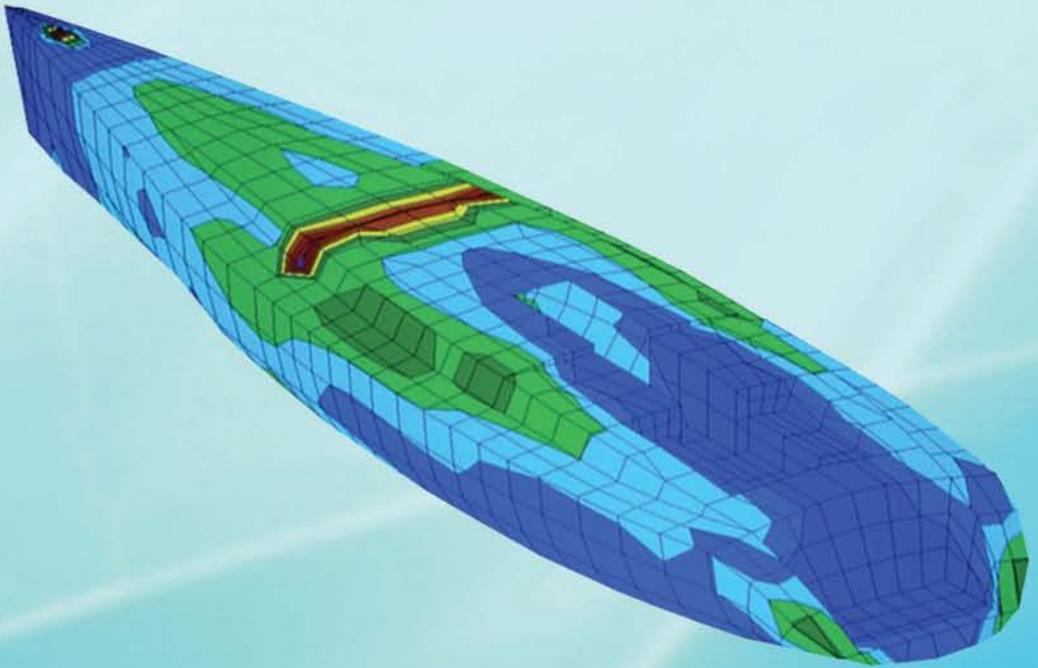


Jean-Marie Berthelot

Matériaux composites

5^e édition

Comportement mécanique et analyse des structures



Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Mise en œuvre et architecture des matériaux composites

1. ■ Introduction

L'objectif de ce chapitre n'est pas de faire une étude approfondie de la technologie de mise en œuvre des matériaux composites. Il se propose simplement de dégager les principes de différents processus de mise en œuvre, et de constituer une introduction à l'étude du comportement mécanique des matériaux composites.

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée *stratification*, conduisant à l'élaboration de *stratifiés*, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites.

2. ■ Mise en œuvre des matériaux composites

2.1. ■ Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

2.1.1. Moulage au contact (figure 3.1)

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée « *gel coat* ».

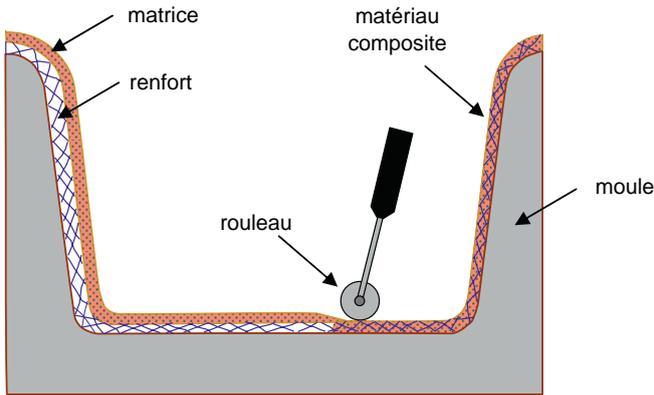


Figure 3.1. Principe du moulage au contact.

