

Chapitre 5 : Mise en forme des matériaux composites

V.1. GENERALITES

Nous rappelons ici que ces fameux matériaux composites sont constitués de la combinaison de plusieurs matériaux non miscibles dont les qualités de chaque constituant se complètent pour former des matériaux aux propriétés améliorées. Ils présentent ainsi de nombreux avantages qui leur permettent de concurrencer les matériaux dits traditionnels tels que les métaux ou les alliages.

Présents dans quasiment tous les secteurs industriels, les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique sont le parfait exemple de l'émergence des matériaux composites au profit des matériaux conventionnels. L'utilisation des matériaux composites permet de réduire significativement le poids des appareils, diminuant ainsi la consommation en carburant, tout en conservant des propriétés de résistance similaires.

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. [8]

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 parechocs, les ailes, les portes latérales, les ouvrants arrières, les pièces sous capot....[8].

En 2009, Boeing a lancé le «787 Dreamliner» composé à 50% de matériaux composites. Son concurrent direct Airbus a riposté en 2013 avec le « A350 XWB » constitué à 53% de composites. Les gains de masse de ces avions sont estimés entre 20 et 25%.

Les matériaux composites sont omniprésents dans notre vie quotidienne. On les retrouve par exemple dans le secteur automobile où les pare-chocs et certaines pièces d'intérieur des voitures sont fait en composites de fibres de verre. Ils sont également présents dans de nombreux objets du quotidien tels que les montures de lunettes, les coques de smartphones et de tablettes ou encore les raquettes de tennis et de badminton. [12]



Figure1– Exemples de pièces automobiles en matériaux composites [8]

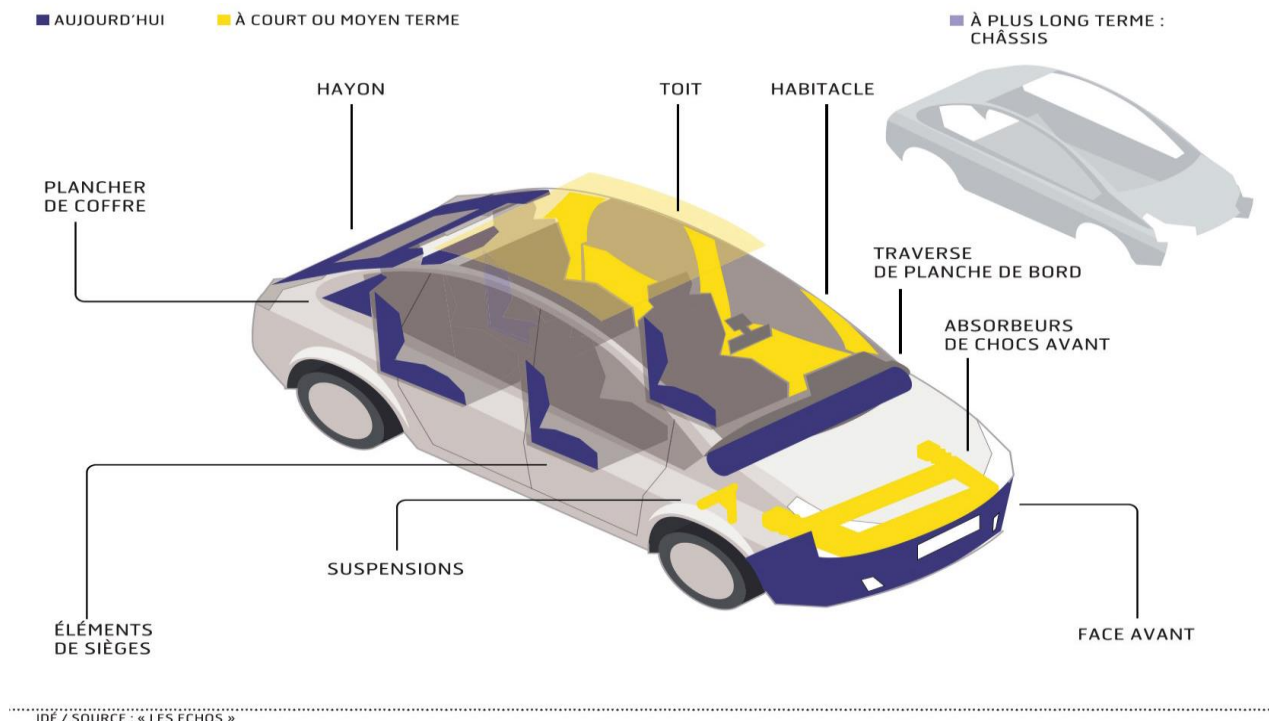


Figure 2 – La place des matériaux composites dans une automobile en 2014 [8]

