Action Composite

Figure 31 – Principe du moulage en injection basse pression RTM

Nota :

La pression d'injection et la résistance du renfort s'opposant au fluage de la résine, génèrent des contre-pressions importantes qui obligent à renforcer et à brider fortement les outillages. Des moyens de manutention plus ou moins importants, s'imposent alors en fonction de leur taille.

D'autre part, la masse des outillages, ainsi renforcés, génère des inerties thermiques qu'il faut apprendre à gérer lors de la fabrication des pièces. Le tableau 24 ci-dessous résume les caractéristiques principales de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Limitée aux formes peu ou moyennement complexes, démoulables et ne nécessitant pas de plan de joint |
| Dimensions des pièces | 1 à 6 m ² |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | <p>Renforts :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Renforts très déformables et à forte perméabilité tels que : <ul style="list-style-type: none"> - Mats à fils continus (Unifilo®...), - Complexe du type Rovicore®, Saertex®... - Tissus multiaxiaux - L'utilisation de renforts préformés permet d'optimiser fortement les cycles de fabrication résine : <ul style="list-style-type: none"> - Polyester - Vinylester - Epoxyde - Phénolique <p>Ces résines nécessitent une machine doseuse spécifique</p> <p>Charges :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tous types de charges mais principalement le carbonate de calcium, le talc ou le trihydrate d'alumine (autoextinguibilité) |
| Pression d'injection | De 1,5 à 4 bars |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses - Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Bonnes |
| Types de structures possibles | Monolithiques - Sandwichs |
| Taux de renfort | 20 à 50% en poids selon le type de renfort utilisé et les pressions mises en jeu |
| Nature des outillages | Composites (Verre/polyester ou verre/époxyde) Alu ou tôle acier Régulation en température possible des outillages |
| Moyen de mise en œuvre | Machine d'injection BP |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé selon le niveau d'automatisation |
| Qualification de la main d'œuvre | Faible |
| Cadence maximale | Modérée (de 1 à 3 pièces/heure/moule) - De 1 000 à 5 000 pièces/an/moule |
| Série | Moyennes séries, pièces industrielles de tous types. Pièces structurales. |
| Hygiène sécurité | Faibles émanations de COV - Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Capot, porte, déflecteur, spoiler, capucine de camion, pavillon,... |

Tableau 24 - Principales caractéristiques du moulage en injection basse pression RTM

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Remarque :

Le RTM connaît de nouveaux développements dans le secteur de l'automobile afin de réduire les temps de cycle au maximum. Pour la fabrication de la BMWi3, le constructeur a utilisé le procédé RTM en l'adaptant à la très haute pression.

Dans un premier temps, les renforts sont confectionnés et préformés. Une fois disposés dans le moule préalablement installé sur une presse, l'injection de résine est réalisée sous haute pression selon la technologie RTM dans les préformés secs. La presse maintient ensuite le moule en position fermée en appliquant une force allant jusqu'à 4 500 tonnes, suivant des paramètres de température, de pression et de temps exactement définis, et jusqu'à polymérisation complète de la résine. Les cycles annoncés par le constructeur varient de 3 à 10 minutes selon la pièce fabriquée (voir photo 25).



Source : BMW

Photo 25 – Drapage d'un module de la BMWi3 dans le moule RTM haute pression

→ L'injection basse pression assistée par le vide (RTM Light)

Ce procédé semi-automatisé est une évolution du procédé RTM. L'utilisation du vide permet de réduire les contre-pressions générées lors de l'injection et autorise l'emploi de moules légers et peu onéreux, éliminant ainsi les problèmes de manutention et d'inertie thermique rencontrés lors du moulage RTM.

Tout comme le RTM, il permet la réalisation de pièces jusqu'à 6 m² aux formes peu complexes et démoulables sans plan de joint. Les pièces obtenues ont deux faces lisses gelcoatées ou non, et l'utilisation de résine chargée est possible.

Les séries varient de 1 000 à 3 000 pièces/an/moule pour des cadences d'une à deux pièces/heure/moule.

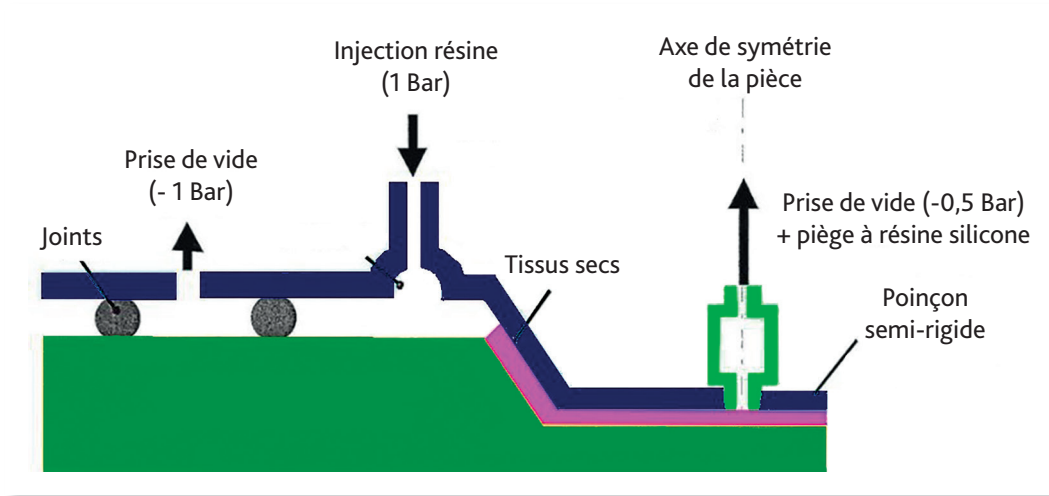
Le moule négatif (matrice) est un moule contact avec une plage technique élargie. Le moule positif (poinçon) est d'une structure légère semi-rigide pouvant se déformer lors de la mise sous-vide. La plage technique comporte un canal périphérique d'alimentation de résine et deux joints assurant l'étanchéité de l'outillage.

Principe :

Après avoir disposé les renforts dans l'entrefer de l'outillage, le moule est fermé à l'aide d'un vide périphérique d'environ 90 mbar (-0.9 bar). La résine est ensuite introduite dans le moule, soit par gravité, soit par injection, à l'aide d'une machine ou d'un pot sous pression.

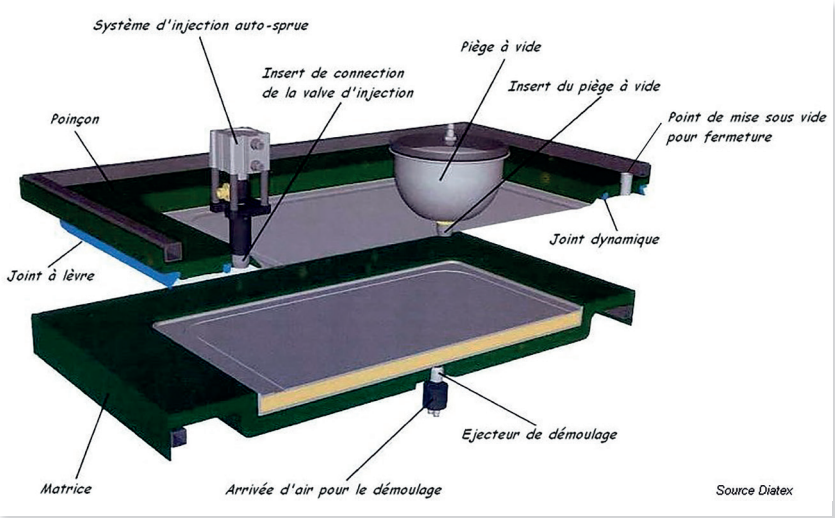
La migration de la résine, l'imprégnation des renforts et l'ébullage sont assurés par la mise sous vide à 60 mbar (-0,6 bar) de l'entrefer (voir figures 32 et 33). Ce vide est maintenu jusqu'à la polymérisation de la résine.

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]



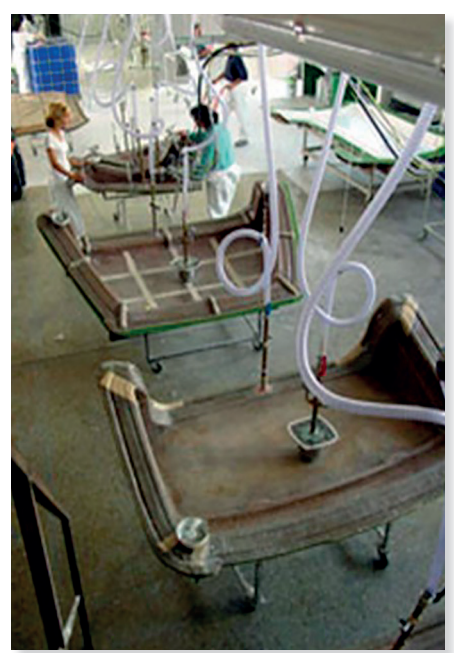
Source : Action Composite

Figure 32 - Schéma de principe du moulage en RTM Light



Source : Diatex

Figure 33 - Principe du moulage du procédé RTM Light



Source : SOTIRA

Photo 26 - Fabrication de toit en RTM Light

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 25 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé :

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Limité aux formes peu ou moyennement complexes, démoulables et ne nécessitant pas de plan de joint |
| Dimensions des pièces | 1 à 6 m ² |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | <p>Renforts :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Renforts très déformables et à forte perméabilité tels que : <ul style="list-style-type: none"> - Mats à fils continus (Unifilo®...), - Complexe du type Rovicore®, Saertex®... - Tissus multiaxiaux - L'utilisation de renforts préformés permet d'optimiser fortement les cycles de fabrication <p>Résine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Polyester - Vinylester - Epoxyde - Phénolique <p style="margin-left: 200px;">} Ces résines nécessitent une machine doseuse spécifique</p> <p>Charges :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tous types de charges mais principalement le carbonate de calcium, le talc ou le trihydrate d'alumine (autoextinguibilité) |
| Pression d'injection | De 1,5 à 3 bars |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Epaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Bonnes |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 20 à 50% en poids selon le type de renfort utilisé et les pressions mises en jeux |
| Nature des outillages | Composites (Verre/polyester ou verre/époxyde) Alu ou tôle acier Régulation en température possible des outillages |
| Moyen de mise en œuvre | Machine d'injection BP ou pot sous-pression, ou gravité Pompe à vide |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé selon le niveau d'automatisation |
| Qualification de la main d'œuvre | Faible |
| Cadence maximale | Modérée (1 à 2 pièces/heure/moule) - De 1000 à 3000 pièces/an/moule |
| Série | Moyennes séries, pièces industrielles de tous types. Pièces structurelles |
| Hygiène sécurité | Faibles émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Capot, porte, déflecteur, spoiler, capucine de camion, roof... |

Tableau 25 - Principales caractéristiques du procédé RTM Light

→ Le moulage sous-vide et l'infusion

Les procédés faisant appel au vide sont nombreux. Celui-ci ayant pour principal avantage de permettre d'appliquer sur une pièce une pression uniforme importante à moindre coût. Mais il présente aussi certains inconvénients. Ceux-ci sont résumés dans le tableau 26 ci-dessous.

| Intérêts | Limites d'utilisation |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Limitations des émissions de COV en atelier - Meilleur compactage - Diminution des inclusions d'air - Caractéristiques mécaniques élevées - Épaisseur constante - Diminution des pressions d'injection en facilitant la migration de la résine par le vide - Diminution des contre pressions liées à l'injection - Facilité de mise en oeuvre - Reproductibilité | <ul style="list-style-type: none"> - Petites séries (<1 000 pièces/an/moule) - Taux de renfort lié au procédé - Difficile à mettre en oeuvre avec des moules à plan de joint - Nécessité d'utiliser des renforts perméables - Prix des matières et des matériaux élevés |

Tableau 26 – Avantages et inconvénients liés à l'utilisation du vide

Parmi les procédés les plus couramment utilisés dans l'automobile, on trouve :

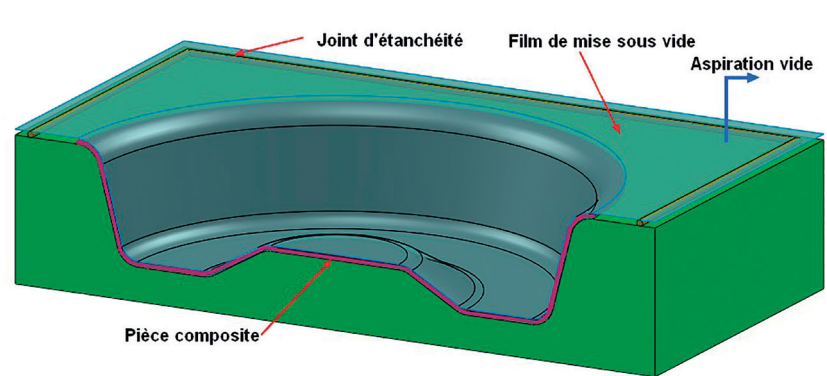
- le moulage sous bâche à vide,
- l'infusion,
- le moulage des prépregs sous sac à vide en étuve ou en autoclave,
- le moulage des composites thermoplastiques sous-vide.