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1) Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.

2) Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.

3) Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.

4) Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.

5) Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).

6) La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).

7) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

2.1.2. Moulage par projection simultanée (figure 3.2)

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'en-

semble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

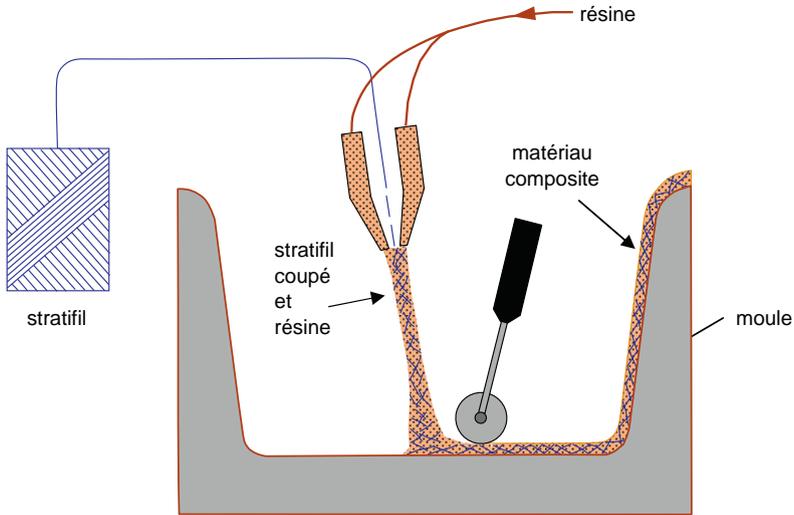


Figure 3.2. Principe du moulage par projection simultanée.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques.

2.2. Moulage sous vide (figure 3.3)

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes.

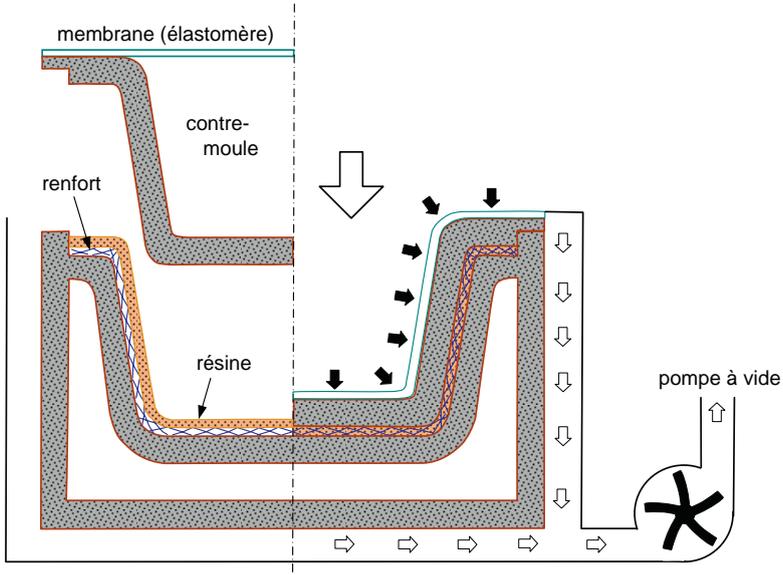


Figure 3.3. Moulage sous vide.

2.3. Moulage par compression

2.3.1. Moulage par injection de résine (figure 3.4)

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

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

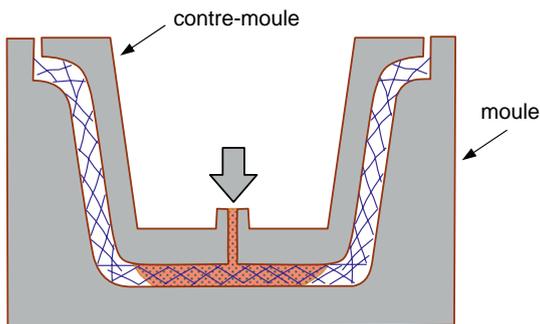


Figure 3.4. Moulage par injection de résine.

