

III. 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.

III. 2. MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

III. 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.

III. 2. 1. 1. Moulage au contact (figure III. 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".

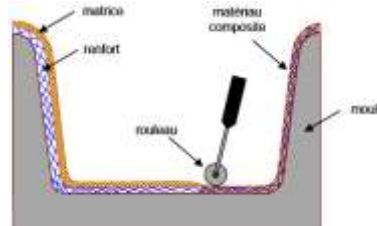


Fig. III. 1 : Principe du moulage au contact.

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 débullage 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.

III. 2. 1. 2. Moulage par projection simultanée (figure III. 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'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

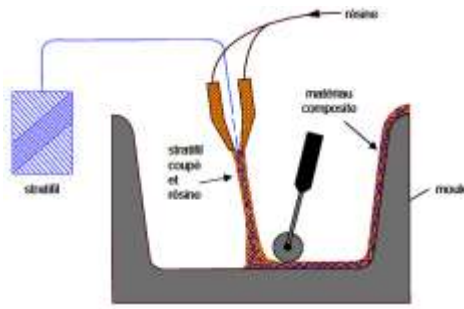


Fig. III. 2 : Principe du moulage par projection simultanée.

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.

III. 2. 2. Moulage sous vide (figure III. 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.

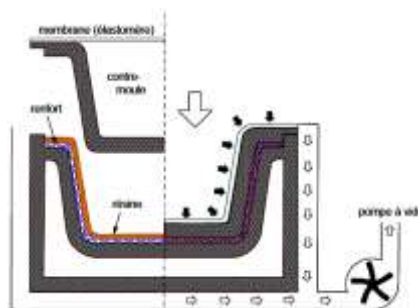


Fig. III. 3 : Moulage sous vide.

III. 2. 3. Moulage par compression

III. 2. 3. 1. Moulage par injection de résine (figure III. 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.

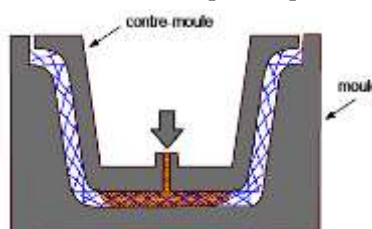


Fig. III. 4 : Moulage par injection de résine.

III. 2. 3. 2. Moulage par compression à froid (figure III. 5. 1)

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.

III. 2. 3. 3. Moulage par compression à chaud (figure III. 5. 2)

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 contremoule.

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.

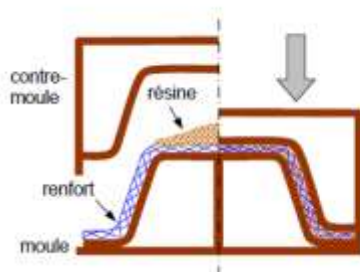


Fig. III. 5. 1. À froid

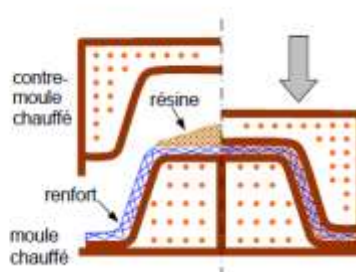


Fig. III. 5. 2. À chaud

Fig. III. 5 : Principe du moulage par compression.

III. 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.

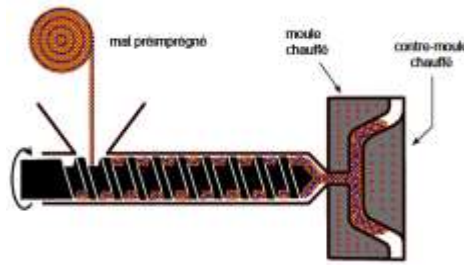


Fig. III. 6 : Moulage par injection.

III. 2. 4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (figure III.7), de panneaux ondulés pour toitures (figure III.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 III. 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 III.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.