• Le moulage sous bâche à vide

Principe :

Après avoir drapé la pièce par empilage de tissus imprégnés de résine, on dispose sur la pièce un empilage de plis destiné à favoriser l'application du vide.

La mise en pression sera réalisée grâce à l'action d'une bâche sous laquelle on aura préalablement fait le vide. La pression mise en jeu n'excède pas un bar (pression au niveau 0 de la mer).



Source : Action Composite

Figure 34 – Principe du moule sous bâche à vide

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 27 détaille l'ensemble des composants généralement utilisés lors de la mise sous-vide.

| Composants | Matériaux | Fonctions |
|--|--|---|
| Tissus d'arrachage (peel ply)  | Tissu polyamide ou polyester de 50 à 125 g/m ² pour des températures de 190° à 210°C | Permet de retirer les produits d'environnements de la pièce après polymérisation. Sert à réguler le taux de résine en pompant l'excédent. Après retrait, permet d'obtenir une surface de pièce prête à l'encollage. |
| Vac pac perforé  | Film étirable démoulant en polyéthylène pouvant atteindre 300% d'élongation | Permet de limiter la remontée de résine et d'évacuer l'air et les gaz contenus dans le stratifié. |
| Feutre de drainage (bidim)  | Feutre 100% polyester non tissé incompressible sous des pressions de 3 à 7 bars à des températures supérieures à 200°C | Favorise le drainage de l'air vers la pompe à vide, permettant ainsi une répartition homogène de la dépression. |
| Film de mise sous-vide (Tédlar ou bâche à vide)  | Films en polyamide, PTFE ou Polyimide supportant des élongations de 90 à 1 000% à des températures variant de 125° à 400°C | Permet de rendre l'empilage étanche. |
| Joint butyle (pâte à vide)  | Base butyle pour des températures < 200°C Base silicone pour des températures >200°C | Permet de réaliser l'étanchéité de la bâche à vide. |

Tableau 27 – Composants pour la mise sous-vide

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 28 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Limité aux formes peu ou moyennement complexes, démoulables et ne nécessitant pas de plan de joint |
| Dimensions des pièces | 1 à 3 m ² |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | <p>Renforts :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Renforts très déformables et à forte perméabilité tels que : <ul style="list-style-type: none"> - Mats à fils continus (Unifilo®...), - Complexe du type Rovicore®, Saertex®... - Tissus multiaxiaux - L'utilisation de renforts préformés permet d'optimiser fortement les cycles de fabrication <p>Résine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Polyester - Vinylester - Epoxyde - Phénolique <p>Charges :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tous types de charges mais principalement le carbonate de calcium, le talc ou le trihydrate d'alumine (autoextinguibilité) |
| Dépression vide | De (-0,5 bar) à (-0,9 bars) |
| Aspect des pièces | 1 face lisse et 1 face régulière Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Bonnes |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 20 à 50% en poids selon le type de renfort utilisé et les pressions mises en jeu |
| Nature des outillages | Composites (Verre/polyester ou verre/époxyde) Alu ou tôle acier Régulation en température possible des outillages |
| Moyen de mise en oeuvre | Consommable de mise sous-vide Pompe à vide |
| Coût d'investissement | Modéré |
| Qualification de la main d'œuvre | Faible |
| Cadence maximale | Modérée (1 à 2 pièces/jour/moule) - < 1 000 pièces/an/moule |
| Série | Moyennes séries, pièces industrielles de tous types. Pièces structurelles |
| Hygiène sécurité | Faibles émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Capot, porte, déflecteur, pièces de custom... |

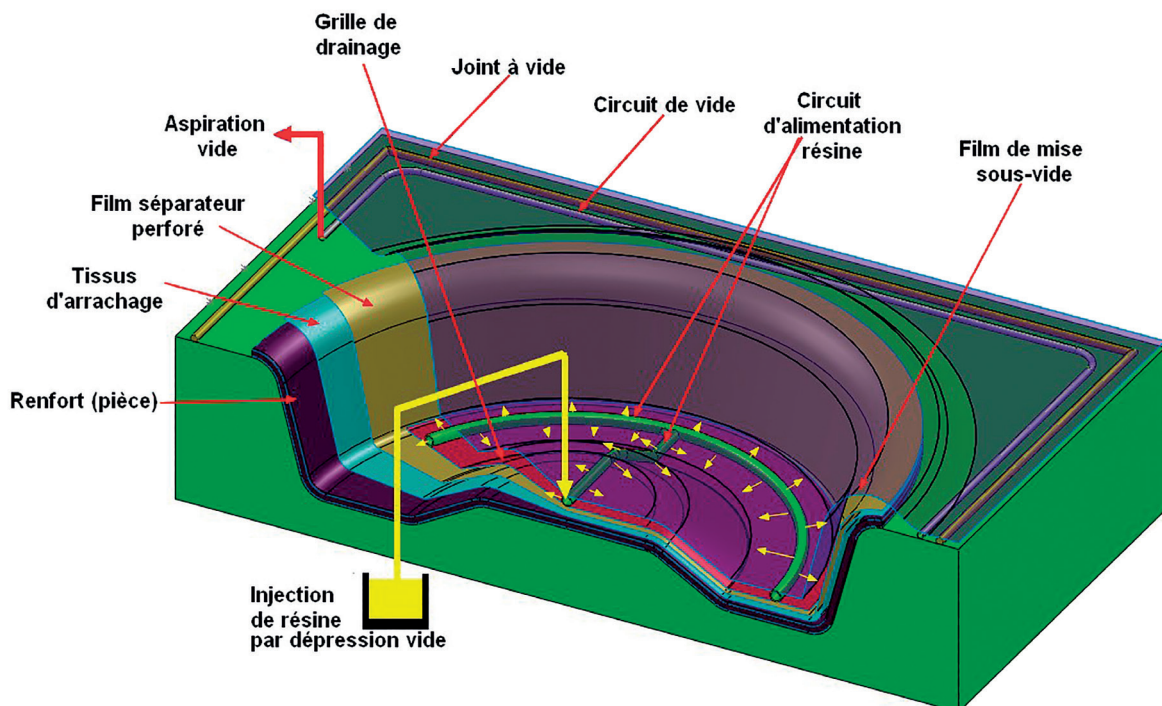
Tableau 28 - Principales caractéristiques du moulage sous bâche à vide

• L'infusion

Principe :

Principalement utilisée pour la fabrication de pièces de très grandes dimensions, l'infusion consiste à faire migrer de la résine au travers d'un renfort en utilisant le vide selon le principe défini, voir figure 35.

- Mise en place des renforts secs dans le moule négatif préalablement ciré et gelcoaté.
- Mise en place sur les renforts d'un ensemble de produits d'environnements assurant diverses fonctions avec dans l'ordre :
 - un tissu polyester appelé tissu d'arrachage permettant de retirer les produits d'environnements de la pièce après polymérisation,
 - un film étirable perforé limitant la quantité de résine dans la pièce et permettant l'évacuation des bulles d'air,
 - une grille de drainage assurant la diffusion de la résine dans le renfort tout en permettant une répartition homogène,
 - un réseau d'alimentation résine, réalisé à partir de tubes spiralés et disposés sur la pièce,
 - un circuit de vide en périphérie de la pièce,
 - un film de mise sous-vide étanché avec du joint butyle.



Source : Action Composite

Figure 35 – Principe de l'infusion

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Formes plus ou moins complexes, démoulables et ne nécessitant pas de plan de joint |
| Dimensions des pièces | 2 m ² minimum à illimitées |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | <p>Renforts :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Renforts très déformables et à forte perméabilité tels que : <ul style="list-style-type: none"> - Mats à fils continus (Unifilo®...), - Complexe du type Rovicore®, Saertex®... - Tissus multiaxiaux - L'utilisation de renforts préformés permet d'optimiser fortement les cycles de fabrication <p>Résine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Polyester - Vinylester - Epoxyde - Phénolique <p>Charges :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tous types de charges mais principalement le carbonate de calcium, le talc ou le trihydrate d'alumine (autoextinguibilité) |
| Dépression vide | De (-0,5 bar) à (-0,7 bars) |
| Aspect des pièces | 1 face lisse et 1 face régulière Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Bonnes à très bonnes |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 40 à 60% en poids selon le type de renfort utilisé et les pressions mises en jeu |
| Nature des outillages | Composites (Verre/polyester ou verre/époxyde) Alu ou tôle acier Régulation en température possible des outillages |
| Moyen de mise en oeuvre | Consommable de mise sous-vide Pompe à vide |
| Coût d'investissement | Modéré |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Faible à très faible - < 500 pièces/an/moule |
| Série | Petites séries, pièces industrielles de tous types. Pièces structurelles, bateaux. |
| Hygiène sécurité | Faibles émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Capot (voir photo 27), pièces de custom, panneau de véhicule industriel... |

Tableau 29 - Principales caractéristiques du moulage par infusion

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]



Photo 27 – Capot de la Mégane R26.R fabriqué en infusion par le groupe SORA

• Le moulage des prépregs sous sac à vide en étuve ou en autoclave

Un prépreg est un demi-produit de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur. Il est constitué d'un renfort tissé ou unidirectionnel en fibre de verre, carbone, aramide ou bore, préimprégné de résine généralement époxy, phénolique ou vinylester. Il se présente sous forme de bande plus ou moins large, prise en sandwich entre deux films protecteurs en polyéthylène.



Figure 36 – Echantillonnage de prépregs

Source : Easycomposites

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 30 ci-dessous résume l'intérêt des prépregs pour les fabrications composites.

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|--|---|
| Stockage et manipulation d'un seul produit | Prix élevé |
| Contrôle précis du taux de renfort | Conservation au froid à -18°C |
| Limitation des déchets | |
| Propriétés mécaniques élevées | |

Tableau 30 – Avantages et inconvénients des prépregs

Principe :

Le moulage sous-vide des prépregs s'effectue dans un moule négatif. La pièce est réalisée par empilage de couches successives de prépregs précoupées et ajustées sur le moule.

La mise sous-vide nécessite la mise en place d'un ensemble de produits disposés et ordonnés sur la pièce comme décrit sur la figure 37.

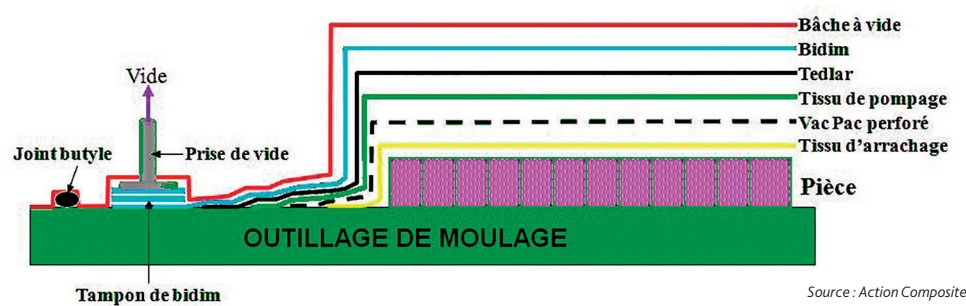


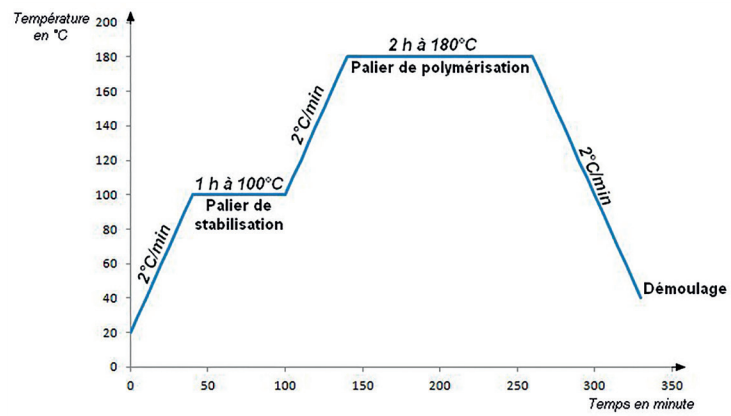
Figure 37 – Principe du moulage des prépregs sous-vide

1. Le tissu d'arrachage permet de retirer les produits d'environnements de la pièce après polymérisation. Il sert aussi à réguler le taux de résine en pompant l'excédent et permet d'obtenir une surface de pièce prête à l'encollage.
2. Le vac-pac permet de limiter la remontée de résine et d'évacuer l'air et les gaz contenus dans le stratifié.
3. Le tissu de pompage est un tissu grossier qui permet de récupérer tout l'excédent de résine.
4. Le Tedlar est un film étirable non perforé qui permet de stopper la remontée de résine vers la bâche à vide.
5. Le bidim favorise le drainage de l'air vers la pompe à vide, permettant ainsi une répartition homogène de la dépression.
6. La bâche à vide et le joint butyle permettent de rendre l'empilage étanche.