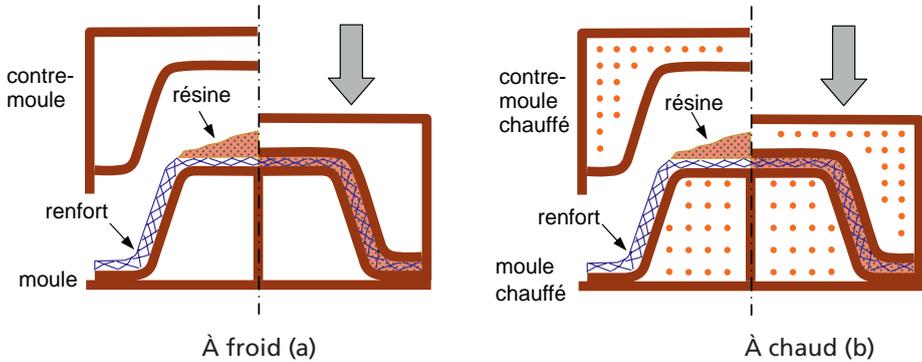


Figure 3.5. Principe du moulage par compression.

2.3.2. Moulage par compression à froid (figure 3.5a)

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.

2.3.3. Moulage par compression à chaud (figure 3.5b)

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.

Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage

est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule.

2.3.4. Moulage par injection (figure 3.6)

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.).

Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé « plastiques renforcés » que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries.

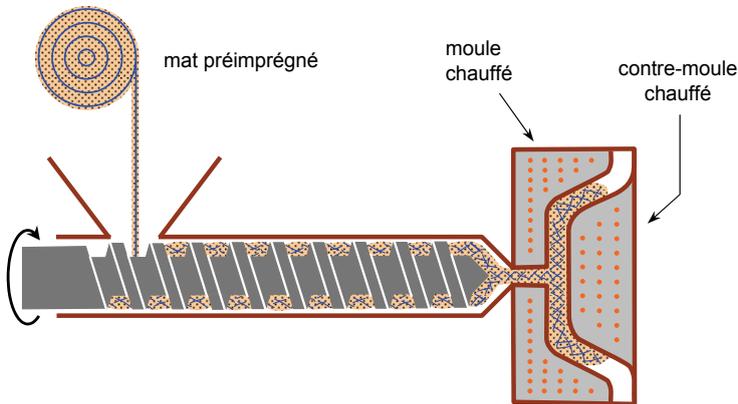


Figure 3.6. Moulage par injection.

2.4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwichs (figure 3.7), de panneaux ondulés pour toitures (figure 3.8), plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).

2. Une phase de mise en forme.

3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).

4. Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de la fabrication de plaques planes (figure 3.7), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (figure 3.8), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel.

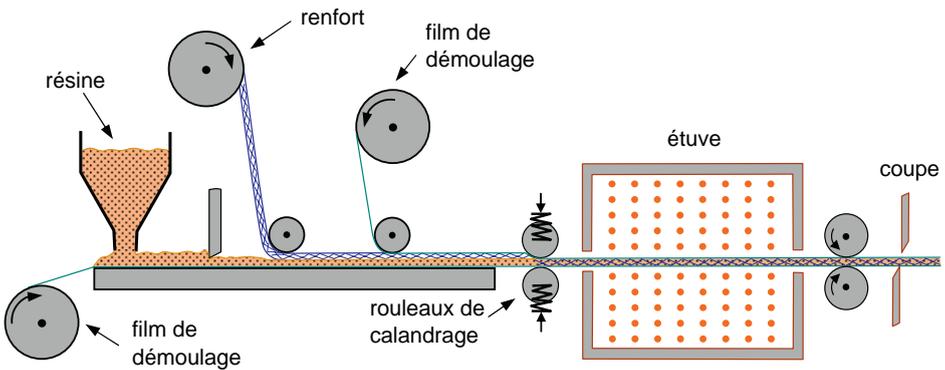


Figure 3.7. Moulage en continu de plaques.