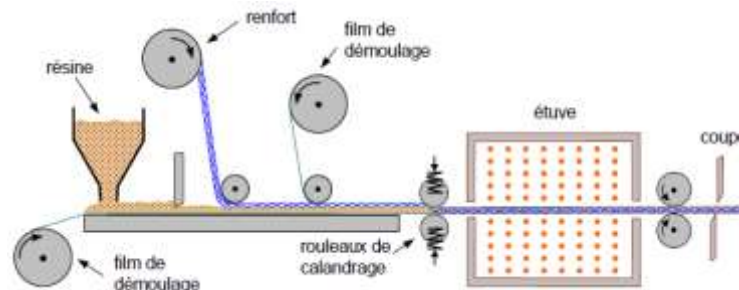


Fig. III. 7 : Moulage en continu de plaques.

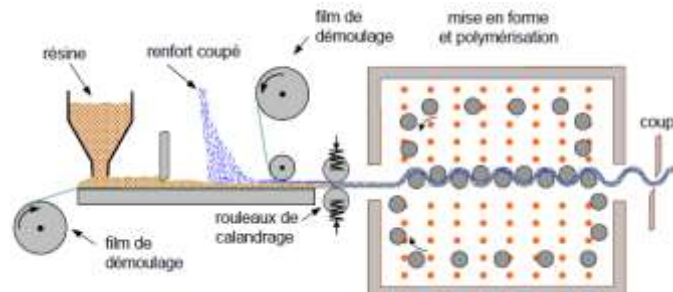


Fig. III. 8 : Moulage en continu de panneaux ondulés.

III. 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 III. 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.

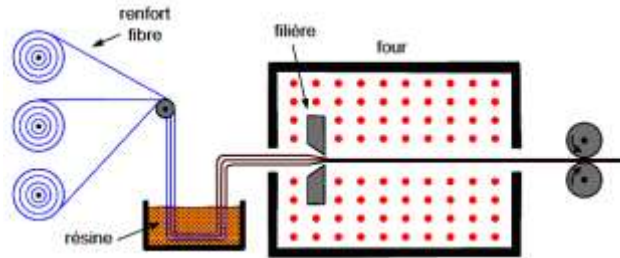


Fig. III. 9 : Moulage par pultrusion.

III. 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 III.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 2000 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.

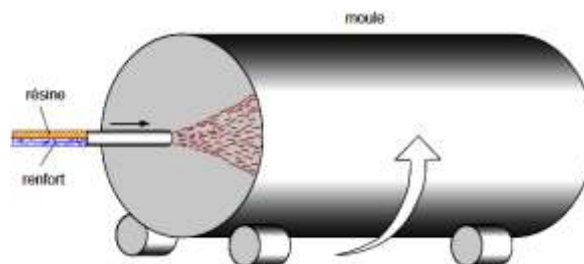


Fig. III. 10 : Moulage par centrifugation.

III. 2. 7 Moulage par enroulement filamentaire

III. 2. 7. 1. Principe

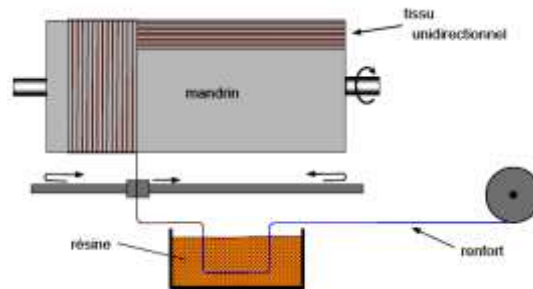
Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

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.

III. 2. 7. 2. Enroulement circonférentiel (figure III. 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.



F. III. 11 : Principe de l'enroulement circonférentiel.

III. 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 III.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.

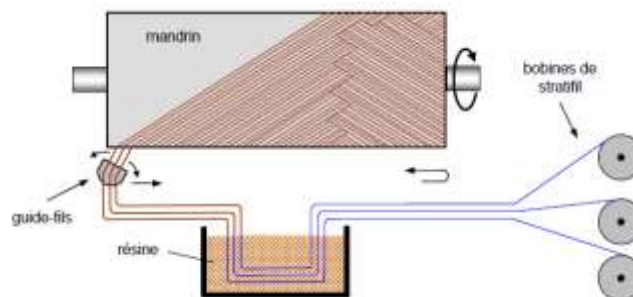


Fig. III. 12 : Principe de l'enroulement hélicoïdal.

