

**Moulage de composites
thermoplastiques
MED 3 1420
Laura Cheng et Vincent Varanges**

laura.cheng@epfl.ch

vincent.varanges@epfl.ch

Les composites thermodurcissables ont été privilégiés pendant de nombreuses années dû à la fluidité de la matrice polymère assurant une imprégnation en profondeur du réseau fibreux. De plus après polymérisation, la matrice confère au composite final d'excellentes propriétés mécaniques. Cependant la transformation par réaction chimique des thermoplastiques est irréversible et reste impossible à recycler.

Les composites thermoplastiques ont pendant longtemps été mis de côté dû à leur complexité de mise en œuvre, toutefois ces matériaux ont le net avantage d'avoir une transformation solide-liquide réversible et n'a pas besoin d'un autoclave réduisant son temps de cycle. La matière étant plus visqueuse qu'une résine thermodurcissable, elle nécessite des procédés industriels adaptés. La dilatation thermique lors de la mise en œuvre est particulièrement critique pour les composites thermoplastiques. Dans un composite les coefficients de dilatation thermique ne sont pas les mêmes dans toutes les directions et la pièce aura des contraintes thermiques résiduelles. Plus la pièce sera moulée à haute température plus cet effet sera prononcé. Ces phénomènes sont plus prononcés dans les composites thermoplastiques dû à leur température de mise en œuvre. La résistance de la pièce se trouve alors réduite et dans les cas extrêmes, la pièce peut même se fissurer avant le refroidissement complet !

Voici un petit tableau qui regroupe les principales différences entre ces deux systèmes de résine.

	Thermoplastiques	Thermodurcissable
Chimie	Pas de réaction chimique	Réaction pendant moulage
Cadence	Rapide	Lente à moyenne
Recyclage	Remoulable	Pas recyclable
Investissement	Moyen à élevé	Faible à moyen
Contraintes internes	Moyennes à élevées	Faibles à moyennes
Résistance chimique	Faible à excellente	Moyenne à excellente
Stockage	Température ambiante	Congélateur ou température ambiante

Le but de ce TP est de produire des pièces creuses en polyamide 12 et carbone par la méthode de BIM ou *Bladder Inflation Moulding*. Les pièces de composites thermoplastiques seront analysées par microscopie optique avant et après moulage.

Matière première

Pour les composites thermoplastiques il existe plusieurs types de matériaux qui peuvent être moulés. Le type de processus et la géométrie de la pièce vont orienter le choix de la préforme. Voici les grandes familles de préformes :

Pré-imprégnés UD

Les pré-imprégnés UD sont très courant, car ils sont faciles à fabriquer en continu. Les fibres sont totalement imprégnées. En général ils sont utilisés avec une machine à placement de fibres, mais le processus est lent. Il permet toutefois un très bon contrôle des orientations de fibres.

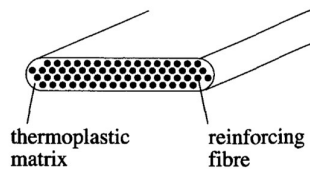


Figure 1 : Pré-imprégné UD

GMT (ou GMTex)

Le GMT (*Glass mat thermoplastic*) est une plaque de composite à fibres courtes aléatoires dans le plan déjà consolidé. Des renforts continus peuvent être ajoutés, souvent en surface, de type tissu [0°/90°], et le produit est nommé GMTex. La géométrie de la pièce finale est plutôt plane avec peu de flux de matière pendant le processus. La préforme est très rigide.