V.2. LES COMPOSANTS ET LES SEMI-PRODUITS

N'oublions pas cette remarque : qu'au cours de la mise en forme, les pièces composites sont directement fabriquées à partir de leurs constituants élémentaires : les renforts et la matrice (donc élaboration avec mise en forme).

Ces constituants élémentaires peuvent être fournis :

- Soit séparément ;
- Soit sous forme de pré-imprégnés, c'est-à-dire de renforts déjà imprégnés de matrice (liquide ou semi-solide, selon les cas).

On a affirmé que les constituants, qu'ils soient pré-imprégnés ou non, peuvent être de différents types et fournis sous différentes formes.

5.2.1. LES MATRICES

Les procédés utilisés pour mettre en forme ces matrices (métalliques, céramiques, et organique) entrent tous dans la catégorie (très vaste !) du moulage, mais les principes physico-chimiques employés diffèrent d'une famille à l'autre. Schématiquement, les matrices thermoplastiques et métalliques sont fondues puis moulées avec leurs renforts, tandis que les matrices thermodurcissables (ou, plus exactement, « thermodurcies ») et céramiques sont directement synthétisées sur place, autour de leurs renforts, à partir de réactifs fluides. [9]

5.2.2. RENFORTS

Comme évoqué précédemment, on parle de trois types de renforts: les particules, les fibres courtes et les fibres longues.

On a dit que, pour le cas le plus simple qui est celui des particules et des fibres courtes, ces renforts sont directement incorporés à la matrice avant la mise en forme, et les procédés utilisés sont alors très proches de ceux que l'on utilise traditionnellement pour mettre en forme les résines, céramiques ou métaux non renforcés ;

Pour le cas des fibres longues, qui est plus complexe, elles sont donc fournies sous la forme de *semi-produits* (pré-imprégnés) pouvant être de plusieurs types (voir chapitre 1).

En outre, pour mettre en forme certains composites (et notamment les composites à matrice céramique), il est nécessaire de réaliser des préformes fibreuses, c'est-à-dire des tissus tridimensionnels ayant la forme de la pièce, au sein desquels on déposera ensuite la matrice. La réalisation de ces préformes s'effectue le plus souvent par superposition de couches de tissus 2D, généralement liés par aiguilletage ; pour des géométries complexes, le coût de cette opération peut être non négligeable. [9]

La figure 4 montre un exemple d'un tel tissu. Il existe en outre des machines capables de réaliser directement des tissus 3D, là encore à un coût significatif.

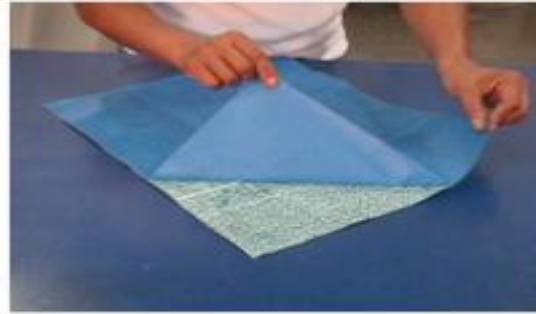
Figure 3: Un modèle réduit d'avion en tissu de carbone 3D, réalisé pour tester un procédé de fabrication de préformes [9] (image de l'Université nationale du design et des technologies de Moscou).