2. Enroulement continu

L'enroulement continu (figure III. 13) permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

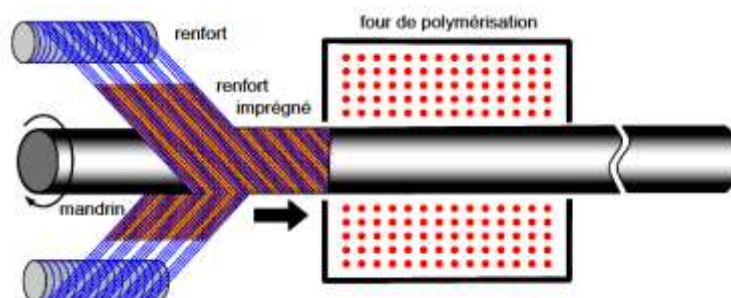


Fig. III. 13. Enroulement hélicoïdal continu.

III. 2. 7. 4. Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement (figure III. 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.

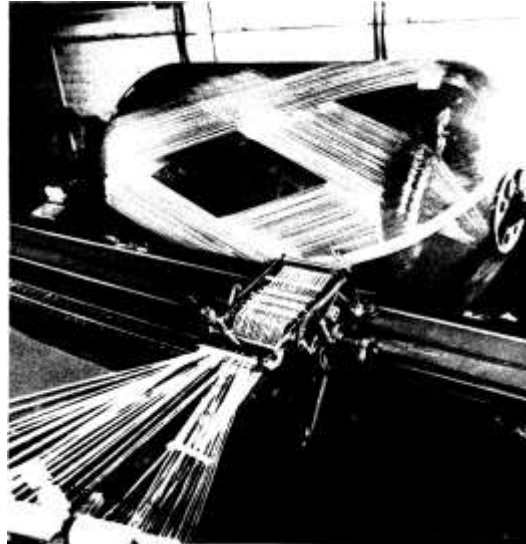


Fig. III. 14. Enroulement polaire

III. 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;
- 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.

III. 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.

III. 3. UTILISATION DE DEMI-PRODUITS

III. 3. 1. Introduction

La mise en œuvre de demi-produits (préimprégnés, compounds) fait appel aux mêmes techniques que le moulage (paragraphe III. 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.

III. 3. 2. Préimprégnés

III. 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.

III. 3. 2. 2. Élaboration

La fabrication des préimprégnés se fait sur une machine verticale ou horizontale, suivant le schéma de principe de la figure III. 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.

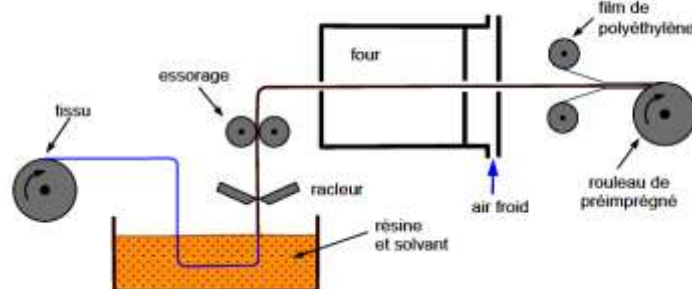


Fig. III. 15 : Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné.

III. 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;
- une automatisation possible par drapage, à l'aide d'automates ou de robots, permettant de diminuer les prix de revient des produits finis.

III. 3. 2. 4. Mise en œuvre

Les préimprégnés peuvent être mis en œuvre :

- par compression à chaud, puis cuisson;
- par moulage sous vide, avec cuisson dans des moules chauffants.

Lors de la mise en œuvre, les préimprégnés doivent être découpés aux dimensions des pièces à réaliser (figure III. 16). Il en résulte que seules les formes simples peuvent être réalisées. Après mise en place des préimprégnés dans le moule, sous l'action de la chaleur, la résine redevient fluide, puis durcit pour obtenir la pièce finale.