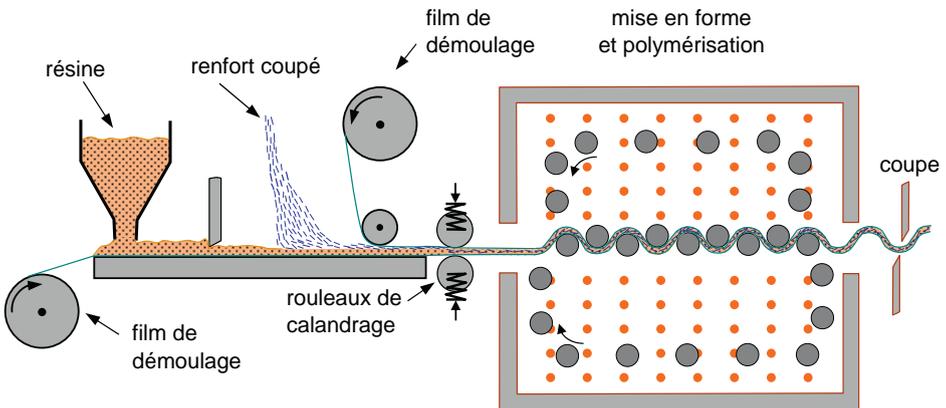


Figure 3.8. Moulage en continu de panneaux ondulés.

2.5. Moulage par pultrusion

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

Dans cette technique (figure 3.9), les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine.

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.

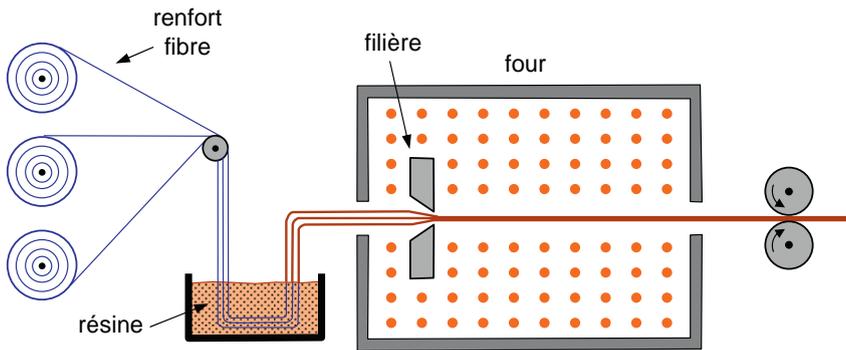


Figure 3.9. Moulage par pultrusion.

2.6. Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (figure 3.10) de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibres coupées ou stratifil coupé ;
- la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en

résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.

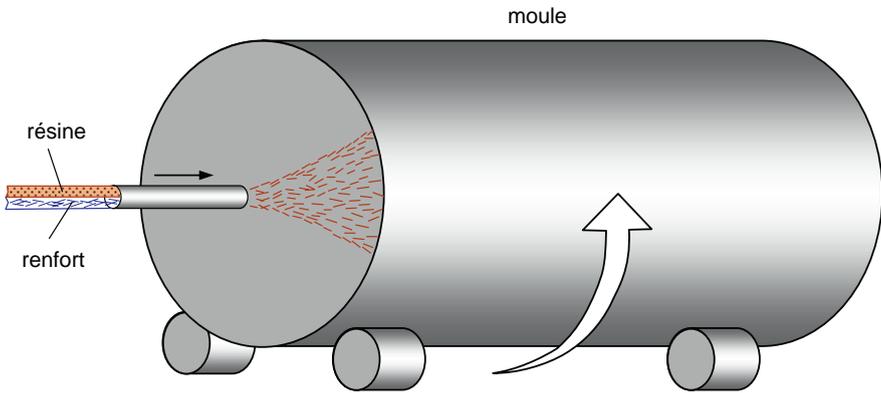


Figure 3.10. Moulage par centrifugation.