5.2.3 Le cas des pré-imprégnés

Comme indiqué ci-dessus, certains procédés de mise en forme ne font pas appel à des fibres et de la matrice séparés, mais à des semi-produits nommés pré-imprégnés (ou préimprégnés, couramment abrégés en prepregs), c'est-à-dire des plis ou des tissus déjà enduits de matrice semi-solide, fournis sous forme de feuilles (figure 5) ou de rouleaux. Les pré-imprégnés sont essentiellement utilisés pour les composites à matrices organiques thermodurcissables. [9]

Figure 4 : Une feuille de pré-imprégné verre/époxy et son film de protection (image Airtech). [9]



La mise en forme des pré-imprégnés consiste simplement à les solidifier à leur forme finale : le dosage des constituants est déjà effectué. Ceci représente un avantage considérable car la teneur en fibres et en matrice étant soigneusement contrôlée, on évite tout excès de matrice qui se traduirait par une dégradation des propriétés mécaniques (puisque celles-ci proviennent essentiellement des fibres). En contrepartie, il s'agit d'une technologie coûteuse, pour deux raisons. Premièrement, les pré-imprégnés sont chers à l'achat ; deuxièmement, ils nécessitent des équipements spécifiques pour leur stockage et leur mise en forme car ils sont fournis en cours de polymérisation (le catalyseur est incorporé à la matrice lors de leur fabrication) et la cinétique de la réaction doit donc être contrôlée avec soin, ce qui nécessite :

- De les stocker au froid (afin de ralentir la réaction), au congélateur ou en chambre froide, et toujours pendant une durée limitée ;
- De les mettre en forme à chaud (afin d'accélérer la réaction) et sous pression, généralement au four ou à l'autoclave.

La pré-imprégnation est également utilisée avec les matrices thermoplastiques, et même avec les matrices métalliques. Les contraintes d'utilisation sont alors différentes (stockage à chaud et non à froid) mais les avantages et inconvénients sont relativement comparables. [9]

V.3. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES [13]

5.3.1. Monocouche:

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissus et mat.

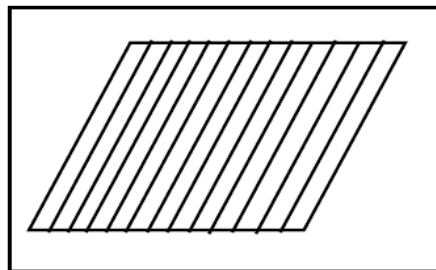


Figure5 : Couche de composite

5.3.2. Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiles, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines.

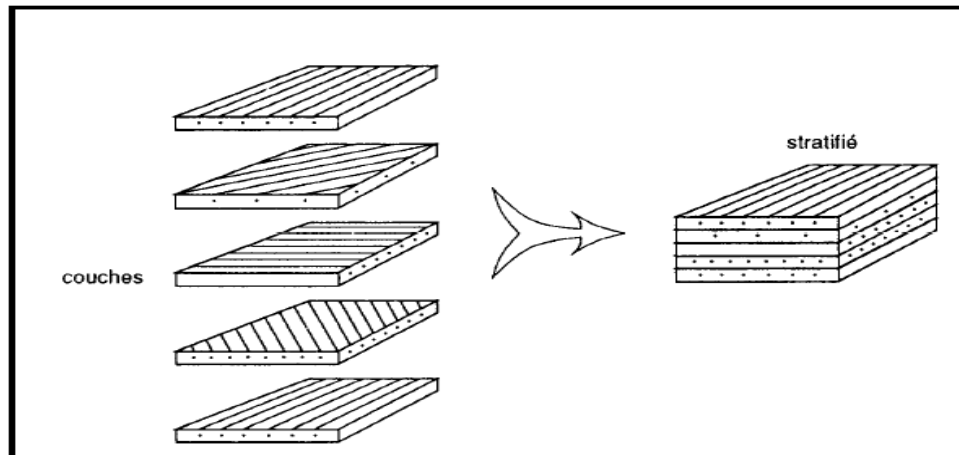


Figure 6: Constitution d'un stratifié

5.3.3. Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

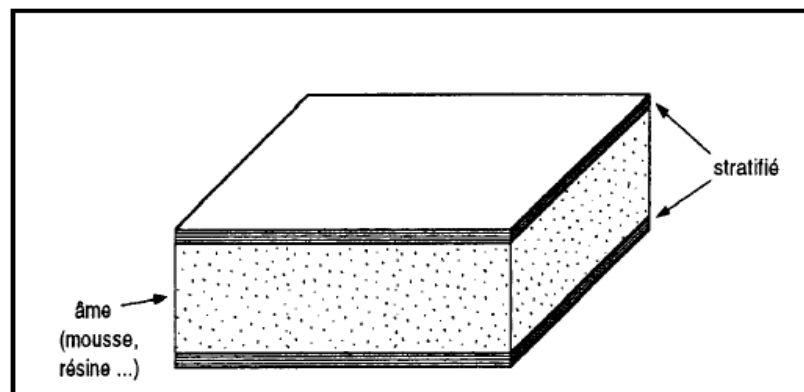


Figure7: Matériaux sandwichs à âmes pleines

V.4. MISE EN FORME DES COMPOSITES []