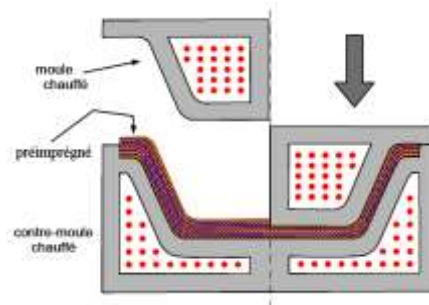


Fig. III. 16 : Moulage par compression à partir d'un préimprégné.

III. 3. 3. Les compounds de moulage

III. 3. 3. 1. Généralités

Les "compounds" (composés) de moulage sont des demi-produits livrés en rouleaux ou feuilles d'épaisseur d'environ 3 mm, composés généralement de résine polyester-fibres de verre, placés entre deux films de polyéthylène. Ils sont parfois considérés comme des préimprégnés, leur utilisation les différencie toutefois nettement. Parmi ces compounds, les plus utilisés sont :

- les SMC : Sheet Moulding Compounds,
- les HMC : High Moulding Compounds.

Divers autres types de compounds existent et sont développés pour chaque utilisation spécifique. Un des intérêts des compounds polyesters réside dans un temps de polymérisation très court (quelques minutes), d'où la possibilité de les utiliser dans des productions de grandes séries.

III. 3. 3. 2 Principe

Le SMC est un composé de moulage lamifié ("sheet" signifie "feuille"), comportant une proportion de fibres assez faible (30 % en masse), et une forte proportion de charges (50 % en masse) dans la résine. Les fibres peuvent être (figure III.17) :

- soit des fibres coupées (généralement 25 à 50 mm), réparties au hasard dans le plan de la feuille (SMC-R);
- soit des fibres coupées unidirectionnelles (SMC-D);
- soit des fibres continues unidirectionnelles (SMC-C).

Il existe également des SMC mixtes : par exemple SMC-D/R (fibres coupées unidirectionnelles et réparties au hasard), SMC-C/R (fibres continues unidirectionnelles et fibres coupées réparties au hasard).

Les fibres peuvent être de diverses natures : verre, carbone, Kevlar, ou mixtes. En diminuant la proportion des charges dans la résine, il est possible d'augmenter la proportion de fibres de 30 à 50 % en masse. Le compound est alors appelé HMC et possède des caractéristiques mécaniques élevées.

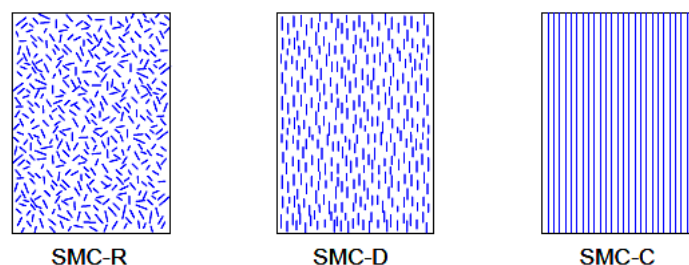


Fig. III. 17 : Différentes distributions des fibres dans les SMC.

III. 3. 3. 3. Élaboration

Le principe d'élaboration des compounds est donné à la figure III. 18 pour les SMC-R et à la figure III. 19 pour les SMC-D/R. La résine sous forme de pâte est SMC-R SMC-D SMC-C véhiculée sur une feuille de polyéthylène. Les fibres sont déposées sur la résine, puis recouvertes par une deuxième feuille de polyéthylène.

L'ensemble passe dans un système de compactage, pour être ensuite enroulé. La polymérisation de la résine est retardée par adjonction d'oxyde de magnésium. Le compound se présente alors sous forme de feuilles molles et poisseuses.

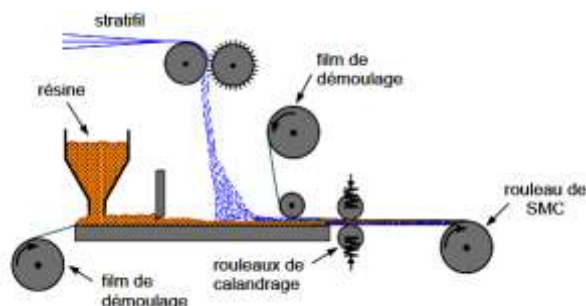


Fig. III. 18 : Principe d'élaboration d'un SMC-R.