2.7. Moulage par enroulement filamenteux

2.7.1. Principe

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important.

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire.

2.7.2. Enroulement circonférentiel (figure 3.11)

Le bobinage est effectué à 90° par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin.

Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.

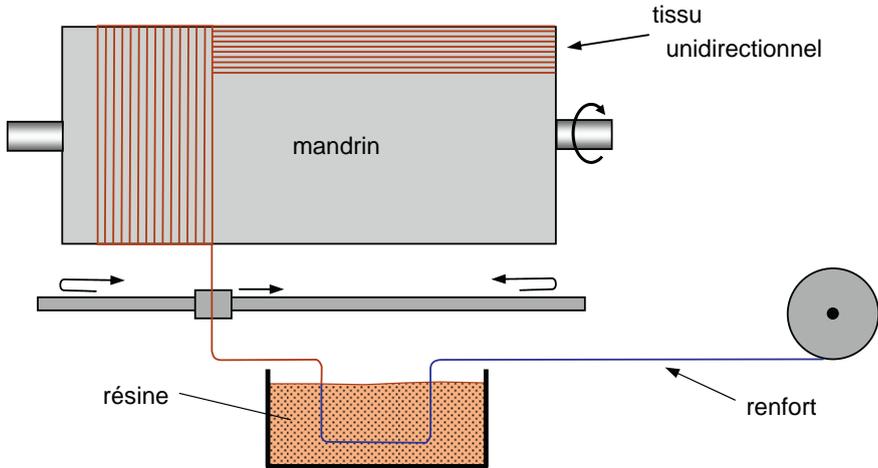


Figure 3.11. Principe de l'enroulement circonférentiel.

2.7.3. Enroulement hélicoïdal

1. Enroulement discontinu

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fils par rapport à la rotation du mandrin (figure 3.12). La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

2. Enroulement continu

L'enroulement continu (figure 3.13) permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

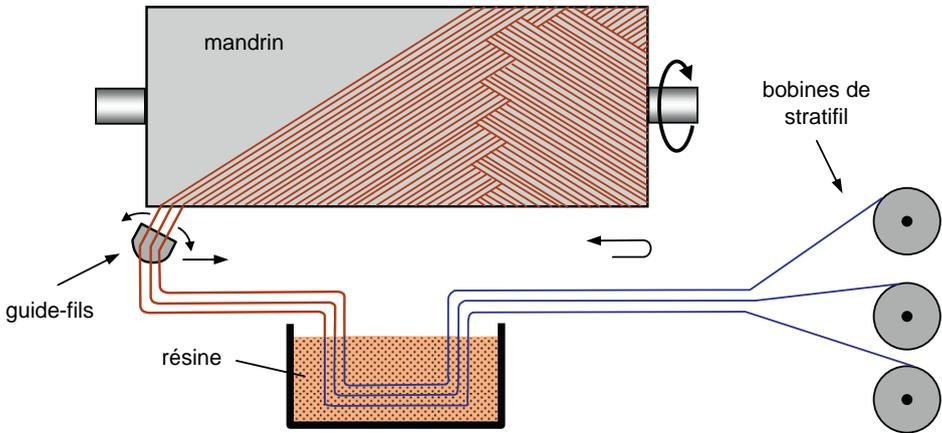


Figure 3.12. Principe de l'enroulement hélicoïdal.