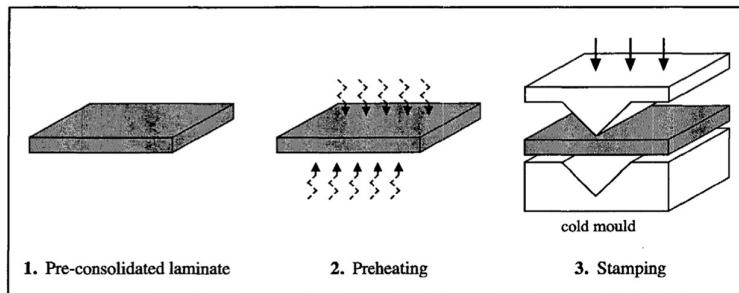


Figure 2 : Emboutissage de GMT

Tissu imprégné par poudre (Powder Impregnated fabric)

Les tissus pré-imprégnés sont recouverts de poudre de polymère qui est ensuite fondue, généralement par infrarouge, pour lier le polymère et les fibres. La matrice se retrouve en surconcentration par endroit et est absente à d'autres, dû à un manque de pression lors de la chauffe ou à la tension de surface entre le polymère et les fibres. Lors du moulage il faut donc faire couler la matrice pour imprégner tout le tissu. La préforme est moyennement rigide et permet une certaine mise en forme avant moulage.



Figure 3 : PIF exemple from Porcher Industries

Mèche ou fils

La préparation de ce type de préformes commence par la création d'une mèche avec les fibres de renfort et les fibres de la matrice, un petit fil de guipage peut parfois être ajouté dans la même matière que la matrice sert à maintenir les fibres ensemble. Les mèches sont utilisées pour faire des tissus de type quasi-isotrope et le fil peut ensuite être mis en forme sous forme de tissu (avec toutes les orientations souhaitées) ou de tresse. La tresse est utilisée surtout pour les applications creuses tels des tubes.

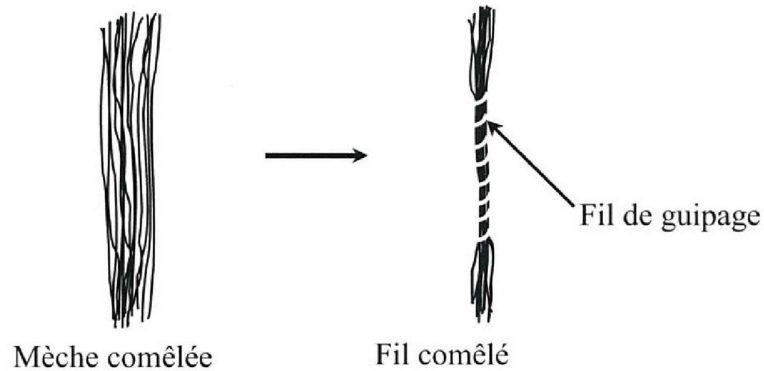


Figure 4 : Mèche et fil co-mêlés

Plusieurs catégories de fils peuvent être produites ; soit les deux types de fibres sont simplement combinés et ne sont pas mélangés (non-commingled yarn), soit les deux types de fibres sont mélangés (commingled yarn). Pour produire un fil mélangé, il peut être produit de la manière suivante : le fil est étiré plusieurs fois dans une unité d'étirage dans laquelle les fibres sont étirées et cassées (stretched-mingled). Huit bobines sont mélangées et étirées et le processus est répété 3 fois pour obtenir un taux de mélange de 512 (8^3) ! Le mélange est alors très intime.

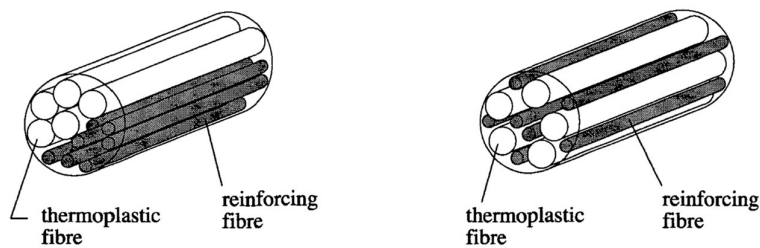


Figure 5 : non-commingled yarn (gauche) and commingled yarn (droite)