Une fois la mise sous-vide de la pièce réalisée, la polymérisation peut s'effectuer soit en étuve, soit dans un autoclave selon un cycle de cuisson adapté au prépreg utilisé.

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

La figure 38 donne un exemple de cycle de cuisson d'un prépreg carbone/époxy standard.

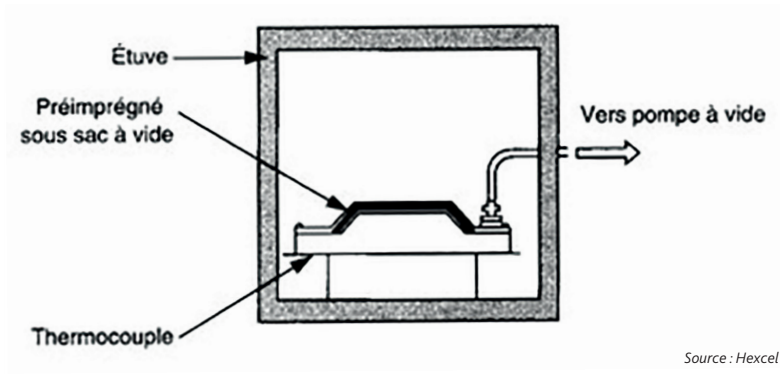


Source : Action Composite

Figure 38 - Cycle de polymérisation d'un prépreg carbone/époxy standard

- La polymérisation en étuve

La polymérisation en étuve convient particulièrement aux pièces de faible épaisseur et de grandes dimensions. La consolidation dans le sac à vide se fait avec une pression d'1 bar. Ensuite le complexe sous vide est placé dans une étuve ayant une bonne ventilation. La pièce composite est polymérisée après un cycle de cuisson relativement court.



Source : Hexcel

Figure 39 – Principe du moulage sous sac à vide en étuve

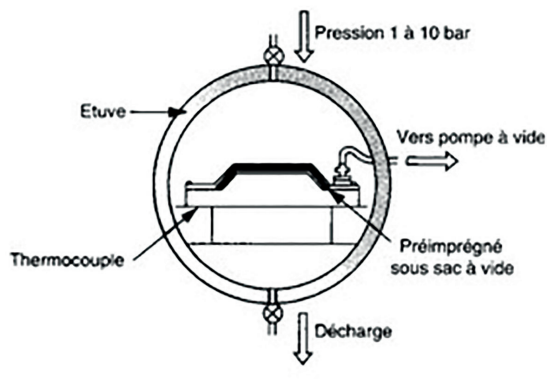
- La polymérisation en autoclave

La polymérisation en autoclave est utilisée pour des pièces structurales de haute qualité ayant un taux de fibres élevé et un taux de porosités très faible.

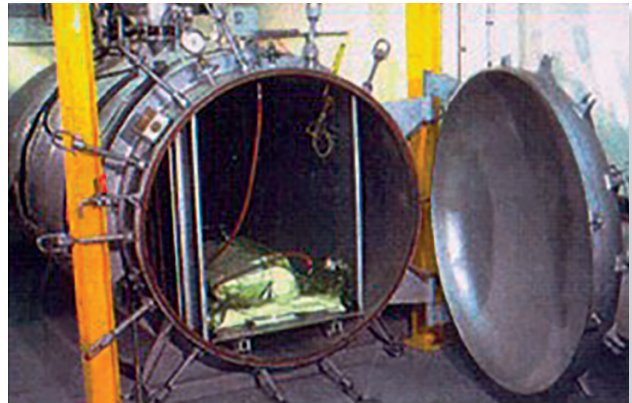
Un autoclave est un moyen chaud constitué d'un réservoir sous pression dans lequel les conditions de cuisson pour le composite sont optimales en contrôlant le vide, la pression, la rampe de montée en température et la température de cuisson. La pression de travail peut varier de 3 à 15 bars selon la dimension et la forme des pièces.

Ce moyen chaud permet de mouler des pièces épaisses de forme complexe. De longs cycles de cuisson sont nécessaires car contrairement à une étuve, un autoclave, de par sa masse et sa conception, présente une plus grande inertie thermique. Ce moyen chaud permet également de garantir une homogénéité thermique entre le moule et la pièce composite, en utilisant de faibles gradients de montée en température.

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]



Source : Hexcel

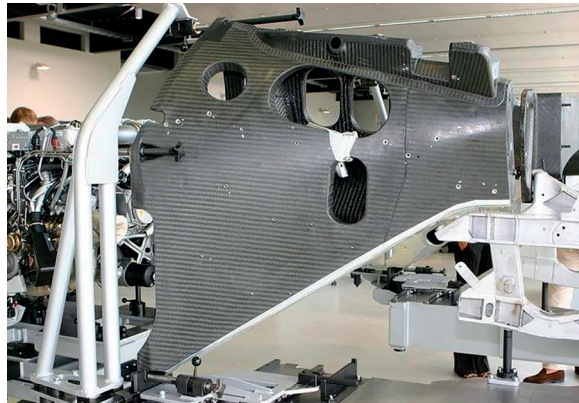


Source : Médiplast

Figure 40 – Principe du moulage sous-vide en autoclave

| | |
|------------------------------------|--|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint |
| Dimensions des pièces | Illimitées |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts - Tissus toutes fibres (verre, carbone, aramide, bore, polyéthylène...) Résine - Vinylester - Epoxyde - Phénolique - Polyimide - Cyanate-Ester |
| Dépression vide | De (-0,5 bar) à (-0,9 bars) |
| Aspect des pièces | 1 face lisse et 1 face régulière Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Élevées |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 60 à 80% en poids |
| Nature des outillages | Alu ou tôle acier Composites (verre ou carbone/époxyde) |
| Moyen de mise en oeuvre | Consommable de mise sous-vide Pompe à vide |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Faible - < 1 000 pièces/an/moule |
| Série | Petites séries, pièces industrielles de tous types. Pièces structurales, bateaux, pièces aéronautiques |
| Hygiène sécurité | Faibles émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Châssis de voiture de sport, capot, panneau sandwich, éléments de carrosserie sur véhicule haut de gamme ... |

Tableau 31 - Principales caractéristiques du moulage sous-vide des prépregs



Source : Bugatti Veyron

Figure 41 – Élément de carrosserie en carbone de la Bugatti Veyron

- Le moulage des composites thermoplastiques sous-vide

Les équipementiers français misent énormément sur le développement des composites thermoplastiques. Selon les séries et les cadences souhaitées, ils peuvent se transformer avec différents procédés comme la thermocompression, l'injection, le vide et bien d'autres encore.

Leurs avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau ci-dessous :

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|--|---|
| Possibilité de créer des produits semi-finis « secs » comme le Twintex (Co-tissage de fibres organiques et de fibres thermoplastiques) | Obligation d'avoir des thermoplastiques avec une Tg ¹ relativement élevée afin d'éviter toute détérioration (surtout dans le domaine de l'automobile ou les hautes-températures sont facilement atteintes) |
| Temps de conservation « infini » | Peu rigides (donc pas utilisable partout) |
| Plus facilement recyclable (réutilisable) | |
| Durée de traitement plus courte permettant une plus grande productivité | |
| Pas d'émissions nocives (gaz ou autres) | |
| Résistant à la corrosion | |
| Excellente résistance aux chocs | |

1) température de transition vitreuse

Dans la transformation des composites thermoplastiques, le vide est largement utilisé et peut être mis en oeuvre soit par moulage au sac dans un moule autonome régulé en température, soit par thermoformage.

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

- Le moulage au sac

Le principe du moulage au sac des composites thermoplastiques est identique à celui utilisé pour les thermodurcissables (voir chapitre 3) à la différence que les composants utilisés pour la mise sous-vide doivent résister aux températures de transformation des polymères thermoplastiques qui se situent généralement entre 200 et 300°C.

Le fluage des thermoplastiques n'occasionnant que peu de remontée de matière, le montage de mise sous-vide peut se réduire à l'utilisation d'un « Vac pac » non perforé, d'un « Bidim » et d'une bâche à vide comme le montre la figure 42.



Figure 42 – Mise sous vide pour un thermoplastique

Mais en production, l'utilisation d'une membrane souple préformée réutilisable, en élastomère de polyuréthane ou de silicone, peut remplacer avantageusement l'ensemble des composants de mise sous vide (photo 28).

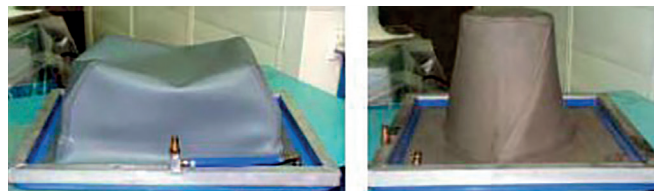


Photo 28 – Exemple de membrane silicone en forme

La pression maximale exercée par le vide à température ambiante n'excédant pas 1 bar, l'utilisation d'un autoclave est préférable pour un parfait fluage du polymère.

- Le thermoformage

Le thermoformage consiste à soumettre à la chaleur une feuille de thermoplastique renforcée pour la ramollir, et à la mettre en forme sur un moule positif par aspiration vide afin qu'elle en épouse parfaitement la forme (voir figure 43).

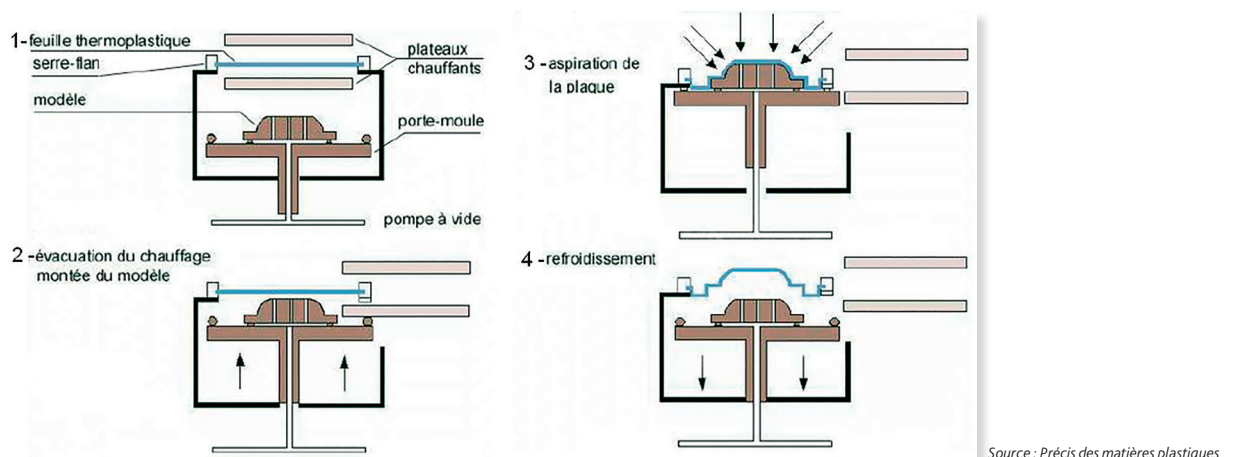


Figure 43 – Principe du thermoformage de plaque thermoplastique

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 32 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint |
| Dimensions des pièces | Illimitées |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - Fibres verre, carbone, aramide... Polymères : - Polypropylène (PP) - Polyéthylène (PE) - Polyamide (PA) - Polystyrène (PS) - Polyéthylène téréphtalate (PET)... |
| Dépression vide | De (-0,5 bar) à (-0,9 bars) |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Moyennes |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs (hors thermoformage) |
| Taux de renfort | 20 à 50% en poids |
| Nature des outillages | Alu ou tôle acier Composites (verre ou carbone/époxyde) |
| Moyen de mise en oeuvre | Consommable de mise sous-vide Pompe à vide Machine de thermoformage |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Élevée - > 1 000 pièces/an/moule |
| Série | Petites séries, pièces industrielles de tous types. Pièces de carrosserie |
| Hygiène sécurité | Pas d'émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Aile de voiture, capot, panneau sandwich, éléments de carrosserie, pare-chocs... |

Tableau 32 - Principales caractéristiques du thermoformage



Source : Vetrotex

Photo 29 - Aile de l'Opel Corsa Sport en Twintex PP

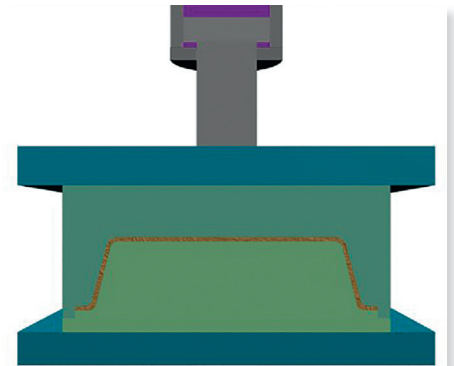
6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

- Le moulage par compression BP à chaud des Prépregs

Le moulage par compression BP à chaud des Prépregs est similaire au moulage des Prépregs sous vide à la différence que l'application de la pression est réalisée avec une presse permettant des paliers de cuisson allant de 120°C à 140°C et à une pression inférieure à 5 bars sur la matière.