On compte plusieurs phases dans la mise en forme des composites, à savoir :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce à réaliser.
- Durcissement du système ; qui se fait soit par:
 - polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

On reconnaît un nombre de procédés, dont les plus importants peuvent être résumés en :

- Moulage au contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

5.4.1. Moulage au contact :

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable.

Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

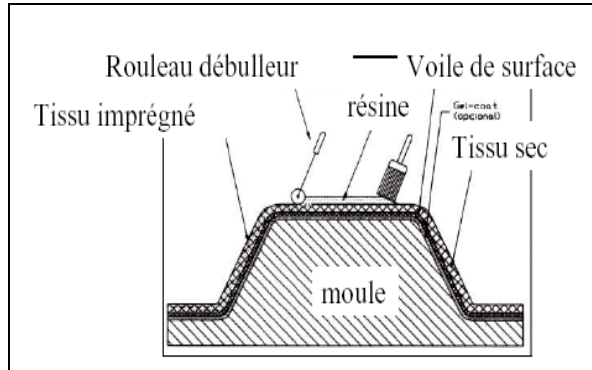


Figure8: Moulage au contact

5.4.2. Moulage par projection simultanée

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 stratifile 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 ébullée au rouleau cannelé.

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient.

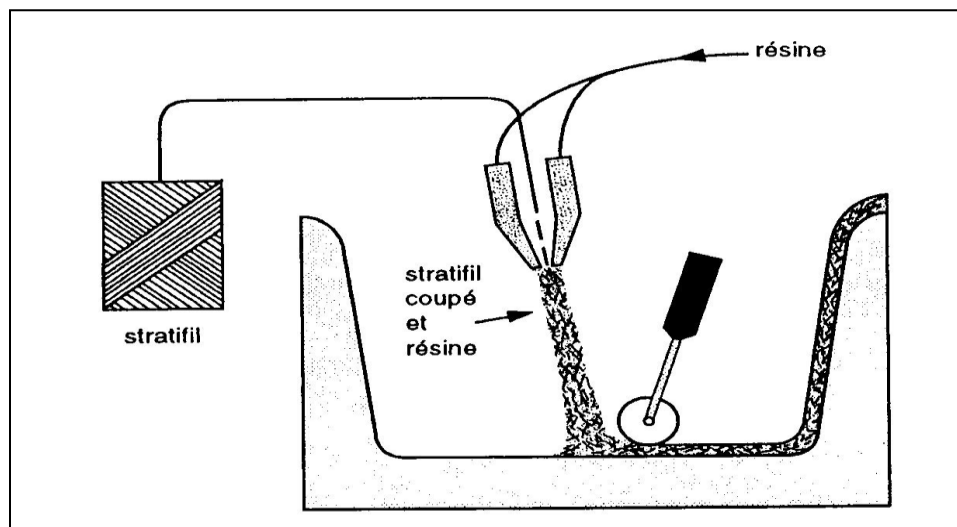


Figure9: Moulage par projection simultanée

5.4.3. Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding Compound).

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars.

Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition.

Le compound : c'est de la résine, du fibre coupé et de la charge

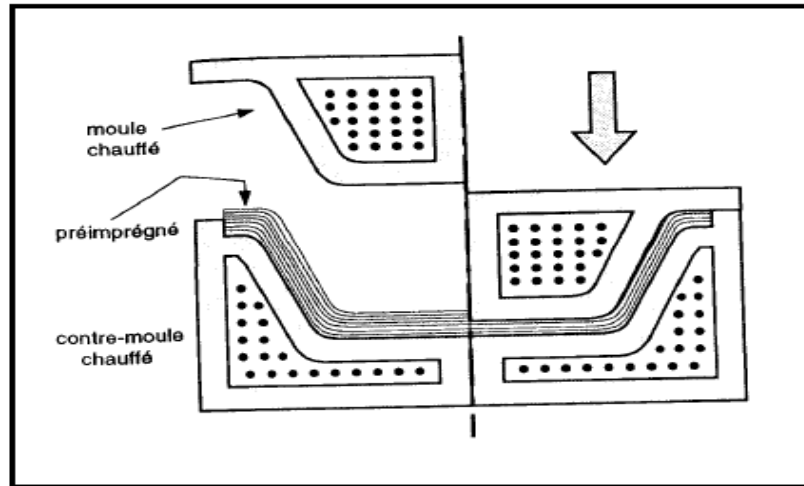


Figure10: Injection thermodurcissable BMC

5.4.4. Compression thermodurcissable SMC: (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de préimprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce.

Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques.

Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

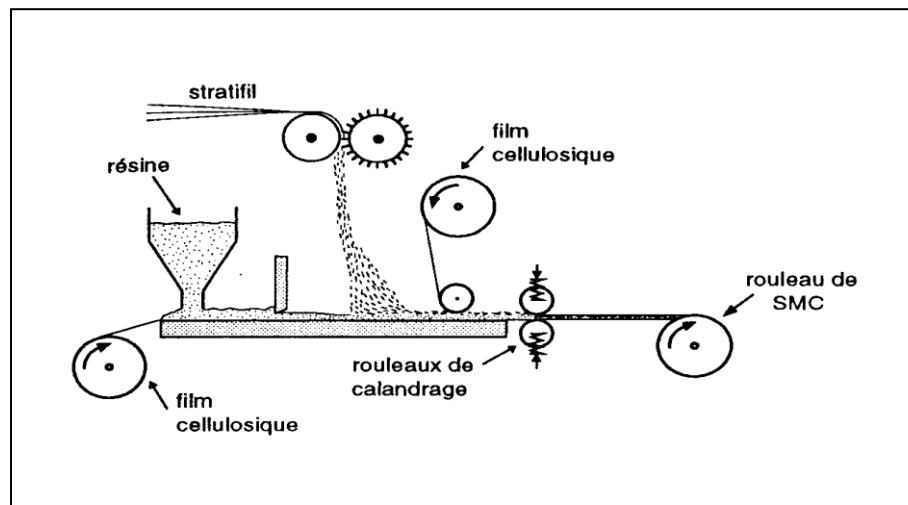


Figure11: Compression thermodurcissable SMC

5.4.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage):

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant.

Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.

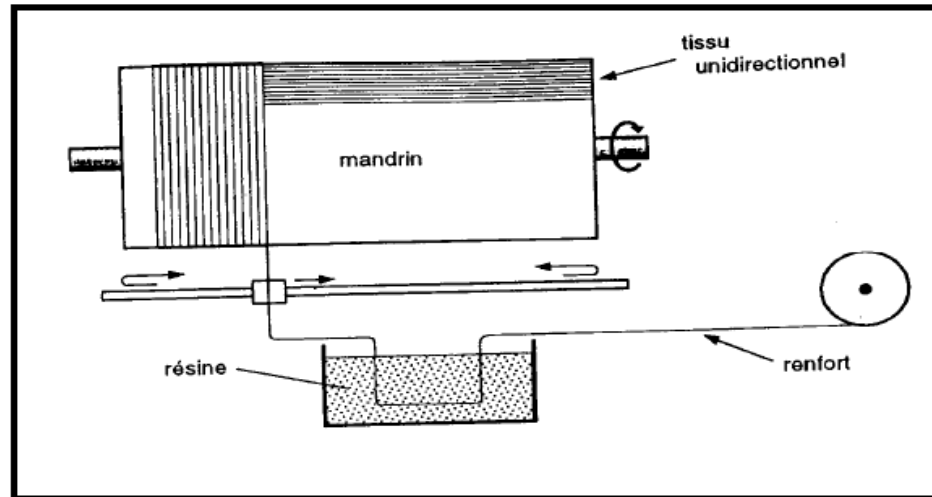


Figure12: Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Il existe d'autres procédés : pultrusion, drapage en autoclave, centrifugation, stratification en continu, thermoformage sous vide et estampage...

REMARQUE :

Pour plus de connaissances et de savoir-faire, j'invite nos chers étudiants à consulter les fichiers PDF suivants :

- 1- [dossier_peda_matériaux composites_1.pdf](#)
- 2- [6546-quelques-procédés-de-mise-en-forme-des-composites-ensps.pdf](#)