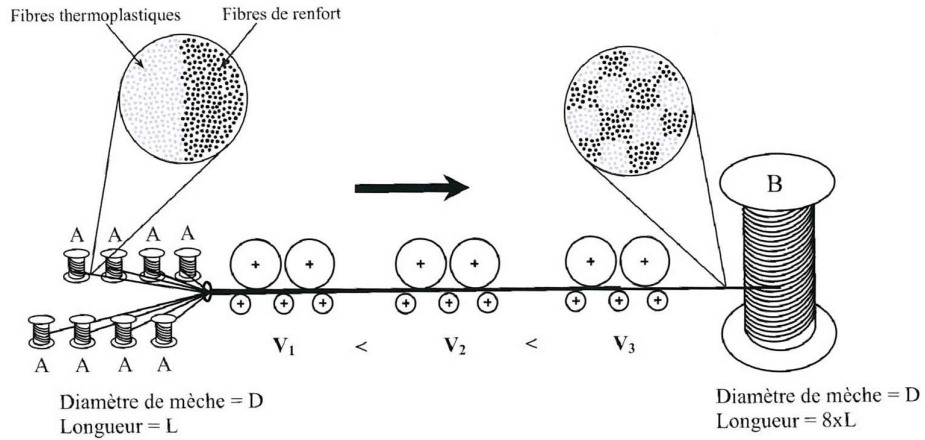


Figure 6 : Fabrication d'un fil stretched-mingled

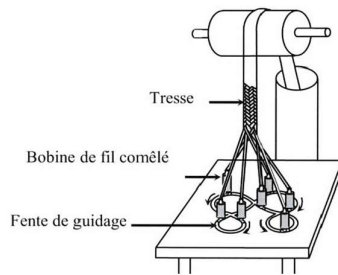


Figure 7 : Fabrication de tresse

La distribution homogène des fibres et de la matrice est très importante car elle détermine le temps d'imprégnation nécessaire pour avoir une consolidation complète. La loi de Darcy donne le temps d'imprégnation en fonction des plusieurs paramètres :

$$t_{imp} = \frac{\eta x^2 (1 - V_f)}{2k(p_{app} + p_{cap})} \quad (1)$$

Où : η est la viscosité de la résine

x est la distance d'imprégnation

k est la perméabilité du système

V_f est la fraction volumique de fibre

P_{app} est la pression appliquée

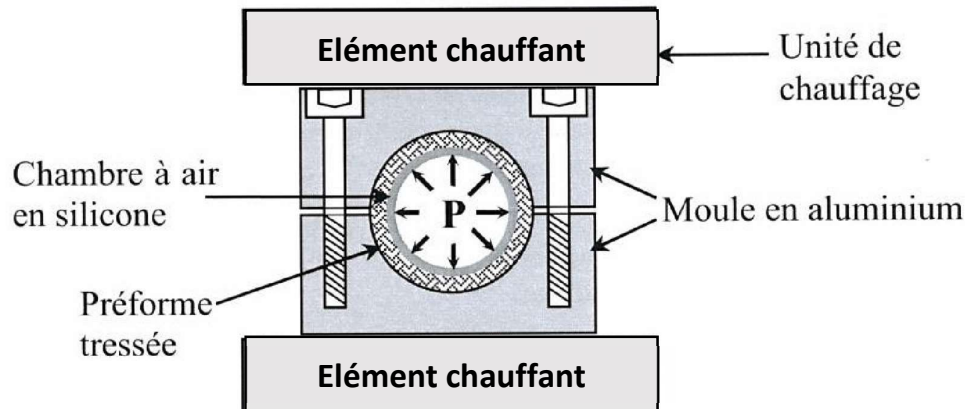
P_{cap} est la pression capillaire

Vu que le temps d'imprégnation dépend de la distance au carré il est préférable de diminuer le chemin que doit parcourir la résine plutôt que d'augmenter la pression.