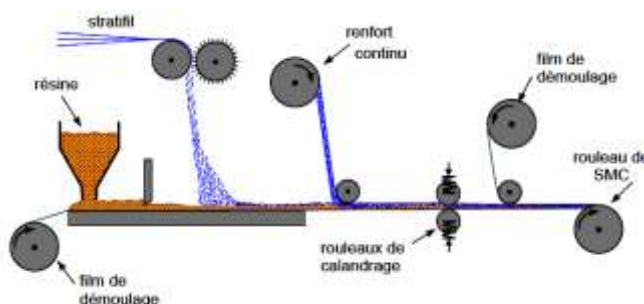


Fig. III. 19 : Principe d'élaboration d'un SMC-C/R.

III. 3. 3. 4. Mise en œuvre

Le moulage est effectué selon les techniques traditionnelles de moulage par compression (figure III. 20). Des "flans" de compounds sont découpés dans les feuilles et placés entre le moule et le contre-moule. La forme des flans ne doit pas nécessairement être adaptée aux dimensions du moule. En effet, à la différence des préimprégnés, les compounds ont une proportion élevée (50 à 70 % en masse) de matrice. Lors de la compression à chaud, la matière s'écoule (on dit qu'elle "flue"), et vient remplir tout le moule. Lors de cet écoulement, il peut y avoir réorientation des fibres. Le rôle du concepteur sera de rechercher la forme et l'épaisseur optimales des flans pour obtenir les caractéristiques finales souhaitées de la pièce après durcissement.

Ainsi les compounds permettent la fabrication de très grandes pièces à formes éventuellement complexes comportant nervures et bossages à embouti profond, telles que cabines de camions, de voitures, etc. Le fait de mouler des pièces de surfaces de plus en plus grandes conduit à utiliser des presses de plus en plus puissantes.

Les gros tonnages ont d'abord été réalisés dans le domaine de l'électrotechnique, puis dans celui de l'automobile (par exemple pare-chocs d'automobiles, capot-moteur d'automobiles, etc.). Les applications des compounds touchent aujourd'hui tous les secteurs industriels.

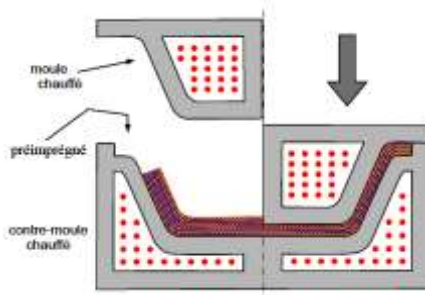


Fig. III. 20 : Moulage par compression à partir d'un compound.

III. 4. ARCHITECTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

III. 4. 1. Introduction

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- par surface: plaques, coques,
- par stratification de couches successives.

Ce concept justifie l'importance qui sera donnée par la suite à l'étude des matériaux composites considérés sous la forme de plaques ou de coques, constituées de couches différentes (ou non). Les coques peuvent être modélisées comme un ensemble de plaques, et leur étude déduite de l'étude des plaques.

L'objet de ce paragraphe est de dégager l'architecture générale des matériaux composites.

III. 4. 2. Stratifiés

Les stratifiés sont constitués (figure III. 21) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines.

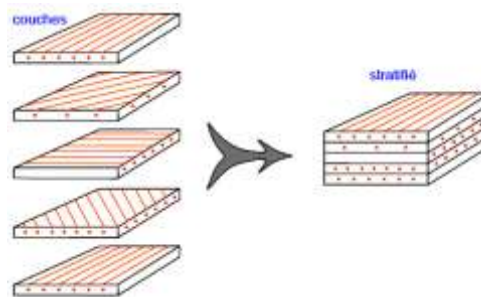


Fig. III. 21 : Constitution d'un stratifié.

Nous examinons les divers types de stratifiés.

III. 4. 2. 1. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (figure III. 22) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche. La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

1. Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.

2. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.

3. Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.

4. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre.

Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code.

La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est donné à la figure III. 22.