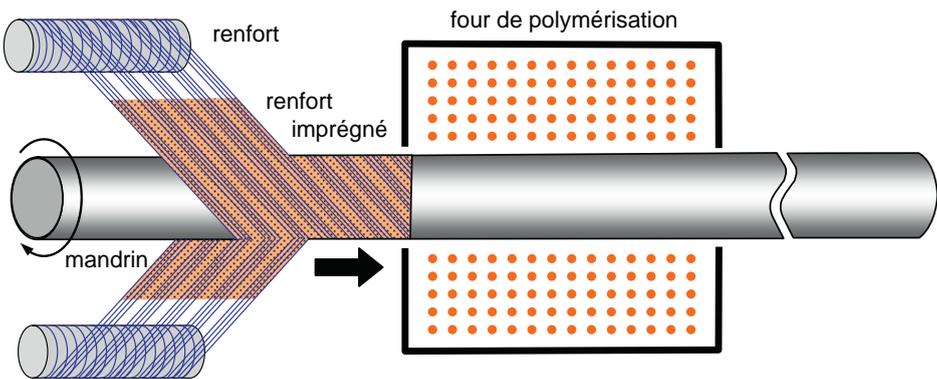


Figure 3.13. Enroulement hélicoïdal continu.

2.7.4. Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement (figure 3.14). Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.

2.7.5. Mandrins

Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage. Ils peuvent être :

- en métal, en bois, etc., monobloc ou en plusieurs éléments démontables ;

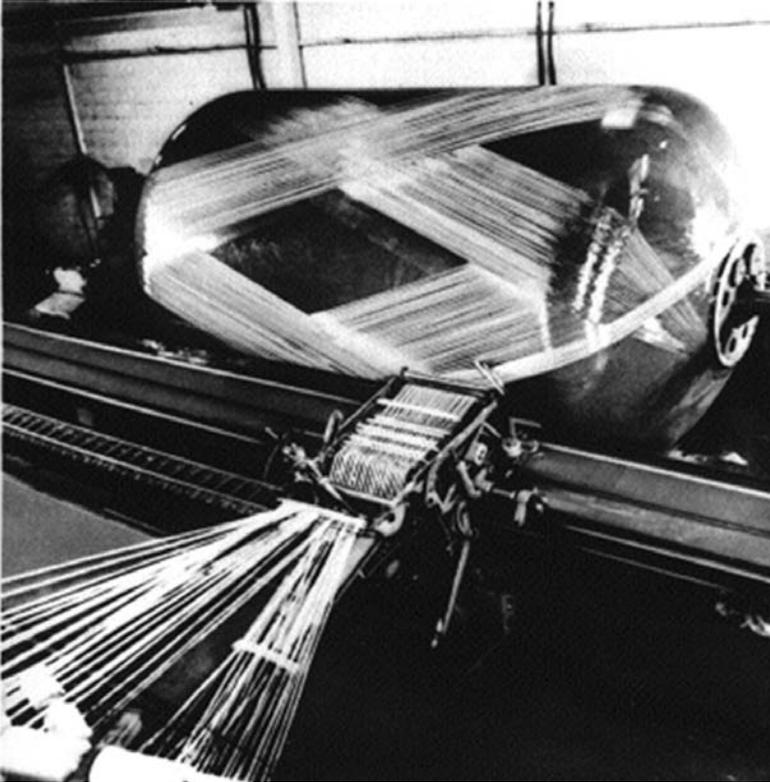


Figure 3.14. Enroulement polaire (documentation Vetrotex).

- en matériau à bas point de fusion ;
- en matériau soluble : par exemple grains de sable agglomérés dans un liant soluble dans l'eau ;
- en élastomère gonflable.

2.7.6. Applications

Les applications de l'enroulement filamentaire ont été dégagées dans les paragraphes précédents. D'une manière générale, ce processus de mise en œuvre est utilisé pour fabriquer des pièces ayant une symétrie de révolution : tuyaux, tubes, réservoirs, bouteilles de gaz, enveloppes cylindriques, etc. Des pièces de grandes dimensions peuvent être réalisées : conteneurs, silos, etc. Les dimensions des pièces sont limitées par le type de machine utilisée. L'intérêt de l'enroulement filamentaire réside également dans la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

Le procédé d'enroulement filamentaire est également applicable à des pièces sans symétrie de révolution : pales d'hélicoptères et de turbines, réservoirs à sections rectangulaires, etc.

3. ■ Utilisation de demi-produits

3.1. Introduction

La mise en œuvre de demi-produits (*préimprégnés, compounds*) fait appel aux mêmes techniques que le moulage (paragraphe 2) à partir de fils ou tissus, dont l'imprégnation par la résine est effectuée au moment de la mise en œuvre. Nous en avons séparé la présentation, compte tenu du caractère propre de ces demi-produits : facilité de manipulation, possibilité d'automatisation avancée des procédés de mise en œuvre à partir de ces produits, etc. Il est ainsi concevable de penser que l'utilisation et le développement de préimprégnés et compounds de divers types, associés à une conception assistée par ordinateur et à une robotisation, permettront de pénétrer de plus en plus les marchés industriels : construction automobile, construction navale, armement, etc.

3.2. Préimprégnés

3.2.1. Principe

Les préimprégnés (en anglais : les « *prepregs* » de *pre-impregnated*) sont des produits vendus sous forme de stratifils, rubans, tissus, etc., imprégnés de résine généralement dissoute dans un solvant.

Les résines peuvent être phénoliques, des polyesters, des résines époxydes, des polyimides, etc. Le pourcentage en volume de fibres est élevé (50 à 80 %) de manière à obtenir des composites à hautes performances mécaniques.

Le stratifil imprégné ou « *stratipreg* » (désignation de Vetrotex-Saint Gobain dans le cas de fibres de verre) est principalement destiné à l'enroulement filamentaire. Les tissus imprégnés sont généralement minces (de l'ordre de 1/10 mm), et par conséquent de faible masse surfacique : 100 à 300 g/m². Toutefois, pour les besoins de la construction navale, certains préimprégnés épais ont été mis au point pour simplifier la mise en œuvre.

3.2.2. Élaboration

La fabrication des préimprégnés se fait sur une machine verticale ou horizontale, suivant le schéma de principe de la figure 3.15. Le fil ou tissu est déroulé à vitesse lente (1 à 10 m/min), et passe dans un bac contenant une résine d'imprégnation diluée dans un solvant. À la sortie, des racleurs et des rouleaux essoreurs éliminent l'excès de résine. En effet, nous avons indiqué qu'un des intérêts des préimprégnés est d'être à faible proportion de résine. Le fil ou tissu imprégné passe ensuite dans un four, où la plus grande partie du solvant s'évapore, et où s'amorce un début de polymérisation. À la sortie du four, le préimprégné est refroidi par ventilation, de manière à stopper la polymérisation qui doit rester inachevée. Le tissu est ensuite :

- soit enroulé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en rouleau ;

– soit coupé et empilé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en plaques.

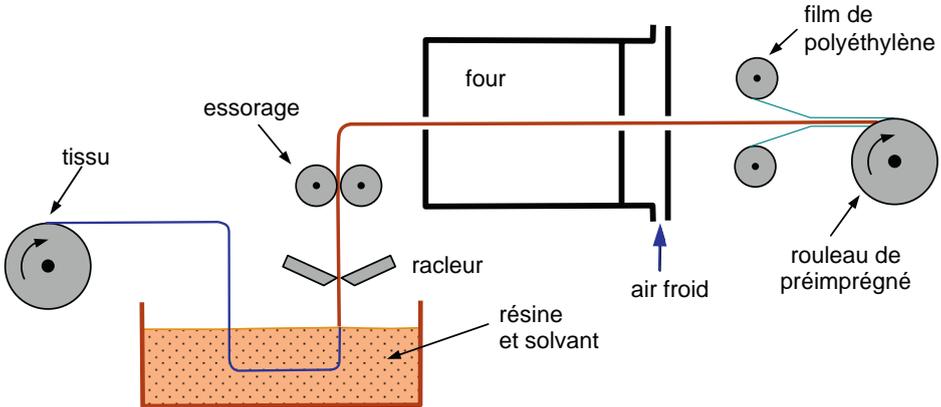


Figure 3.15. Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné.

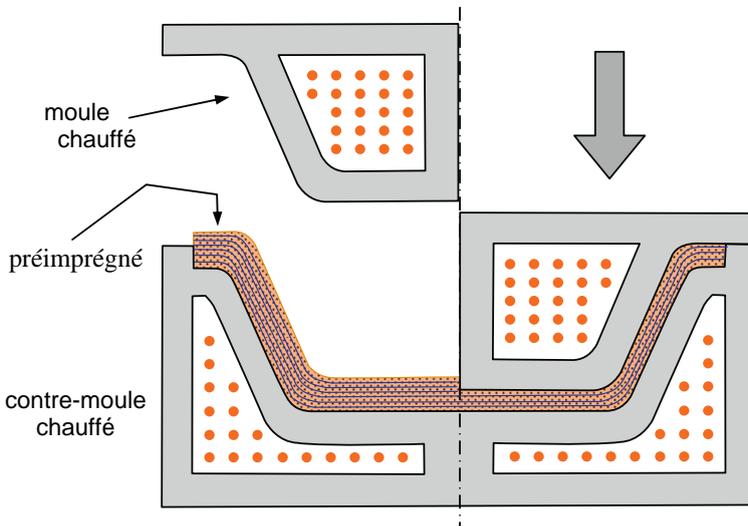


Figure 3.16. Moulage par compression à partir d'un préimprégné.

3.2.3. Intérêt des préimprégnés

Les avantages essentiels des préimprégnés résident dans :

- des performances mécaniques élevées du stratifié obtenu, résultant de la forte proportion de fibres ;
- une amélioration des conditions de travail et de sécurité, du fait de la suppression des manipulations de résine et du dégagement de vapeurs toxiques ;

Véritable ouvrage de référence, **MATÉRIAUX COMPOSITES** apporte l'ensemble des concepts théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension du comportement mécanique des matériaux et structures composites. Ainsi, il permet d'établir une synthèse de l'analyse du comportement mécanique et de la théorie des plaques stratifiées ou sandwiches, et d'en appliquer les développements à la résolution des problèmes de flexion, de flambement et de vibrations.

Composé de cinq parties, ce traité repose sur une approche fondamentale et unifiée aboutissant à une continuité des concepts et des théories. Illustrée de nombreux exercices d'application des concepts introduits, cette cinquième édition entièrement en couleurs a été actualisée et des commentaires ont été ajoutés afin de mettre en évidence la progression du traité.

Après une présentation de la constitution puis de la mise en œuvre des matériaux composites, l'ouvrage développe progressivement les outils nécessaires pour modéliser le comportement mécanique des structures en matériaux composites stratifiés et sandwiches. Il aborde ensuite les problèmes de dimensionnement des structures, montrant comment les outils introduits permettent de modéliser le comportement mécanique des structures en matériaux composites.

Le contenu et la progression de **MATÉRIAUX COMPOSITES** ont été conçus avec pour objectifs principaux :

- traiter le matériau composite comme un matériau traditionnel ;
- intégrer l'apport des techniques numériques dans la résolution des problèmes de dimensionnement des structures ;
- aborder les difficultés de manière progressive afin de faciliter l'accès du lecteur aux divers concepts introduits ;
- confronter la modélisation avec le comportement réel des matériaux et des structures.

Complet et didactique, cet ouvrage s'adresse aux étudiants de 2^e et 3^e cycles, aux ingénieurs, aux chercheurs ainsi qu'aux techniciens supérieurs.

Professeur émérite à l'Institut supérieur des matériaux et mécaniques avancés du Mans (ISMANS), Jean-Marie Berthelot exerce ses compétences dans les domaines de la mécanique des solides, de la mécanique des matériaux et des matériaux composites. Spécialiste reconnu au niveau international, ses nombreux travaux dans le domaine du comportement mécanique des matériaux composites font l'objet de publications régulières dans des congrès et des journaux scientifiques de premier ordre. Il est régulièrement consulté au niveau international en tant qu'expert dans les domaines des matériaux composites.

Coque de voilier en matériau sandwich, répartition des contraintes lors du haubanage du mât (Illustration J.-M. Berthelot).

www.editions.lavoisier.fr