Bladder Inflation Moulding (BIM)

Le moulage par BIM permet d'appliquer une pression à l'aide d'une vessie (ou bladder) et de permettre un état de surface extérieur de meilleure qualité. Les fibres sont étirées lors du moulage et n'ont (normalement) pas de plis, contrairement au moulage par pression extérieure.

La bladder en silicone permet des utilisations jusque vers 200-250 [°C] voire plus si le silicone est fluoré. L'élongation de ces silicones peut atteindre 1000% et la bladder peut être utilisé plusieurs fois.



Procédure :

1. Chauffer les éléments chauffant à 400 [°C]
2. Préparer le moulage en mettant la matière première et la bladder dans le moule. Serrer les vis.
3. Mettre la pression et placer le moule entre les éléments chauffants
4. Attendre environ 2 min 30 sec
5. Plonger le moule dans un grand bac d'eau et laisser refroidir
6. Enlever la pression et démouler

Exercices pour aider à la rédaction du rapport

En supposant que pour tous les cas les fractions massiques du composite sont $W_m=0.32$ et $W_f=0.68$ et que le diamètre des fibres de carbone est de $7\ [\mu\text{m}]$ et que celle de PA 12 est de $20\ [\mu\text{m}]$, répondez aux questions suivantes :

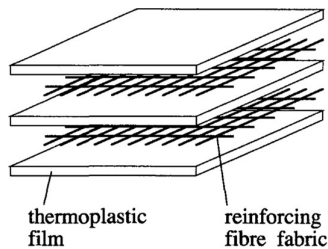
1. Quel est l'avantage **mécanique** que peut fournir un fil stretched-mingled comparé à du comingled sur la pièce moulée ?
2. Calculez les fractions volumiques ($\rho_m=1.01\ [\text{g}/\text{cm}^3]$ et $\rho_f=1.8\ [\text{g}/\text{cm}^3]$)
3. Sachant que le fil est un fil de densité 1.7 Nm, calculez combien de fibres de chaque type sont présentes dans un fil. Nm est le numéro métrique d'un fil utilisé dans l'industrie textile et vaut

$$Nm = \frac{\text{longueur [km]}}{\text{masse [kg]}} = \frac{\text{longueur [m]}}{\text{masse [g]}} \quad (2)$$

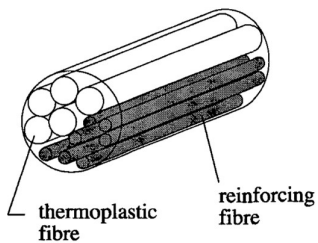
4. En prenant l'équation de Darcy et considérant tous les paramètres constants excepté la distance d'imprégnation, on obtient :

$$t_{imp} = \beta x^2 \quad (3)$$

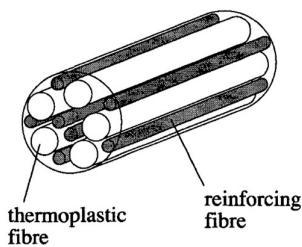
Estimez la distance d'imprégnation maximal des configurations suivantes et comparez-les (au carré ! donc X^2)



Si l'épaisseur du pli final fait 0.15, 0.3 et 0.5 [mm]
(empilement infini !)



Le vide entre les fils est simplement comblé par la pression. Indice : le taux de vide entre les fibres dans le fil est supposé de 20%



Le vide entre les fils est simplement comblé par la pression. Indice : calculer le nombre de fibres de carbone pour une fibre de PA12. Taux de vide 20%.

A partir des pièces créées lors du TP et des observations réalisées au microscope, discutez des aspects suivants :

5. Discutez la qualité des pièces produites. Enumérez les paramètres principaux qui définissent cette qualité et comment les varier pour obtenir une plus petite porosité.
6. Commentez les observations faites au microscope (rapport fibre/matrice, taux de vide, taille des fibres, etc.)