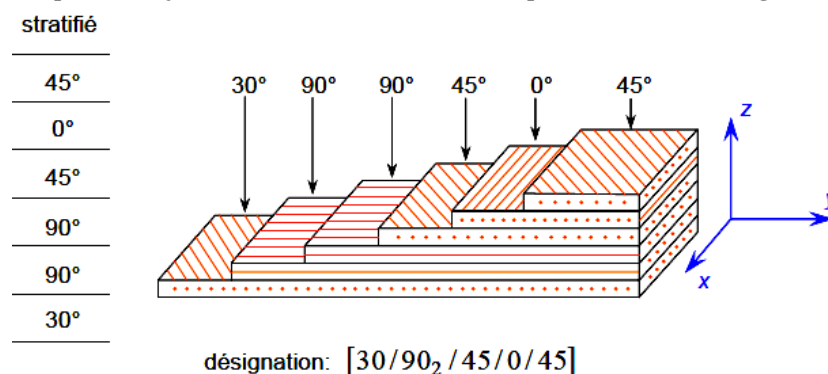


Fig. III. 22 : Désignation d'un stratifié.

Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes + ou – sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué (figure III. 23).

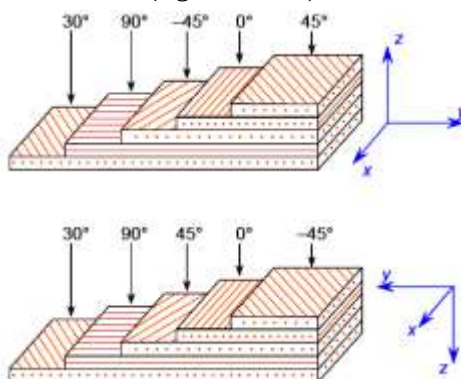


Fig. III. 23 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés.

Nous donnons ci-après quelques exemples de désignation de stratifiés.

Stratifié Désignation

0 °	
30 °	
-30 °	[±45 / ∓30 / 0]
-45 °	
45 °	
30 °	
-60 °	
-60 °	[45 / 0 / -60 ₂ / 30]
0 °	
45 °	
0 °	
-45 °	
-45 °	[45 ₂ / -45 ₂ / 0]
45 °	
45 °	
0 °	
-45 °	[± ∓ ±45 / 0]
45 °	
45 °	ou [45 / -45 ₂ / 45 ₂ / -45 / 0]
-45 °	
-45 °	
45 °	

Stratifiés symétriques

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique. Par exemple :

90 °	
45 °	
45 °	
0 °	
0 °	
45 °	
45 °	
90 °	

$$[90 / 45_2 / 0]_S$$

Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. Par exemple :

90 °	
45 °	
45 °	
0 °	
45 °	
45 °	
90 °	

$$[90 / 45_2 / \bar{0}]_S$$

Séquences

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée. Par exemple :

0 °	
45 °	
90 °	
0 °	
45 °	
90 °	
90 °	
45 °	
0 °	
90 °	
45 °	
0 °	

$$[(0 / 45 / 90)_2]_S$$

ou $[(0 / 45 / 90)_{2S}]$

0 °	
45 °	
90 °	
0 °	
45 °	
90 °	
60 °	
30 °	
60 °	
30 °	
60 °	
30 °	

$$[(30 / 60)_3 (90 / 45 / 0)_2]$$

L'alternance $[0 / 90]_n$ est souvent désignée par *stratifié croisé*.

Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :

0 °	V	[0 _V / ±45 _C / 90 _C] _S
45 °	C	
-45 °	C	
90 °	C	
90 °	C	
-45 °	C	
45 °	C	
0 °	V	
0 °	K	[0 _{2C} / (45 / 90) _{SV} / 0 _{2K}]
0 °	K	
45 °	V	
90 °	V	
45 °	V	
0 °	C	
0 °	C	

avec V : verre, C : carbone, K : Kevlar

III. 4. 2. 2. Structure générale d'un stratifié

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame.

Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé :

- les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres;
- les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées : par exemple (figure III. 24) couches unidirectionnelles dans la zone de traction, mat dans la zone de compression d'une poutre sollicitée en flexion;
- une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire;
- une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

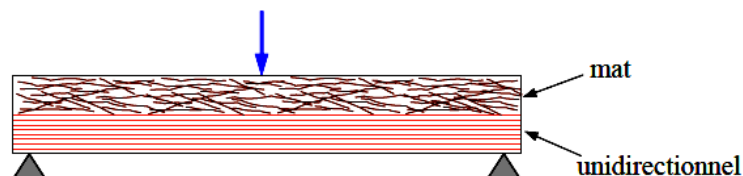


Fig. III. 24 : Poutre sollicitée en flexion.

Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- des *hybrides intercouches*, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- des *hybrides intracouches*, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents;
- des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches.

III. 4. 3. Composites sandwiches

III. 4. 3. 1. Généralités

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme mat unidirectionnel (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles", appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

Généralement, le choix des matériaux est fait avec pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- pour les *âmes pleines* (figure III. 25) :

- le balsa ou bois cellulaire;
- diverses mousses cellulaires;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques ;
- etc.;

- pour les *âmes creuses* (figure III. 26), essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- des alliages métalliques légers;
- du papier kraft (enduit ou non de résine);
- du papier polyamide, type papier Nomex;
- etc.;

Des âmes mixtes peuvent être utilisées.

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

Pour que les structures sandwiches jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.

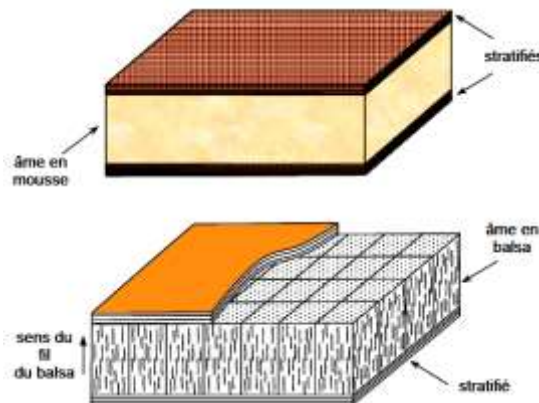


Fig. III. 25 : Matériaux sandwiches à âmes pleines.

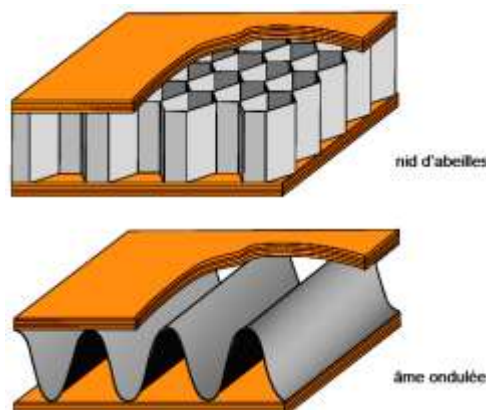


Fig. III. 26 : Matériaux sandwiches à âmes creuses.

III. 4. 4. Autres architectures

Les autres architectures des matériaux composites peuvent être schématiquement classées en : plastiques renforcés et composites volumiques.

III. 4. 4. 1. Plastiques renforcés

Ces matériaux sont constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont introduits des renforts de type :

- fibres courtes,
- billes pleines ou billes creuses,
- poudres : métalliques, de graphite.

Les renforts permettent généralement d'augmenter le module d'élasticité d'un facteur 2 à 5. Le comportement mécanique de ces matériaux peut être homogénéisé, et son étude est ramenée à celle d'un matériau usuel isotrope.

III. 4. 4. 2 Composites volumiques

Les composites volumiques ont été introduits pour des besoins spécifiques de l'aéronautique. Ils sont élaborés à partir de tissages volumiques (paragraphe II. 4. 4. 2). Ces matériaux sont très onéreux. Outre des intérêts spécifiques, ils permettent d'obtenir des caractéristiques mécaniques très élevées, avec un comportement sensiblement isotrope en volume.

III. 4. 5. Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites

L'étude de la mise en œuvre des matériaux composites a montré l'importance des stratifiés et des matériaux sandwichs. L'architecture de ces matériaux nous permet maintenant de dégager les grandes lignes de l'étude de leur comportement mécanique.