L'utilisation de la presse permet (voir figure 44) :

- la suppression des consommables nécessaires au vide,
- un gain de temps sur le cycle de fabrication,
- une amélioration conséquente de l'état de surface,
- l'obtention de 2 faces lisses,
- une optimisation des propriétés mécaniques,
- une réduction du taux de porosité.



Source : Médiplast

Figure 44 – Principe du moulage des prépregs en compression à chaud

| | |
|------------------------------------|--|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint |
| Dimensions des pièces | Illimitées |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - Tissus toutes fibres (verre, carbone, aramide, bore, polyéthylène...) Résine : - Vinylester - Epoxyde - Phénolique - Polyimide - Cyanate-Ester |
| Pression de moulage | < 5 bars sur la matière |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Élevées |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 60 à 80% en poids |
| Nature des outillages | Alu, acier, composites (verre ou carbone/époxyde) |
| Moyen de mise en œuvre | Presse programmable à plateau chauffant |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Modérées - > 1000 pièces/an/moule |
| Série | Pièces industrielles de tous types. Pièces structurales, bateaux, pièces aéronautiques. Pièces automobiles à forte valeur ajoutée (luxé, F1...) |
| Hygiène sécurité | Faibles émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Châssis de voiture de sport, capot, panneau sandwich, éléments de carrosserie sur véhicule haut de gamme (voir photo 30) ... |

Tableau 33 - Principales caractéristiques du moulage par compression BP à chaud des prépregs



Source : Florian Madec Composites

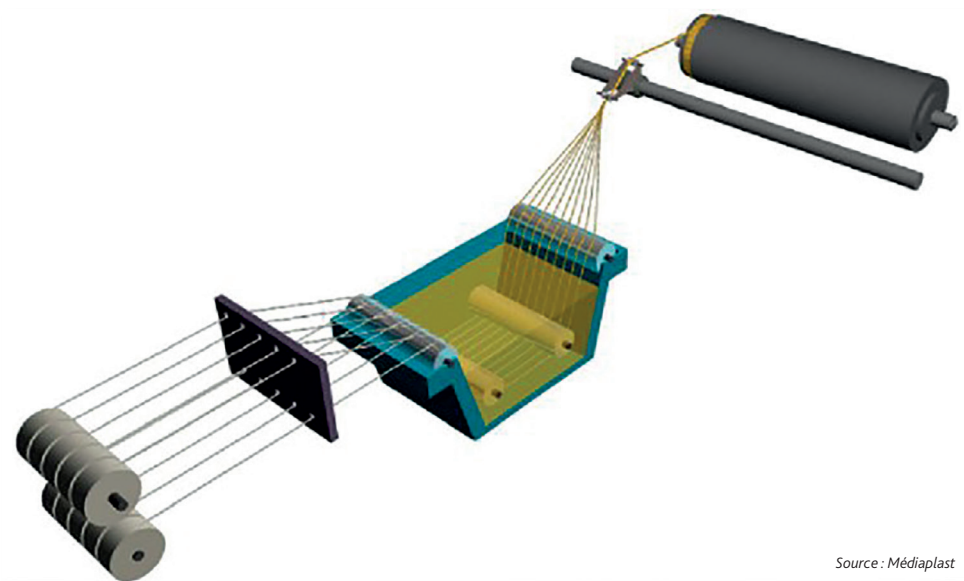
Photo 30 - Aileron en carbone pré-impregné

- Le moulage par enroulement filamentaire

L'enroulement filamentaire est un procédé qui permet l'obtention de corps creux en bobinant sur un moule appelé mandrin, différents renforts continus imprégnés de résine therm durcissable (voir figure 45).

La rotation du mandrin et la translation du chariot, qui porte un peigne pour guider et déposer les fils, sont synchronisées de façon à :

- donner un angle d'enroulement défini, compris entre 0° et 90° ,
- recouvrir entièrement le mandrin après un certain nombre d'aller-retours.



Source : Médaplast

Figure 45 – Principe de l'enroulement filamentaire

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 33 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Formes de révolution |
| Dimensions des pièces | Limitées à la taille des machines |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - fibres verre, carbone, aramide... Matrices : - Tous types de matrices thermodurcissables - Matrices thermoplastiques |
| Vitesse de rotation mandrin | 100 mètres /minute maxi |
| Aspect des pièces | 1 face lisse intérieure Variation d'épaisseur possible |
| Propriétés mécaniques | Élevées |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs possibles |
| Taux de renfort | 30 à 80% en poids |
| Nature des mandrins | acier ou bois |
| Moyen de mise en œuvre | Machine d'enroulement |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Modérée 1 à 8 pièces/jour/mandrin - > 1000 pièces/an/moule |
| Série | Pièces industrielles de révolution de tous types. Pièces automobiles |
| Hygiène sécurité | Travail sous ventilation et EPI obligatoires Dégagement de COV |
| Utilisation du procédé | Réservoir haute pression (voir photo 31), arbre de transmission (voir photo 32) |

Tableau 33 - Principales caractéristiques du moulage par enroulement filamentaire



Source : Hypercomp engineering Inc

Photo 31 - Réservoir haute pression en carbone époxy

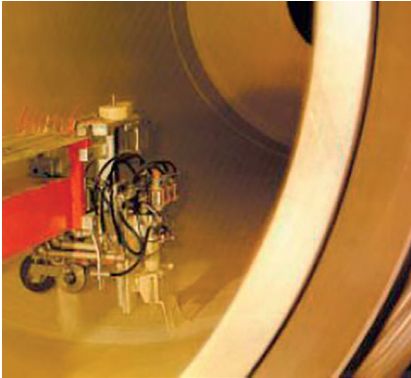


Source : Vulkan

Photo 32 - Arbre de transmission en carbone époxy

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

- Le moulage par centrifugation



Source : Rotaver SAI

Photo 33 – Centrifugation d'une pièce cylindrique

Le moulage par centrifugation consiste à utiliser la force centrifuge générée par la rotation du moule à grande vitesse pour réaliser l'imprégnation de la fibre par la résine.

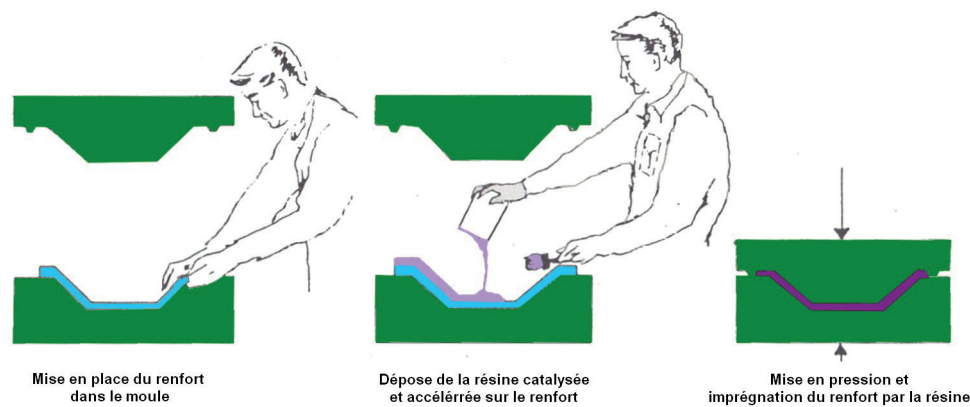
Cité à titre d'information, ce procédé destiné à la réalisation de cuve et de cylindre ne présente pas ou très peu d'applications connues dans le secteur de l'automobile.

→ C. LES PROCÉDÉS GRANDE SÉRIE

→ Le moulage par compression BP à froid voie humide

Le moulage par compression BP à froid voie humide consiste à déposer dans un moule préalablement gelcoaté ou non, différentes couches de renforts qui, après dépose de la quantité de résine nécessaire et suffisante, seront imprégnées par compression des renforts (Voir figure 46).

Le durcissement peut se faire avec ou sans apport de chaleur.



Source : CNRS

Figure 46 – Principe de la compression BP à froid

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 34 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Formes complexes, avec ou sans plan de joint |
| Dimensions des pièces | 1 à 10 m ² |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - Fibres verre, carbone, aramide... - Utilisation de préformes Matrices : - Tous types de résines thermodurcissables |
| Pression vide | < 5 bars |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Epaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Moyennes |
| Types de structures possibles | Monolithiques Sandwichs |
| Taux de renfort | 30 à 40% en poids |
| Nature des outillages | Alu ou tôle acier Composites (verre ou carbone/époxyde) Moule régulé en température (jusqu'à 80°C) |
| Moyen de mise en oeuvre | Presse |
| Coût d'investissement | Modéré |
| Qualification de la main d'oeuvre | Modérément qualifiée |
| Cadence maximale | 2 à 30 pièces /jour/moule - De 500 à 5000 pièces/an/moule |
| Série | Moyennes séries, pièces industrielles de tous types. Pièces de carrosserie |
| Hygiène sécurité | Travail sous ventilation et EPI obligatoires Dégagement de COV |
| Utilisation du procédé | Aile de voiture, capot, panneau sandwich, éléments de carrosserie, pavillon de camion (photo 34)... |

Tableau 34 - Principales caractéristiques du moulage par compression BP à froid



Photo 34 – Fabrication de pavillon de camion en compression BP à froid

Source : Action Composite

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

→ Le moulage par compression HP des Compounds (SMC, BMC,...)

Un compound est un demi-produit transformable sans préparation, sans dosage d'ingrédient et permettant de réaliser des pièces en grandes cadences, pour des séries importantes.

Les compounds sont fabriqués principalement à base de résines polyester, voire vinylester, renforcées par des fibres de verre ou de carbone.

Ils se présentent sous la forme de pâte à mouler appelée encore « choucroute », en vrac ou en feuille.

Parmi les pré-imprégnés, on distingue :

- les SMC (Sheet Moulding Compound) : compound sous forme de feuilles, épaissies chimiquement et contenant 20 à 35 % de fibre d'une longueur de 2,5 à 5 cm (voir photo 35),
- les BMC (Bulk Moulding Compound) : mélange pâteux en vrac chimiquement épaissi et contenant 15 à 25 % de fibres de verre d'une longueur de 3 à 12 mm (voir photo 36).



Source : Vetrotex/OCV

Photo 35 – Rouleaux de SMC



Source : Vetrotex/OCV

Photo 36 – Présentation du BMC (Bulk Moulding Compound)

Et d'autres types de compounds tels que :

- les DMC (Dough Moulding compound) : identiques aux BMC mais sans épaississant,
- les TMC (Thick Moulding Compound) : BMC épaissi à fibres longues et présentés en feuilles d'une épaisseur allant jusqu'à 5 cm,
- les ZMC : désignation de tout un système comprenant le mélange à mouler (BMC à fibres très longues), la machine d'injection et les outils de moulage,
- les HMC : (High Modulus Compound) : matériaux composites de haute résistance dont la teneur en fibres de verre est de 50 à 60 %,
- les XMC : matériaux composites, à enroulement croisé, avec une teneur en fibres de verre pouvant atteindre 80 %.

L'industrie automobile transforme principalement du SMC verre et carbone et du BMC.

La transformation des SMC - BMC est réalisée par compression haute pression à chaud sur des presses de thermocompression et nécessite l'utilisation de moules en acier chromé, téflonés et régulés en température.

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 35 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|--|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint, avec inserts |
| Dimensions des pièces | Limitées à la taille des presses |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : -Fibres verre, carbone, aramide... Matrices : - Polyester insaturé - Vinylester |
| Pression de moulage | De 50 à 100 bars sur la matière |
| Température de moulage | De 120 à 170°C |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Epaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Moyennes |
| Types de structures possibles | Monolithiques |
| Taux de renfort | 20 à 40% en poids |
| Nature des outillages | Acier chromé téflonné |
| Moyen de mise en oeuvre | Presse de thermocompression |
| Coût d'investissement | Elevé (presse et outillage) |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Elevée - > 10 000 pièces/an/ moule |
| Série | Pièces industrielles de tous types. Pièces de carrosserie |
| Hygiène sécurité | Aspiration sur poste de moulage Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Aile de voiture, éléments de carrosserie, intérieur de hayon, pare-chocs, capotages divers, boucliers, lame de ressort AR, hayon, bac de roue de secours... (voir photo 37) |

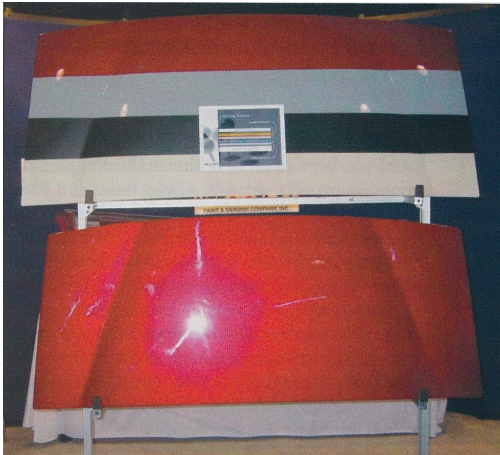
Tableau 35 - Principales caractéristiques du moulage par compression HP des MSC-BMC



Source : Médiplast

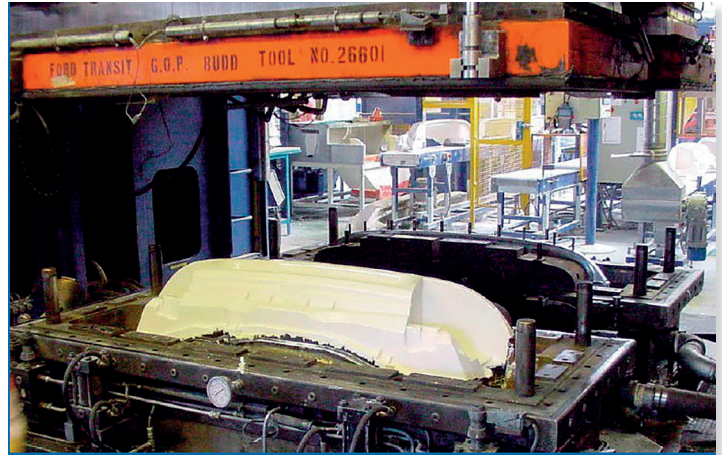
Photo 37 – Moulage d'un intérieur de hayon en SMC

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]



Source AOC

Photo 38 – Élément de carrosserie en SMC



Source : European Alliance

Photo 39 – Moulage d'un pare-chocs en SMC

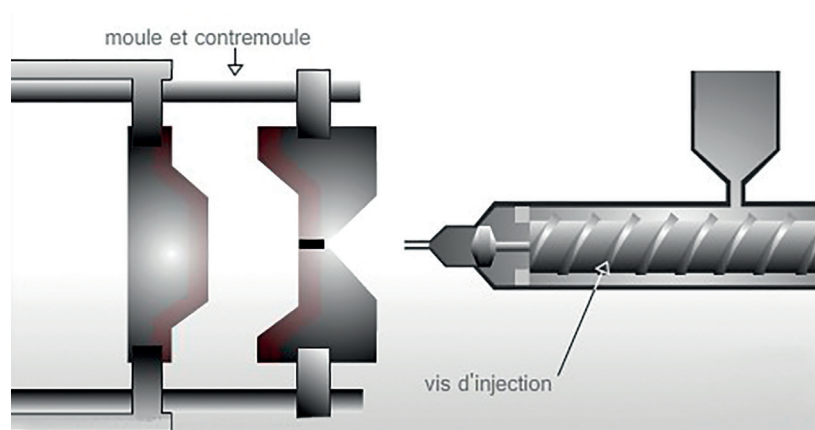


Source : Plasticcars

Photo 40 - Pièce automobile en SMC carbone

→ Le moulage par injection HP de BMC

Les BMC peuvent être transformés par injection HP à l'aide d'une presse à injection, sous des pressions de 150 à 180 bars, à grande vitesse dans un moule fermé et réglé en température entre 150 et 160 °C (voir figure 47).



Source : Compositec

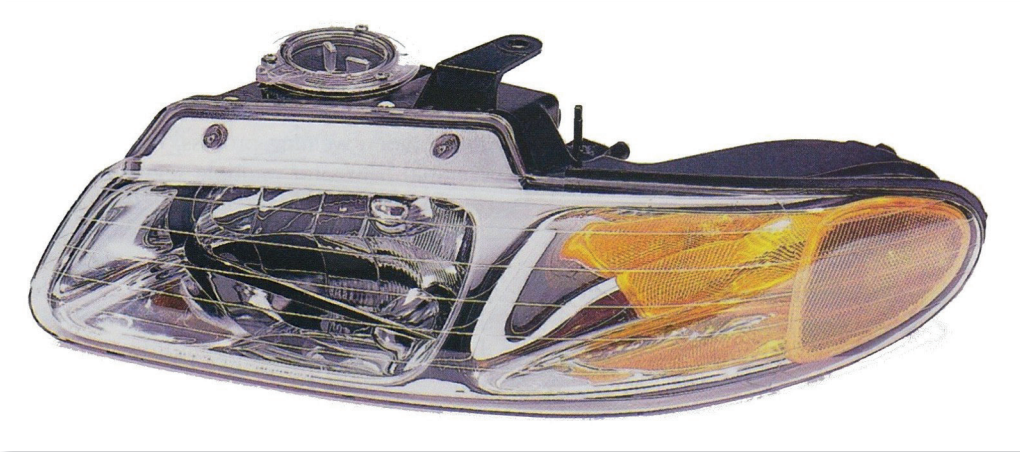
Figure 47 – Principe de l'injection de BMC

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 36 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint, avec inserts |
| Dimensions des pièces | Limitées à la taille des presses |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - Fibres verre, carbone, aramide... Matrices : - Polyester insaturé - Vinylester |
| Pression d'injection | De 150 à 180 bars sur la matière |
| Température de moulage | De 150 à 160°C |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Epaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Moyennes |
| Types de structures possibles | Monolithiques |
| Taux de renfort | 20 à 30% en poids |
| Nature des outillages | Acier chromé téflonné |
| Moyen de mise en œuvre | Presse d'injection |
| Coût d'investissement | Elevé (presse et outillage) |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Elevée - > 10 000 pièces/an/moule Cycles de 2 à 3 min |
| Série | Pièces industrielles de tous types. Pièces de carrosserie |
| Hygiène sécurité | Aspiration sur poste de moulage Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Aile de voiture, éléments de carrosserie, coque de phare (voir photo 41) |

Tableau 36 – Principales caractéristiques du moulage par injection de BMC

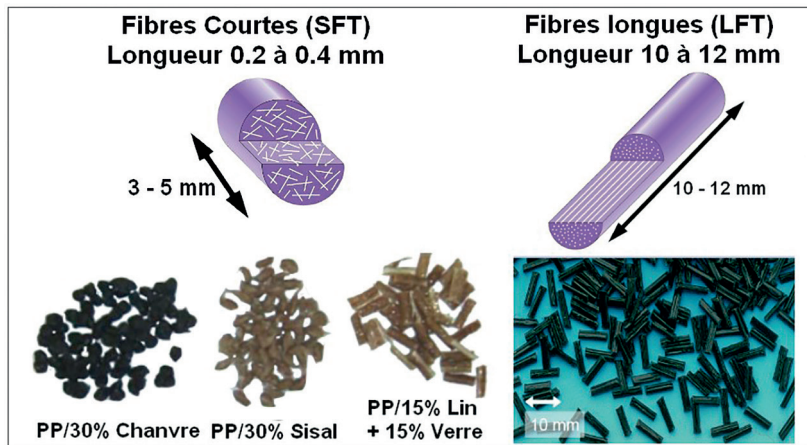


Source : Bulk Molding Compounds Inc

Photo 41 – Coque de phare en injection de BMC

→ Le moulage des thermoplastiques par injection HP

L'injection HP de thermoplastiques renforcés consiste à injecter dans un moule chauffé à une température généralement supérieure à 200°C, des granulés thermoplastiques renforcés de fibres de natures diverses, longues ou courtes (voir figure 48), sous des pressions d'environ 2 000 bars (Voir schéma de principe figure 49 et ligne d'injection photo 42).



Source : Cemef

Figure 48 – Granulés fibres courtes (PP+fibrés naturelles) et granulés fibres longues

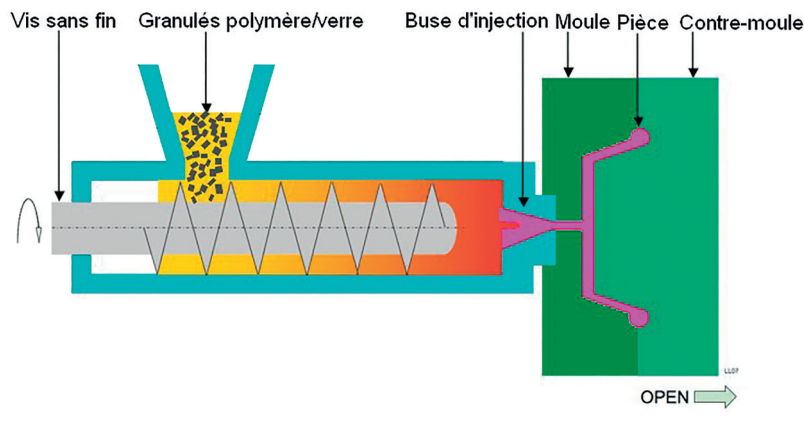
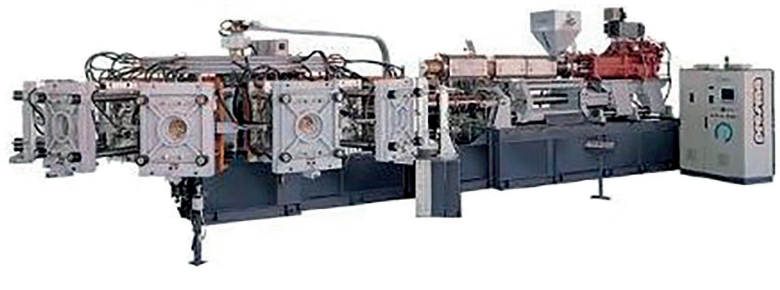


Figure 49 – Principe de l'injection HP de thermoplastiques



Source : Presma

Photo 42 – Ligne d'injection

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

Le tableau 37 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| | |
|------------------------------------|--|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint |
| Dimensions des pièces | Limitées à la taille des presses |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : - fibres verre, carbone, aramide, fibres naturelles... Polymères : - Polypropylène (PP) - Polyéthylène (PE) - Polyamide (PA) - Polystyrène (PS) - Polyéthylène téréphtalate (PET)... |
| Pression d'injection | 2 000 bars |
| Température d'injection | > 200°C |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Epaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Modérées à élevées selon la nature des fibres utilisées |
| Types de structures possibles | Monolithiques |
| Taux de renfort | 15 à 30% en poids |
| Nature des outillages | Acier chromé |
| Moyen de mise en œuvre | Presse injection HP |
| Coût d'investissement | Elevé Coût élevé de la maintenance des vis sans fin qui s'abrasent fortement au contact des fibres. |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Elevée - > 10 000 pièces/an/moule Cycle de 3 sec à 2 min |
| Série | Pièces industrielles de tous types. Pièces automobiles |
| Hygiène sécurité | Pas d'émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Pipe d'admission (photo 43), hayon, support de différentiel (voir photo 44), face avant (photo 45), optiques... |

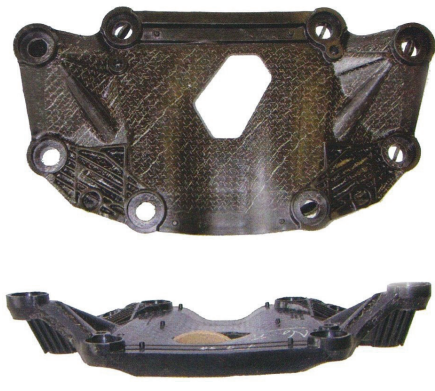
Tableau 37 – Principales caractéristiques du moulage par injection HP de thermoplastiques renforcés



Source: Dupont automotive

Photo 43 – Pipe d'admission Nissan V8 en Zytel Nylon

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]



Source : Quadrant Plastic composites

Photo 44 - Support différentiel Volvo en injection de GMT PP



Source : Cemef

Photo 45 - Face avant Renault Mégane II

→ Le moulage des composites thermoplastiques par compression

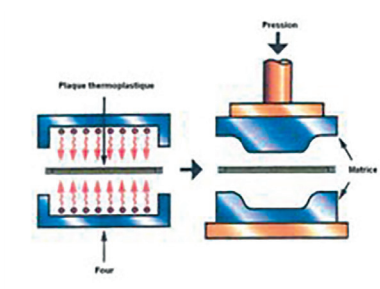
Dans le domaine de la compression des thermoplastiques, on parle généralement d'estampage dont les avantages pour le secteur automobile sont principalement :

- le temps de cycle très court (environ une minute),
- la possibilité de convertir un équipement déjà existant, utilisé auparavant pour emboutir des tôles.

L'estampage consiste à emboutir une tôle thermoplastique renforcée de fibres, préalablement ramollie par chauffage, à l'aide d'une presse réglée à 40°C.

Les matériaux généralement transformés par ce procédé, sont :

- les TRE (Thermoplastiques renforcés estampables) : plaques de fibres de verre imprégnées de polypropylène transformé à environ 200°C.
- les TPA (Thermoplastiques armés) : plaques de fibres de verre ou de carbone imprégnées d'une matrice thermoplastique, (PE, PET, PA, PU, PBT, PEEK, PPS....) transformée entre 200 et 300 °C selon le polymère utilisé.



Source : UIMM

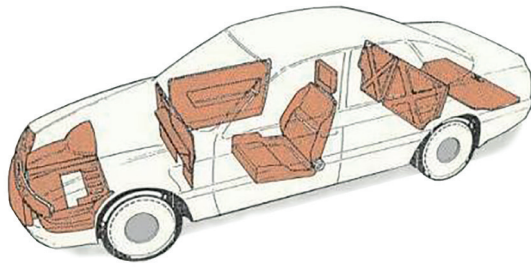
Figure 50 – Principe de l'estampage

| AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|---|--|
| Absence d'émanation de COV | Investissements importants : presse, moyen de chauffage, matrices... |
| Cycle court : environ une minute | |
| Possibilité de pièces épaisses et structurelles | Épaisseur uniforme |
| Deux faces d'aspect fini | État de surface médiocre |

6 [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]

La photo 46 nous montre la répartition des TRE dans une automobile.

Le tableau 38 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.



Source : Renault

Photo 46 - Répartition des TRE dans une automobile



Source : Compose Tools

Photo 47 – Triangle de suspension en TRE estampé et soudé simultanément

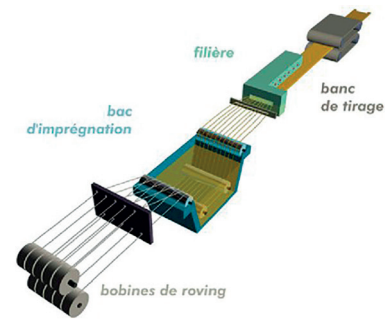
| | |
|------------------------------------|---|
| Formes possibles | Formes très complexes, avec ou sans plan de joint |
| Dimensions des pièces | Limitées aux dimensions des moyens de mise en pression |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | <p>Renforts :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fibres verre, carbone, aramide... <p>Polymères :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Polypropylène (PP) - Polyéthylène (PE) - Polyamide (PA) - Polystyrène (PS) - Polyéthylène téréphtalate (PET) - Poly Ether Ether Ketone (PEEK) - Polysulfone (PPS)..... |
| Pression mise en œuvre | De 20 à 150 bars |
| Aspect des pièces | 2 faces lisses Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Élevées (Pièces structurelles) |
| Types de structures possibles | Monolithiques |
| Taux de renfort | 20 à 40% en poids |
| Nature des outillages | Alu ou acier Régulé en température |
| Moyen de mise en œuvre | Consommable de mise sous-vide Pompe à vide Machine de thermoformage |
| Coût d'investissement | Modéré à élevé |
| Qualification de la main d'œuvre | Formée à Qualifiée |
| Cadence maximale | Elevée (cycle d'une minute) - De 500 à 5 000 pièces/an/moule |
| Série | Petites séries, pièces industrielles de tous types. Pièces de carrosserie |
| Hygiène sécurité | Pas d'émanations de COV Environnement propre |
| Utilisation du procédé | Absorbeurs de pare-chocs, faces avant de caisses, dossiers de sièges, carters, triangle de suspension (photo 47). |

Tableau 38 - Principales caractéristiques de l'estampage des thermoplastiques renforcés

→ D. LES PROCÉDÉS DE MOULAGE EN CONTINU

Dans cette catégorie de procédés, le plus utilisé dans l'industrie automobile reste, et de loin, la pultrusion. Aussi nous ne traiterons pas les autres procédés en continu dans ce document.

→ Le moulage par pultrusion



Source : Medioplast

Figure 51 – Principe de la pultrusion



Source : Medioplast

Photo 48 – Sortie de filière d'un profilé pultrudé

La pultrusion est un procédé mécanisé qui permet la fabrication en continu de profilés aux formes plus ou moins complexes.

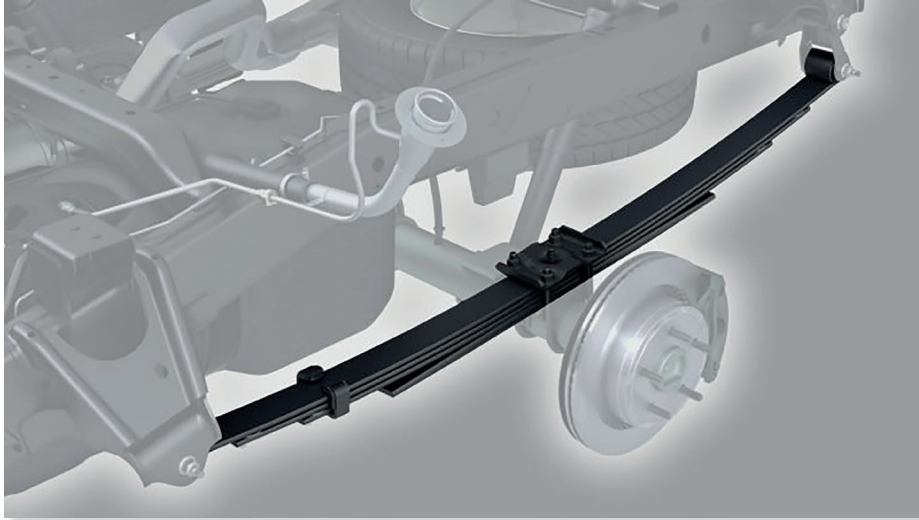
Les renforts, sous forme de fils préalablement imprégnés de résine par passage dans un bac d'imprégnation, sont étirés au travers d'une filière d'environ 1 m de long, chauffée de 100 à 120°C. A la sortie de la filière, le profilé est polymérisé et découpé à la longueur désirée (voir figure 51 et photo 48).

Le tableau 39 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce procédé.

| Formes possibles | Profilés simple à très complexes |
|------------------------------------|--|
| Dimensions des pièces | Largeur max < 1m - Longueur mini de production 5 000 m |
| Matériaux utilisés pour ce procédé | Renforts : Fibres verre, carbone, aramide... Matrices : Tous types de résines thermodurcissables |
| Aspect des pièces | Toutes les faces sont lisses - Épaisseur constante |
| Propriétés mécaniques | Élevées |
| Types de structures possibles | Monolithiques |
| Taux de renfort | 40 à 80% en poids |
| Nature des outillages | Filière en acier chromé |
| Moyen de mise en œuvre | Banc d'étirage de pultrusion |
| Coût d'investissement | Élevé |
| Qualification de la main d'œuvre | Qualifiée |
| Cadence maximale | Élevée - Vitesse de production : de 0.2 m/min à 3 m/min selon le profilé > 1000 pièces/an/ moule |
| Série | Grandes séries, profils industriels de tous types. Éléments de carrosserie |
| Hygiène sécurité | Émanations de COV pouvant être limitées |
| Utilisation du procédé | Fabrication d'éléments emboîtables pour la réalisation de plancher de camion, d'éléments de caisses de camion isotherme, de cornières de renfort, de renforts de pare-chocs, des lames de ressorts (photo 49), d'arbres de transmission, profilé carbone pultrudé (photo 50) |

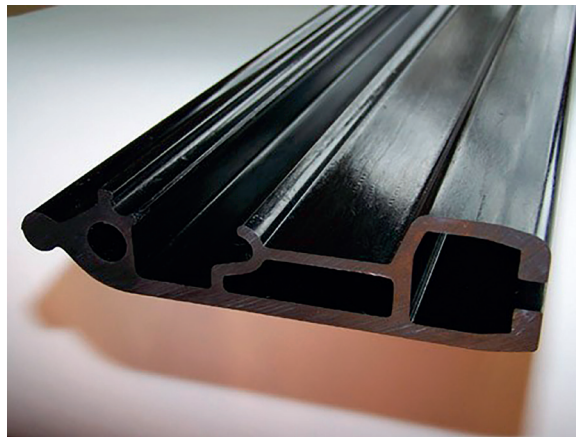
Tableau 39 - Principales caractéristiques du moulage par pultrusion

6 — [LA MISE EN ŒUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES]



Source : Suzuki

Photo 49 - Lame de ressort



Source : Secar Technologie

Photo 50 – Profilé carbone pultrudé

Nota :

Les procédés de fabrication de pièces en matériaux composites sont nombreux et variés. Il existe des procédés peu utilisés dans l'automobile que nous avons volontairement choisi de ne pas aborder dans ce document.

Nous n'avons décrit que les principaux procédés qui généralement servent de base aux développements de nouvelles technologies automobiles.

7 — [LES ENDOMMAGEMENTS ET LES LIMITES DES COMPOSITES] —

→ A. LES DÉFAUTS INTERNES

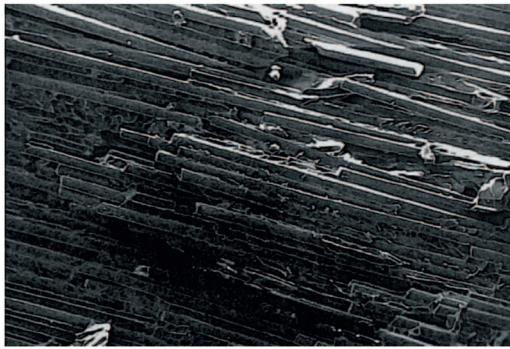
Les principales dégradations des matériaux composites proviennent des actions mécaniques qu'ils subissent. En effet, le réseau d'interfaces structurées des stratifiés (surtout à fibre longue) est particulièrement exposé aux dégradations car ces interfaces sont situées entre des constituants ayant des propriétés mécaniques différentes.

Lors de contraintes, les endommagements ont ainsi tendance à suivre ce réseau de fibres. Des phénomènes différents peuvent aussi se produire dans les plis de ce réseau en fonction du sens de sollicitation de l'effort : parallèle aux fibres ou non.

→ Le contact

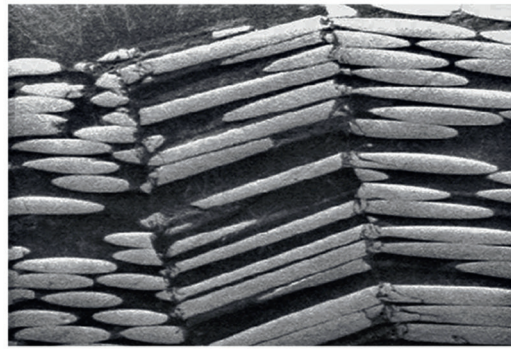
La rupture des fibres :

La rupture des fibres survient par la force d'un impact ou par un effort conséquent. Chaque fibre se brise une à une face à ces efforts. Le stratifié perd très rapidement l'essentiel de sa rigidité dans la direction concernée.



Source : Zhao et Takeda, 2000

Figure 52 - Rupture fibre en traction



Source : Yerramalli et Waas, 2003

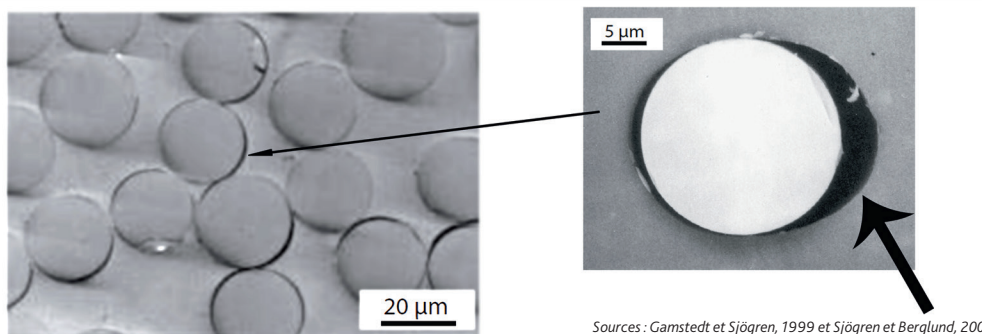
Figure 53 - Rupture fibre en compression

→ Dégradations physiques suite à des sollicitations non parallèles aux fibres

Ces dégradations peuvent apparaître dans un premier temps suite à des sollicitations perpendiculaires ou de cisaillement mais s'accroissent progressivement avec l'intensité de la contrainte. Ces phénomènes peuvent être localisés au niveau des fibres ou au niveau des plis.

Endommagements au niveau des fibres :

Ils sont presque indétectables, mais ne posent pas de réels problèmes sauf si les contraintes continuent à augmenter. Des phénomènes plus graves pourront apparaître.



Sources : Gamstedt et Sjögren, 1999 et Sjögren et Berglund, 2000

Figure 54 - Décohésion entre la fibre et la matrice

7 — [LES ENDOMMAGEMENTS ET LES LIMITES DES COMPOSITES] —

Suite à une trop forte sollicitation, les constituants matrice et fibre se désolidarisent, lesquelles désolidarisations sont facilitées par des concentrations de contrainte affectant l'interface. Ce défaut va s'accroître progressivement sans pour autant ruiner le matériau. On parle alors de phénomène diffus.

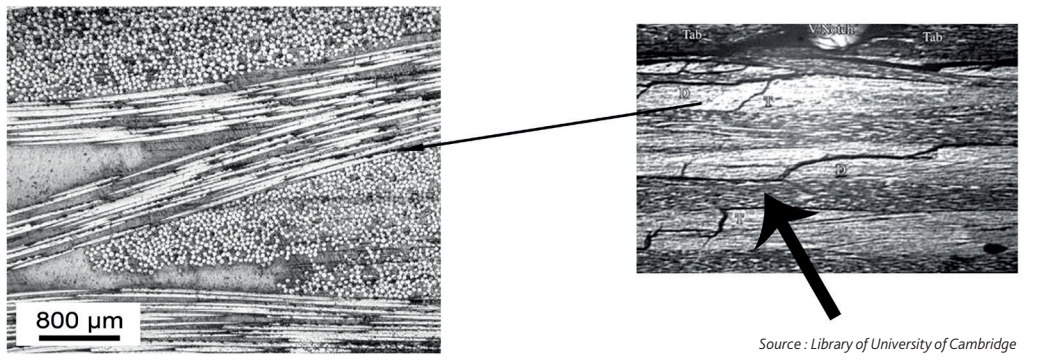


Figure 55 - Microdélaminage (délaminage diffus)

Il s'agit de minuscules fissures parallèles au plan du stratifié. Plus l'angle de croisement des plis est important, plus ces microfissures seront nombreuses.

Endommagements au niveau des plis :

Le phénomène des microfissures, vu précédemment, peut croître sous l'effet de trop fortes pressions et provoquer ainsi des dégradations plus étendues.

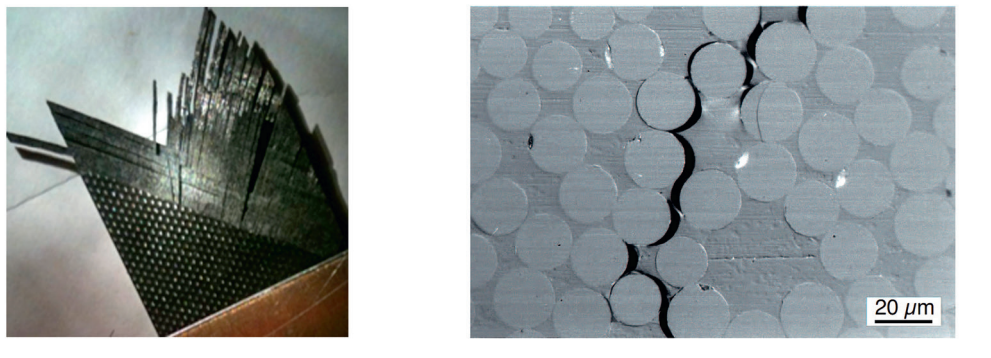
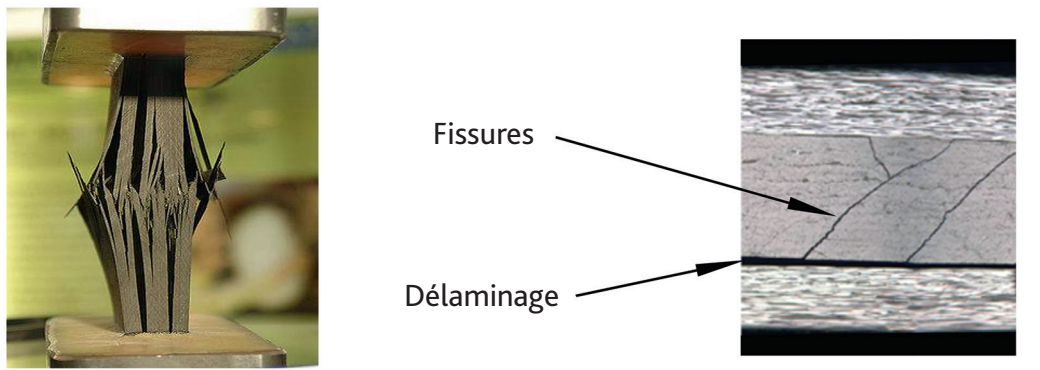


Figure 56 - Fissurations transverses

Ce phénomène est très fréquent aux plis à 90° (plis perpendiculaires au chargement) d'où le nom de fissuration transverse. Tant que les plis à 0° restent intacts, le stratifié continue à supporter la charge.

Mais le plus souvent une redistribution du phénomène vers les plis encore intacts mène inexorablement à la ruine du matériau.

7 [LES ENDOMMAGEMENTS ET LES LIMITES DES COMPOSITES]



Sources : IMA Dresden + Library of Iowa State University

Figure 57 - Délaminage

Les fissures transverses ont tendance à poursuivre leur chemin jusqu'à chaque changement de plis et c'est à cette jonction que le décollement entre les plis opère : c'est le délaminage. Ce décollement important est accéléré par le microdélaminage, lequel peut fragiliser les interfaces.

La ruine du stratifié :

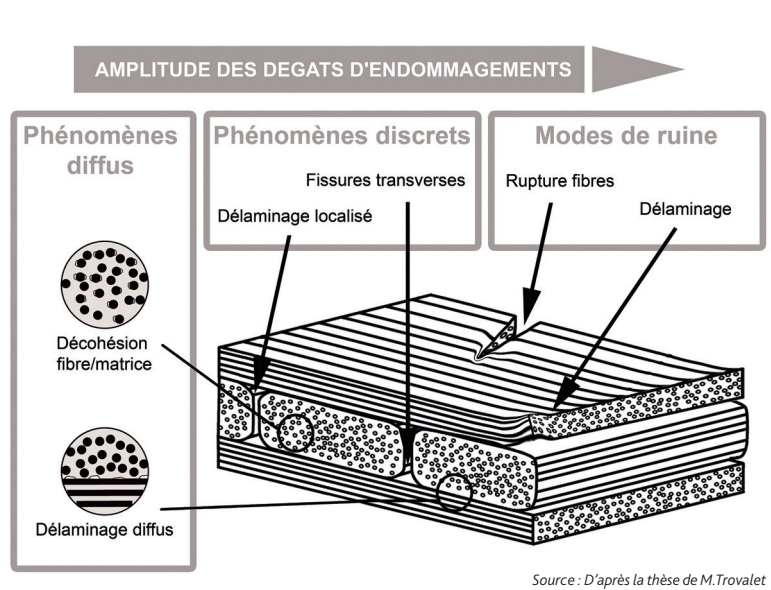
La ruine du stratifié est la cause de deux principaux endommagements : la rupture des fibres et le délaminage.

La rupture de fibre est souvent la conséquence directe d'un choc. C'est le type d'endommagements auquel nous sommes confrontés en réparation automobile.

Le délaminage est souvent celui qui pose le plus de soucis en fabrication, car il dépend essentiellement de la conception d'origine du stratifié. Il apparaît le plus souvent aux endroits sensibles de la pièce (trous pour passages divers, raccords entre stratifiés différents, etc.).

En résumé :

La figure ci-dessous récapitule les différents phénomènes physiques susceptibles de se produire dans un stratifié, suite à des dégradations mécaniques.



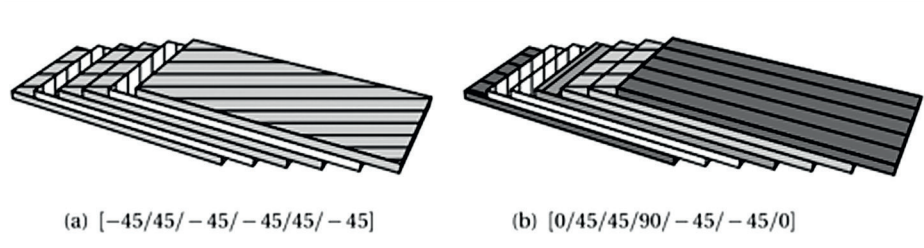
Source : D'après la thèse de M.Trovalet

Figure 58 - Phénoménologie des dégradations

7 — [LES ENDOMMAGEMENTS ET LES LIMITES DES COMPOSITES] —

→ B. LES EFFETS À PRENDRE EN COMPTE SUR LE COMPORTEMENT

Le comportement d'un composite est la relation entre les efforts appliqués et la déformation du matériau. Les composites peuvent être ruinés par des dégradations telles la rupture de fibre ou le délaminage. Ces endommagements apparaissant suite à de très fortes contraintes, il est nécessaire de faire attention au sens des fibres.



Source : Sciences de l'ingénieur

Figure 59 - Renforts

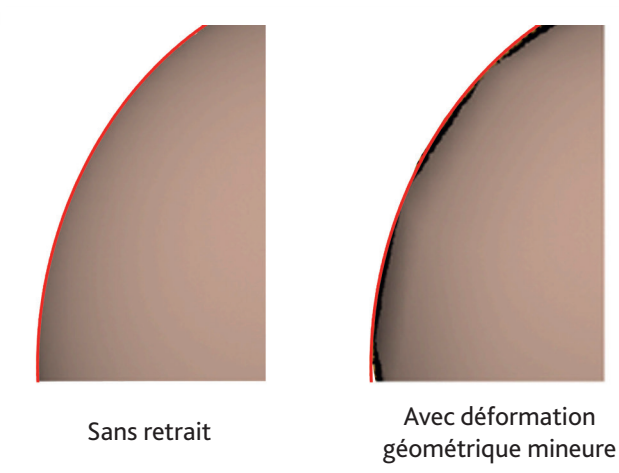
En jouant sur l'ordre et l'orientation des plis, il est possible d'adapter les propriétés mécaniques du stratifié face à ces sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est la plus utile.

A l'échelle de la structure, les comportements mécaniques ainsi obtenus peuvent être très complexes. Idéalement, les concepteurs prennent leurs précautions en disposant des renforts dans toutes les directions du plan (tous les 45°). Ceci afin d'assurer un minimum de robustesse vis-à-vis de contraintes imprévues (pièces de compétition).

→ C. LES DÉFAUTS DE SURFACE

De nombreux défauts de surface peuvent apparaître lors de la fabrication des composites. En voici les principaux :

Le retrait des composites :



Le retrait des composites est un défaut interne qui aboutit le plus souvent à un défaut de surface. Lors de la polymérisation de la matrice, le retrait de la résine polymérisée est causé par le phénomène de dilatation différentielle lors de la polymérisation, lequel dépend fortement des conditions de mise en œuvre. Il implique ainsi inévitablement un retrait de la résine polymérisée. Des charges et des additifs sont souvent incorporés dans un matériau composite pour diminuer ce phénomène de retrait.

Figure 60 - Le retrait des composites

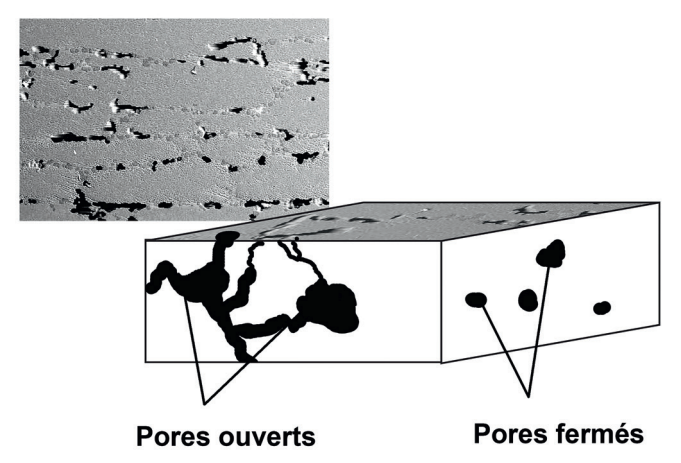


Figure 61 - Les porosités

Les porosités :

Les porosités peuvent être de deux sortes : ouvertes ou fermées.

Les porosités ouvertes débouchent sur la surface du matériau tandis que les porosités fermées sont isolées à l'intérieur. Ce sont des microcavités dues à l'emprisonnement de gaz (air, solvants...) dans la matrice d'un stratifié, qui réduisent les propriétés mécaniques du matériau.

Photo : Yohann LEDRU

L'écaillage :

Il s'agit de défauts d'usinage constatés en sortie de fabrication des pièces.

Les traces d'outils sont des marques laissées par un outillage en appui lors de la fabrication ou de l'assemblage de la pièce, tandis que les rayures sont des défauts longilignes occasionnés par un objet en mouvement.

Photo : Boatdesign

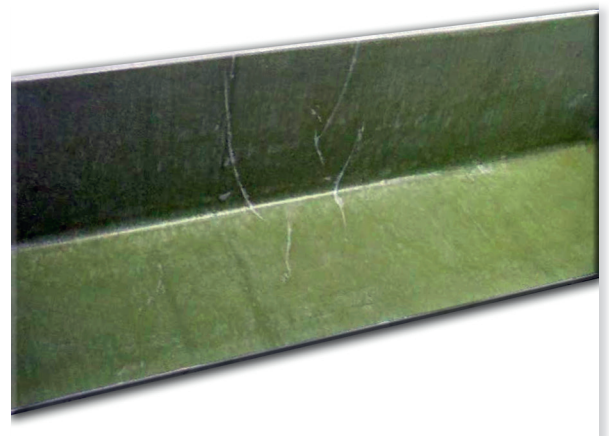


Figure 63 - Les rayures ou traces d'outil

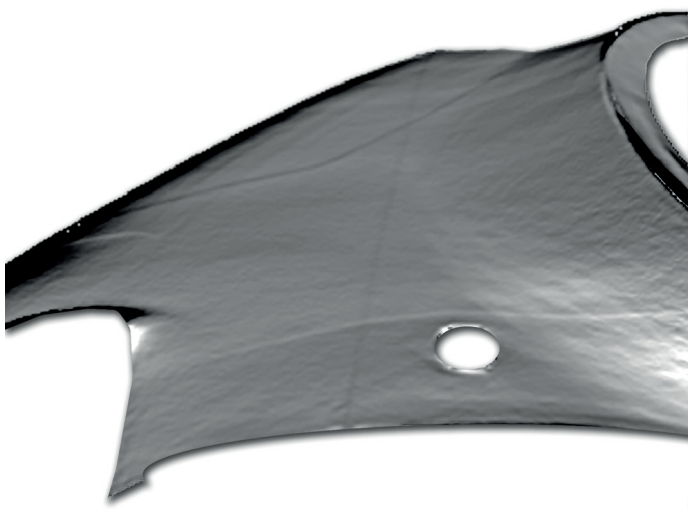


Figure 64 - Les vaguelettes ou télégraphing

Les vaguelettes ou télégraphing :

Les vaguelettes sont souvent causées par des défauts de moules ou par la nature même du renfort.

Le télégraphing est un phénomène lié au taux d'humidité du nida lors de sa mise en œuvre. L'exothermie chauffe l'eau contenue dans la maille issue de l'humidité, qui se dilate puis se condense lors du refroidissement, créant l'effondrement du renfort au dessus de la maille.

Photo : Techlab

7 — [LES ENDOMMAGEMENTS ET LES LIMITES DES COMPOSITES] —



Figure 65 - Les plissures

Les plissures :

Ce défaut est la conséquence directe d'un mauvais assemblage donnant lieu à un surplus de matière localisé sur la pièce.

Photo : Techniques de l'ingénieur - Ampittec

La différence de couleur :

La différence de teinte peut apparaître dans certains cas de retouche de la pièce.

Elle peut aussi apparaître suite à une réaction chimique du matériau lors d'une oxydation (contact avec l'oxygène), entraînant une décoloration.



Photo : PCM innovation

Figure 66 - La différence de couleur

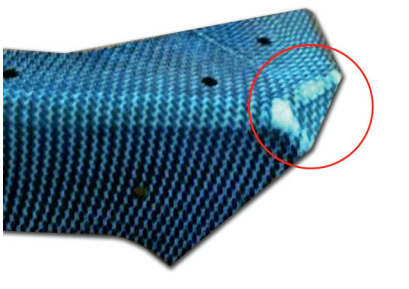


Figure 67 - L'excès de résine

L'excès de résine :

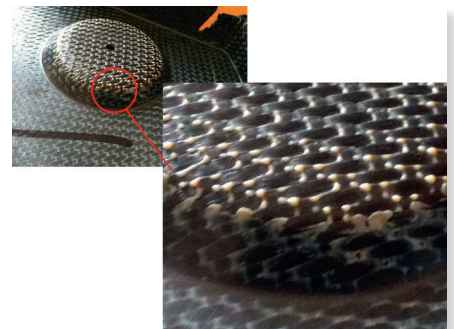
L'excès de résine laisse apparaître une tache de couleur différente, légèrement plus blanchâtre, du fait de la surabondance de produit sur une zone localisée.

Photo : Mécastyle

Le manque de résine (figure 68) :

Le manque de résine ou « fibre sèche » est une zone qui laisse apparaître les fibres du composite à l'air libre.

Un excès de résine peut en être aussi la cause. En effet, la résine mise en surabondance peut fluier et se concentrer sur une autre zone provoquant un manque au départ de ce glissement.



Photos : Mécastyle

Figure 68 - Le manque de résine

7 [LES ENDOMMAGEMENTS ET LES LIMITES DES COMPOSITES]

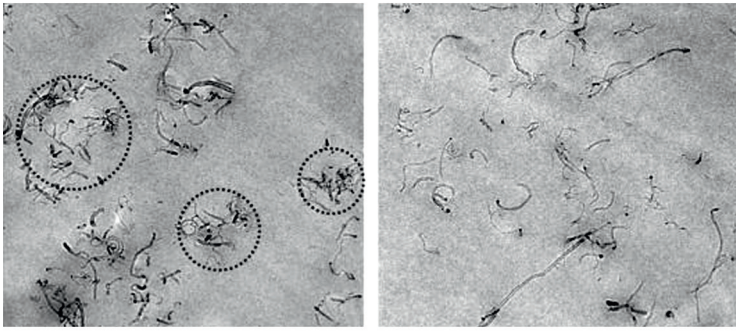


Figure 69 - Pollution de surface

La pollution de surface :

De multiples et diverses impuretés peuvent se trouver à la surface d'un composite tels que des poussières ou autres corps étrangers.

La pollution de surface peut être aussi causée par les fibres des textiles qui dépassent de la matrice.

Photo : Techniques de l'ingénieur - Ampittec

L'absence de gaufrage :

Ce défaut de surface est souvent localisé. Il se traduit par une absence totale de profondeur et de structure géométrique laissant apparaître une surface plus lisse par rapport au reste de la pièce.

Photo : Techniques de l'ingénieur - Ampittec

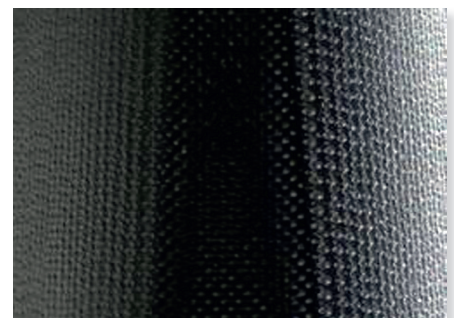


Figure 70 - L'absence de gaufrage



Figure 71 - Prise d'eau

La prise d'eau :

Une prise d'eau est une infiltration d'eau dans les fibres ou l'âme d'un composite. Un stratifié n'est pas un matériau totalement imperméable, il présente toujours une absorption d'eau et les problèmes risquent d'apparaître si cette eau rencontre des vides (bulles d'air, parties mal imprégnées...). Le volume de liquide contenu dans les cavités augmente alors jusqu'à créer une pression capable d'engendrer des cloques. On parle aussi d'osmose.

Photo : Pre-com.net

Les impacts :

Suite à un choc, la longueur, la largeur et la profondeur des dégâts seront propres à l'objet qui est venu impacté.

Les composites étant de nos jours beaucoup plus présents sur un véhicule, ils sont dès lors plus soumis à des chocs.

C'est ce type de dégâts auxquels nous sommes le plus souvent confrontés en réparation automobile.

Photos : Caradisiac.com



Figure 72 - Les impacts

- Automotives Composites. 2nd édition. Ray Publishing Inc. 2006
- Conception de pièces mécaniques en plastique et composite. Alain Dessarthe. Edition Cetim. 2005
- La fibre de verre. Vetrotex. 1991
- Les matériaux composites. Tomes 1 et 2. Jean Weiss et Claude Bord. Edition du Cetim. 1983
- Les applications industrielles des matériaux composites. Tomes 1 et 2. Philippe Cognard. Edition du Moniteur. 1989
- Les composites à matrices thermoplastiques TPFL. Shappe Techniques. 2001
- Les publications JEC. Composites Magazine. 2014
- Matériaux composites. Daniel Gay. Edition Hermès. 1997
- Matières plastiques. Structures, propriétés, mise en oeuvre, normalisation – JP Trotignon, J Verdu, A Dobraczynsky, M Piperaud. Edition Nathan. 2002
- Polyesters insaturés. Guide d'application Cray Valley. 1998
- Solutions composites. Maurice Reyne. Edition JEC Publications. 2006
- Transformation des matériaux composites. Procédés industriels grande série, « Transformation du SMC ». Guy Zanella. Publication Vetrotex. 1994
- Transformation des matériaux composites. Procédés industriels grande série, « Injection des BMC et ZMC ». Guy Zanella. Publication Vetrotex. 1994



[SIÈGE NATIONAL]

→ ANFA
01.41.14.16.18
www.anfa-auto.fr

[DÉLÉGATIONS RÉGIONALES]

→ ANFA Aquitaine, Poitou-Charentes
05 56 85 44 66
bordeaux@anfa-auto.fr

→ ANFA Auvergne, Limousin
04 43 76 10 50
clermont@anfa-auto.fr

→ ANFA Bretagne, Pays-de-la-Loire
02 22 74 14 80
rennes@anfa-auto.fr

→ ANFA Centre, Basse-Normandie,
Haute-Normandie
02 18 84 23 63
orleans@anfa-auto.fr

→ ANFA Franche-Comté, Bourgogne
03 70 72 12 45
besancon@anfa-auto.fr

→ ANFA Île-de-France
01 41 14 13 07
sevres@anfa-auto.fr

→ ANFA Languedoc-Roussillon,
Midi-Pyrénées
04 30 92 18 53
nimes@anfa-auto.fr

→ ANFA Lorraine, Alsace,
Champagne-Ardenne,
03 55 35 10 70
metz@anfa-auto.fr

→ ANFA Picardie,
Nord-Pas-de-Calais,
03 64 90 12 60
stquentin@anfa-auto.fr

→ ANFA Provence
Alpes-Côte-d'Azur, Corse
04 86 76 15 70
marseille@anfa-auto.fr

→ ANFA Rhône-Alpes
04 72 01 43 93
lyon@anfa-auto.fr