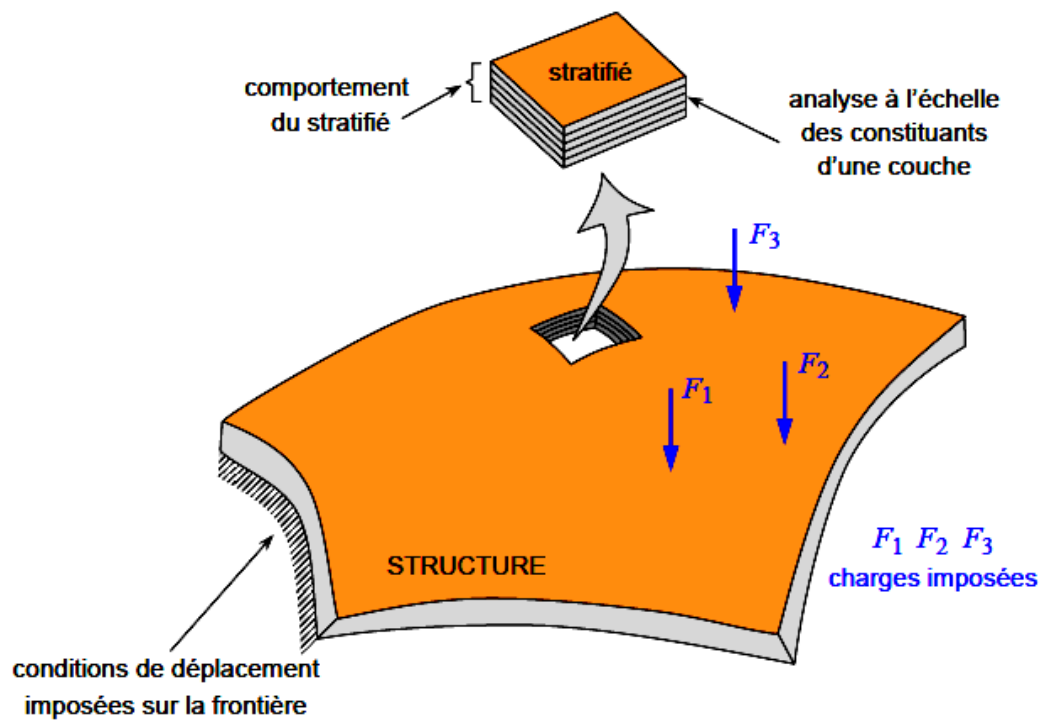
Cette étude comportera deux phases :

1. L'étude du comportement mécanique de chaque couche, parfois appelé comportement micromécanique ou microscopique du matériau composite. Cette étude est assez souvent désignée par microanalyse du matériau composite.
2. L'étude du comportement global du matériau constitué de plusieurs couches, et désigné généralement par comportement macroscopique du matériau composite ou comportement du stratifié.

Ces deux études étant effectuées, le comportement mécanique global d'une structure en composite sera ensuite analysé en adaptant les outils classiques du calcul des structures au comportement macroscopique des matériaux composites.

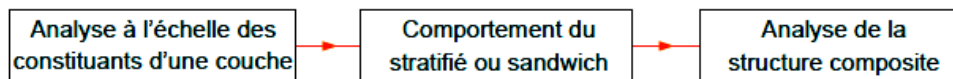
L'analyse des structures simples (poutres et plaques) peut généralement être abordée par une méthode analytique, alors que l'étude de structures complexes nécessite l'utilisation de la méthode des éléments finis.

L'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite est schématisée sur la figure III. 27.



Pour caractériser le comportement mécanique de la structure composite
il est nécessaire de connaître le champ des contraintes et celui des déplacements en tout point de la structure

Processus d'étude



Analyse à l'échelle des constituants

Analyse des propriétés élastiques et du comportement à la rupture d'une couche en fonction des constituants

Comportement du stratifié ou sandwich

Étude des propriétés élastiques et du comportement à la rupture du matériau stratifié ou sandwich en fonction des couches

Fig. III. 27 : Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite.