

# TPA

## Mise en œuvre des composites : Moulage au contact et Pré-Imprégnés

Le but de ce TP est de se familiariser avec deux méthodes de fabrication des matériaux composites : de comprendre les différentes étapes de production, les sources d'erreur et les différences entre la théorie et la mise en œuvre.

MED3 1122

Jean-Baptiste Desbrest

[jean-baptiste.desbrest@epfl.ch](mailto:jean-baptiste.desbrest@epfl.ch)

Pierre-Etienne Bourban

[pierre-etienne.bourban@epfl.ch](mailto:pierre-etienne.bourban@epfl.ch)

# INTRODUCTION

En fonction des performances désirées, des coûts de fabrication et du volume de production, il existe de nombreuses méthodes de mise en œuvre des matériaux composite (voir figure 1).

Pour des petites séries, le moulage au contact ou voie humide (wet lay-up) et les pré-imprégnés (prepregs) sont souvent préférés. Ce sont ces 2 méthodes que nous allons voir dans ce TP. Le moulage au contact permettra d'obtenir des pièces de performance moyenne rapidement et cela sans l'achat d'équipements importants. Les pré-imprégnés, quant à eux demanderont l'utilisation de plus de matériel mais permettront d'obtenir des pièces haute performance et avec un très bon contrôle du process de fabrication, en accord avec les designs réalisés au préalable.

Lors de ces 2 méthodes, les pièces à fabriquer sont constitués de couches de fibres (carbone, verre, lin, aramide etc.) collées ensemble par une résine (époxy, polyester, vinylester etc.) et appliquées sur un moule positif ou négatif selon la géométrie de la pièce. Ce moule peut être fabriqué en plusieurs matériaux : en bois, en métal ou en en composite.

Pour le moulage au contact, les résines polymérisent généralement à température ambiante, un moule en bois pourra donc être utilisé. Pour les pré-imprégnés, une cuisson est nécessaire pour polymériser la résine (généralement entre 80 et 180°C), les moules peuvent parfois être réalisés en fibre de carbone pour éviter leur déformation lors de la cuisson, ce qui nuirait à la qualité de la pièce. Pour des pièces à géométries simples, des moules réalisés à partir de plaques d'aluminium sont généralement utilisés, car peu couteux et résistants aux températures de cuisson élevées.

---

Pour des projets comme Solar Impulse où l'optimisation des designs et du poids est cruciale, l'utilisation de pré-imprégnés s'impose d'elle-même car elle permet de meilleures propriétés mécaniques ainsi qu'un meilleur contrôle de la production.

Source : [decision.ch](http://decision.ch)

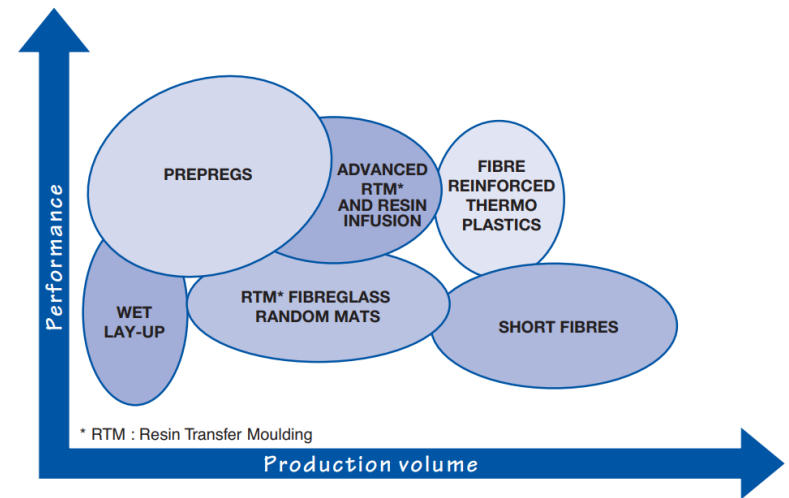


Figure 1 : Principales méthodes de fabrication des matériaux composites  
Source : [https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Prepreg\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf)



# LA T<sub>g</sub>

Que ce soit pour les pré-impregnés ou pour la voie humide, de nombreuses résines therm durcissables peuvent être utilisées : époxy, polyester, phénolique etc. L'époxy est facilement mise en œuvre et est généralement utilisée pour des pièces à hautes propriétés mécaniques. C'est cette résine qui sera utilisée dans ce TP.

Une des propriétés les plus importantes d'un système époxy est sa température de transition vitreuse T<sub>g</sub>. Comme les époxydes sont des matériaux therm durcissables et réticulent chimiquement pendant le processus de durcissement (étapes A,B,C et D dans la figure 2 ci-contre), le matériau époxy durci ne fond pas et ne refond pas lorsqu'il est chauffé (à la différence des matériaux thermoplastiques), mais il subit un léger ramollissement (changement de phase) à hautes températures. La température de transition vitreuse (T<sub>g</sub>), à ne pas confondre avec le point de fusion (T<sub>m</sub>), est la plage de température dans laquelle un polymère therm durcissable passe d'un état dur, rigide ou "vitreux" à un état plus souple, ou plus "caoutchouteux".

En pratique, le contrôle de la T<sub>g</sub> est très important car il permet de changer les propriétés mécaniques d'une pièce composite. Ainsi, comme présenté dans la figure 3 : une pièce composite avec une T<sub>g</sub> élevée aura une meilleure résistance qu'une même pièce à T<sub>g</sub> plus faible. De même, une pièce à T<sub>g</sub> élevée sera plus tolérante pour travailler à des températures élevées.

L'article "RÉSINES ÉPOXY RÉTICULÉES PAR DES POLYAMINES : STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS" en annexe de ce protocole est une approche plus chimique de la T<sub>g</sub> mais pourra vous donner des éléments de réponse pour les questions à la fin du TP.

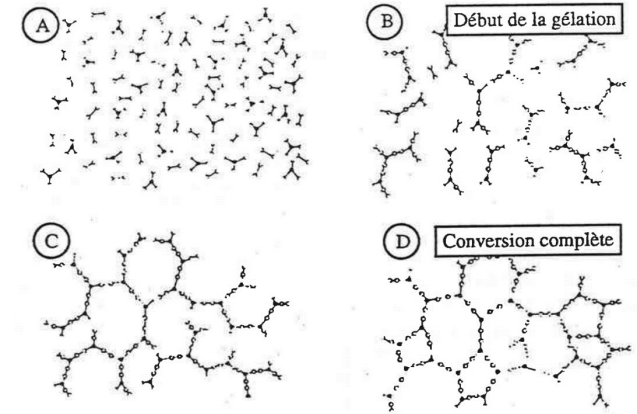
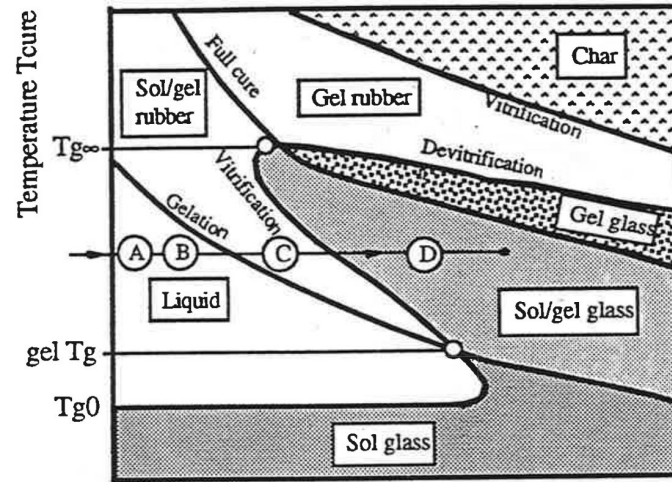


Figure 2 : Diagramme TTT d'une résine époxy et représentation de la réticulation : (A) composants n'ayant pas réagi ; (B) croissance linéaire et branchement des chaînes ; (C) gel formé ; (D) produit complètement réticulé.

Source : TP Moulage au contact / LTC

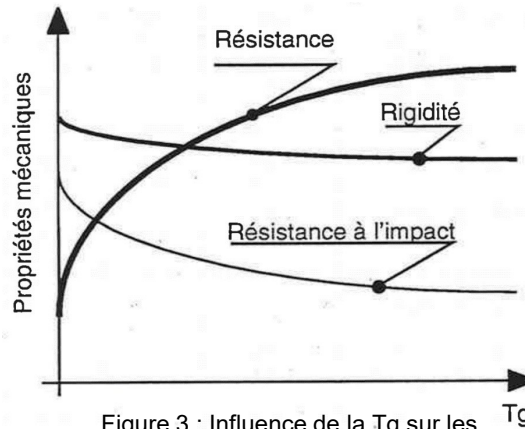


Figure 3 : Influence de la T<sub>g</sub> sur les propriétés mécaniques d'un composite

Source : TP Moulage au contact / LTC

## Le contrôle de la T<sub>g</sub>

La T<sub>g</sub> d'un composite dépend de la structure chimique de sa résine, du type de durcisseur utilisé mais aussi fortement du cycle de cuisson de la pièce. Ainsi, en fonction de ce dernier, la T<sub>g</sub> d'une pièce composite pourra aller de T<sub>g-0</sub> à T<sub>g-∞</sub> (figure 2 ci-dessus).

Pour le moulage au contact, et les durcissements à température ambiante, des valeurs de T<sub>g</sub> très élevées ne sont pas réalisables, la T<sub>g</sub> sera généralement autour de 50°C ou 80°C en fonction du système époxy. Cependant, si la même pièce est cuite à une température élevée, il en résultera une T<sub>g</sub> bien plus élevée et proche de T<sub>g-∞</sub>. Par exemple, une pièce en composite pourrait avoir une T<sub>g</sub> entre 60°C et 110°C, selon son cycle de cuisson.

Généralement les fabricants de résine fournissent les cycles de cuisson optimaux afin d'atteindre les meilleures performances en fonction de l'utilisation de la pièce fabriquée. Néanmoins, lors de la mise en œuvre, il est aussi important de maintenir un contrôle strict de la température dans l'environnement de production pour ne pas altérer les propriétés du composite. En plus de cela, la température de transition vitreuse des époxydes peut aussi être considérablement réduite par l'absorption d'humidité, ce facteur doit donc aussi être contrôlé lors de la mise en œuvre des pièces.

# LES PROCÉDÉS UTILISÉS DANS CE TP

## LE MOULAGE AU CONTACT

Lors du moulage au contact, des tissus secs (dry reinforcement fabric) sont imprégnés de résine (resin) et ensuite laminés à la main. La polymérisation peut ensuite se faire à température ambiante ou dans un four. La plupart du temps les pièces sont aussi mises sous vide à l'aide d'une bache et d'une pompe avant la polymérisation de la résine pour permettre la compaction des tissus et pour évacuer les bulles d'air. Une fois la résine polymérisée, les pièces peuvent être post-cuites pour augmenter la Tg de la résine et ainsi les propriétés mécaniques.

Bien que simple à mettre en œuvre, ce procédé est tout de même contraignant car il faut préparer le mélange résine-durcisseur et enduire ensuite tous les tissus un à un, en prenant soins de mettre une quantité de résine aussi régulière que possible. La qualité du composite final dépend donc énormément de l'opérateur et les propriétés mécaniques ne sont pas forcément constantes pour une grande pièce. En plus de cela, les résines dégagent généralement des gaz toxiques et provoquent des irritations de la peau, elles doivent par conséquent être manipulées avec précautions.

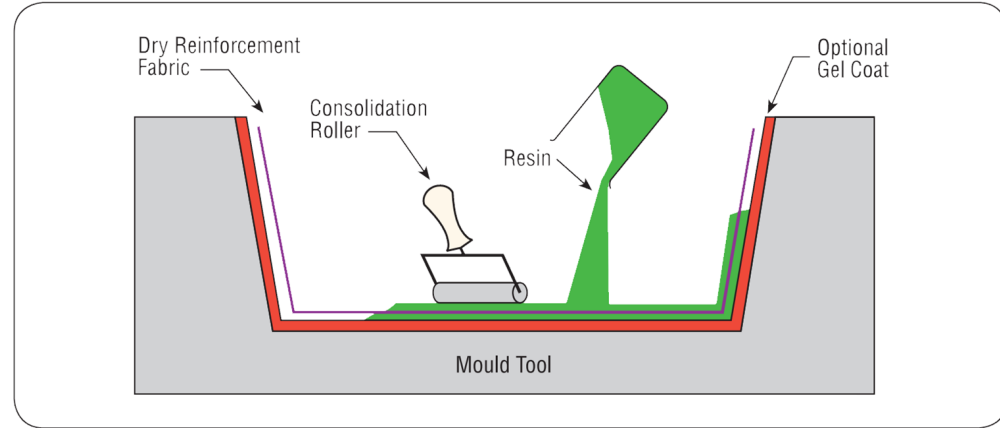


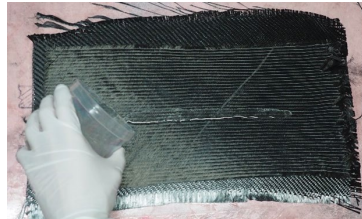
Figure 4 : Les éléments de la mise en œuvre par moulage au contact

Source : <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>

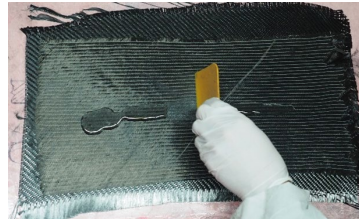
Pour les pièces épaisses ou de grandes dimensions (coque de bateau, piscine etc.) il est aussi souvent préférable de laminier les pièces en plusieurs étapes. En effet, le fait que la résine polymérise à température ambiante au bout d'un temps donné ne permet pas à l'opérateur de poser toutes les couches de tissus avant le durcissement.



1. Préparation du mélange résine durcisseur



2. Imprégnation des tissus à la main avec une spatule ou un pinceau directement dans le moule ou sur un plan de travail protégé.



3. Une fois les tissus imprégnés dans le moule ou sur la pièce, le tout peut être mis sous vide pour compacter le composite et évacuer les bulles d'air

4. Polymérisation de la résine à température ambiante, post-cuisson optionnelle et démoulage.

Source : *Projet MAKE SP80 / Stratification du flotteur principal du prototype.*

# LES PROCÉDÉS UTILISÉS DANS CE TP

## LES PRÉ-IMPRÉGNÉS

Pour les pré-imprégnés, les tissus sont livrés d'usine déjà imprégnés de résine, avec un taux constant et contrôlé. Le rôle de l'opérateur dans la qualité de la pièce finale est donc bien moindre que pour le moulage au contact. Cependant, la résine et le durcisseur étant déjà mélangés mais avec une autre formulation, les tissus pré-imprégnés doivent être stockés dans un congélateur pour éviter leur lente polymérisation.

Lors de la lamination, les tissus sont posés dans le moule selon l'échantillonnage prévu. Pour assurer les propriétés mécaniques de la pièce, une compaction par mise sous vide est effectuée régulièrement lors de la dépose des tissus. La polymérisation se fait ensuite par chauffage sous vide avec la possibilité d'ajouter une pression additionnelle dans un autoclave.

Du fait de la formulation de la résine, ce procédé est beaucoup plus propre pour l'opérateur que la voie humide. Moins de précautions particulières sont donc nécessaires quant à la toxicité des produits.

La cuisson des pré-imprégnés peut parfois occasionner des coûts énergétiques élevés. En plus de cela, il est facile de cuire de petites pièces mais des pièces comme des ailes d'avions ou des coques de bateau de plusieurs dizaines de mètre demande l'achat d'un four ou d'un autoclave de grande taille très coûteux.

La mise en œuvre avec des pré-imprégnés est donc plus chère que le moulage au contact mais donne des pièces avec des meilleures performance. Cette technique est généralement utilisée dans les applications tel que l'aéronautique, la F1, la coupe de l'America etc.

Plusieurs autres méthodes de production sont possibles pour mettre en œuvre les tissus pré-imprégnés : l'utilisation d'un ATL (automatic tape layering) ou d'un AFP (automatic fiber placement) pour la dépose des plis ou encore l'utilisation de presse pour le compactage et la cuisson. A titre informatif, un résumé de ces différentes méthodes est

proposé dans le document suivant :

[https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Prepreg\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf)

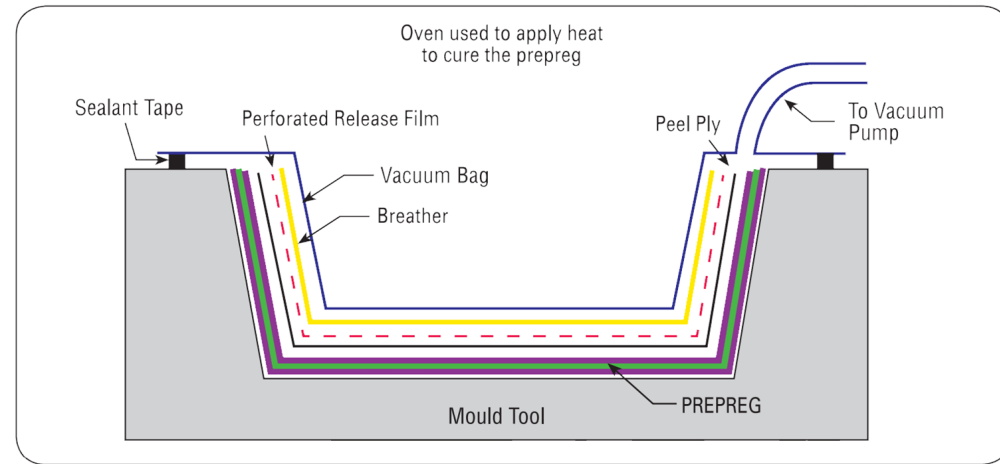


Figure 5 : Les éléments de la mise en œuvre pour les pré-imprégnés

Source : <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>

Éléments d'aile de l'Airbus A350XWB fabriqués en carbone pré-imprégné

Source : [airbus.com](http://airbus.com)



Catamaran Classe C de Hydos.ch réalisé en pré-imprégnés NTPT pour la petite coupe de l'America 2015

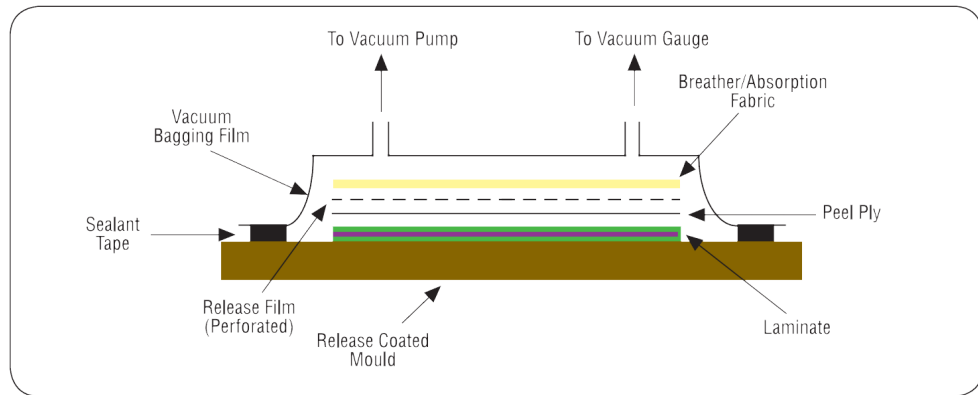
Source : [decision.ch](http://decision.ch)

# LE COMPACTAGE ET LES CONSOMMABLES

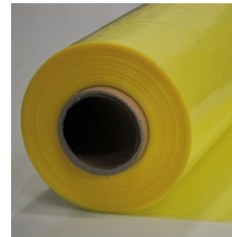
Lors du laminage, il est impératif que le compactage des couches soit fait de manière adéquate. Dans le cas contraire, des porosités apparaîtront dans l'épaisseur du composite engendrant une baisse des propriétés mécaniques (module, résistance), et une augmentation des risques de fissuration prématurée sous charge (baisse de la résistance en fatigue).

Pour des raisons économiques, le compactage se fait la plupart du temps par mise sous vide de la pièce, donc avec une pression de compactage d'environ 1 bar. Cependant, pour certaines applications haute performance (aéronautique ou spatial par exemple) les pièces sont compactées dans un autoclave pendant la cuisson. L'autoclave permet un contrôle de la température de cuisson couplé à l'application de pression forte, pouvant généralement aller jusqu'à 10 bars. Cela permet de fortement réduire le taux de porosité et ainsi d'augmenter les propriétés mécaniques de la pièce.

Pour les pré-imprégnés ou pour le moulage au contact, un nombre important de consommables est utilisé pour le compactage sous vide et la cuisson. Ces consommables sont à usage unique et participent à l'empreinte écologique trop importante des matériaux composites. Néanmoins, ils sont pour le moment la seule solution pour contrôler certains phénomènes et assurer la qualité des pièces finales. Ces consommables sont détaillés dans la figure 6 et ci-contre.



## MILIEU Extérieur



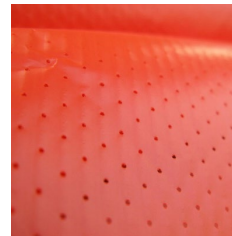
### La bâche (*vacuum bag*)

Elle assure l'étanchéité de la mise sous vide et par conséquent le bon compactage des couches. Pour les grandes pièces, le contrôle de l'étanchéité peut prendre plusieurs heures. La pression de compactage est en général de 1bar, mais peut être diminuée avec un régulateur de pression ou augmentée par l'utilisation d'un autoclave.



### Le feutre (*breather*)

Le feutre ou tissu de pompage a deux fonctions : d'une part il pompe la résine en surplus dans le composite et d'autre part il favorise la circulation d'air dans la bâche et permet de créer une pression homogène sur la pièce.



### Le perforé (*perforated film*)

Le film perforé a pour but de limiter le passage de la résine du composite vers le feutre. En variant le nombre de films ou de trous, on varie la résistance du passage de la résine. Ce tissu a donc une très grande influence sur le taux final de résine dans la pièce.



### Le tissu d'arrachage (*peel ply*)

En fibre de verre téflonisée, il permet de détacher les consommables de la pièce après le démoulage. Il permet aussi d'obtenir une surface rugueuse pour favoriser l'adhésion de couches ultérieures (gel-coat ou laminage d'autres composite). Il sert aussi de protection mécanique avant la finition de la pièce.

## Pièce COMPOSITE

Figure 6 : Les consommables nécessaires à la mise sous-vide

Source : <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>

# LE TP

Le TP consiste en la mise en œuvre de pièces composites par voie humide et avec des tissus pré-imprégnés. Vous serez donc amené à fabriquer 3 plaques différentes : 2 par moulage au contact avec des fibres de verre (avec et sans enrobage-sizing) et 1 avec des tissus pré-imprégné en fibres de lin. Le but du TP sera de se familiariser avec ces différents procédés, et de préparer les échantillons qui seront ensuite testés dans le TP endommagement après impact.

## Moulage au contact

Fraction volumique de fibres ( $v_f$ ) voulue: 12 %

Dimensions  $300 \times 200 \times 3$  [mm] ( $L \times l \times t$ )

Les matériaux utilisés seront les suivants:

### **1. Matte de fibres de verre avec enrobage (sizing)**

GSM fibres:  $235 \text{ g/m}^2$

Densité du verre  $\rho_{\text{verre}}$ :  $2.55 \text{ g/cm}^3$

### **2. Matte de fibres de verre sans enrobage (sizing)**

GSM fibres:  $110 \text{ g/m}^2$

Densité du verre  $\rho_{\text{verre}}$ :  $2.55 \text{ g/cm}^3$

## **Résine époxy L-235 (SuterKunststoffe AG)**

Rapport résine-durcisseur en poids: 100:35 Densité du mélange résine-durcisseur  $\rho_{\text{résine}}$ :  $1.2 \text{ g/cm}^3$

Ce non-tissé de verre ayant une orientation aléatoire des fibres, les plis seront empilés simplement

## A FAIRE AVANT LE TP

A l'aide des dimensions des plaques et de la formule du CPT (*cured ply thickness*) permettant de calculer l'épaisseur d'un pli cuit :

$$cpt = \frac{GSM}{V_f \cdot \rho_f}$$

Où GSM est le grammage du tissu utilisé,  $V_f$  est la fraction volumique de fibre et  $\rho_f$  la densité du matériaux utilisés pour les fibres.

- Déterminer le nombre de couches de fibres nécessaires pour atteindre une épaisseur de 3mm.
- Déterminer les quantités de résine et de durcisseur nécessaires pour atteindre le  $V_f$  voulu avec 1.4 comme facteur de sécurité.

## A FAIRE APRES LE TP

A la suite du TP, le poids et le épaisseur réelles de la plaque produite vous seront envoyés. Pour comparer vos prédictions théoriques avec les valeurs expérimentales de votre plaque, vous devrez donc :

- Comparer l'épaisseur calculée avec le CPT et l'épaisseur réelle.
- Re-calculer le taux de fibre de la plaque à l'aide du volume réel de la plaque.
- Re-calculer le taux de fibre de la plaque à l'aide de la masse de la plaque.
- Déduire de ces résultats le taux de porosité dans le laminé.

## Pièces pré-imprégnées

### Stratifié Cross-ply

Dimensions  $330 \times 240$  [mm] ( $L \times l$ )

Les matériaux utilisés seront les suivants:

#### 1. **Fibre de lin twill (ampliTex 5040 – IMP 503Z HT – Bcomp)**

Fraction volumique de fibres: 52 %

GSM fibres:  $300 \text{ g/m}^2$

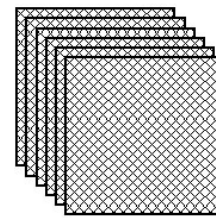
Densité du lin  $\rho_{\text{lin}}$ :  $1.54 \text{ g/cm}^3$

Densité de la résine  $\rho_{\text{résine}}$ :  $1.2 \text{ g/cm}^3$

Stratifié à 6 plis:

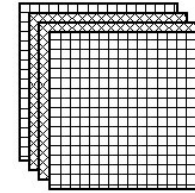
- Séquence d'empilement:  $[0/90_6]$

Vous recevrez des plaques de pré-imprégné de dimension  $480 \times 320 \text{ mm}^2$



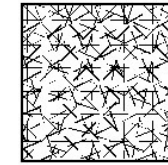
REFERENCE CROSSPLY,

$[\pm 45^\circ]_{3S}$   
 $\pm 45^\circ$  T300 Stitch-Bonded  
Mats/Urethane Matrix



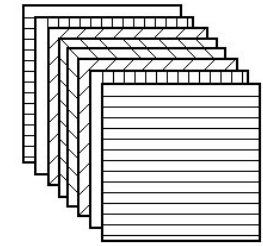
QUASI-ISOTROPIC,

$[0/90/\pm 45^\circ]_S$   
 $\pm 45^\circ$  T300 Stitch-Bonded  
Mats/Urethane Matrix



CHOPPED FIBER,

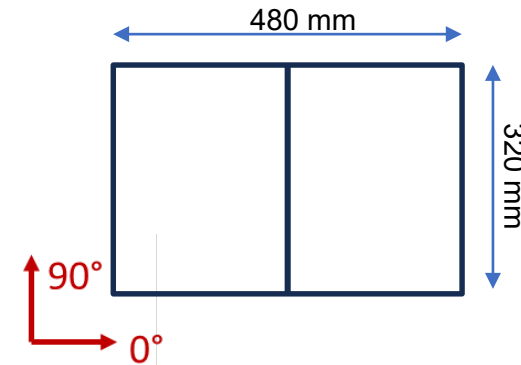
Zoltek Panex 33 -  
seven-Split, 46K  
Urethane Matrix



QUASI-ISOTROPIC,  
 $[0/90/\pm 45^\circ/\pm 45^\circ]_{2S}$   
AS-4C Unidirectional tape  
Polyphenylene Sulfide (PPS) Matrix

Types de construction de laminés

Source: *Durability-Based Design Criteria for a Quasi-Isotropic Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Automotive Composite, 2006*



## A FAIRE AVANT LE TP

- A l'aide des dimensions des plaques, le nombre de pli et de la formule du CPT (*cured ply thickness*) donnée à la page précédente, calculer l'épaisseur finale théorique de chaque plaque.

## A FAIRE APRES LE TP

- Comparer les épaisseurs théoriques et finales du laminé
- Comparer les masses avant et après cuisson
- Expliquer l'origine des potentielles différences
- Discuter de quelle séquence d'empilement on aurait pu utiliser pour améliorer l'aspect isotrope de la plaque (en utilisant 8 plis au lieu de 6) ?
- Quelle serait alors la notation de cette séquence ?



# QUESTIONS

Les réponses aux questions peuvent être trouvées dans le protocole, dans l'article en annexe et certaines seront aussi discutées lors du TP.

1. De manière générale, comment varient les propriétés mécaniques d'un stratifié avec l'augmentation de sa Tg et pourquoi ? Quelles sont les avantages et inconvénients d'une Tg élevée ?
2. Quelles sont les risques lors de la cuisson d'une pièce épaisse de grand volume ?
3. Mis à part l'effet de compactage, quels sont les effets du vide sur le laminé lors de sa cuisson ?
4. Quels sont les avantages du compactage en autoclave par rapport au vide seul ? *À combiner avec 3*
5. *Pourquoi on met des plis avec des orientations différentes ?*
6. Classer par ordre de coût de production et de performance mécanique une pièce produite par voie humide, par pré-imprégné ou par infusion, et expliquer pourquoi.
7. Pourquoi doit-on sortir les tissus pré-imprégnés du congélateur 24h avant de les laminer ?
8. Que se passe-t-il lorsque l'on stocke un tissu pré-imprégnés hors d'un congélateur pendant plusieurs semaines ?
9. Le diagramme ci-dessous (figure 8) donne l'allure générale de la viscosité d'une résine thermodurcissable pendant sa réticulation (pré-imprégné). Que se passe-t-il aux points 1, 2 et 3 ?

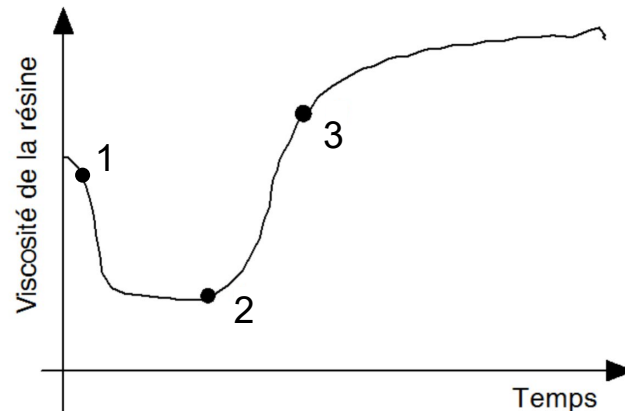


Figure 8 : Evolution de la viscosité d'une résine thermodurcissable en fonction du temps.

# Références

HexPly preg technology

[https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Prepreg\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf)

Gurit : guide to composites

<https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>

## ANNEXE

C. Barrere and F. Dal Maso, "Résines époxy réticulées par des polyamines : structure et propriétés," *Rev. l'institut français du pétrole*, vol. 52, no. 3, pp. 317–335, 1997

## PLAN DU RAPPORT

**Page de garde** : Logo, dates, noms, titre du TP, nom du cours

**Introduction** : présentation rapide du moulage au contact et des pré-imprégnés, du TP, du but du TP.

**1. Théorie** : résumé de ce que vous avez compris du moulage au contact, des pré-imprégnés et de la Tg en lisant le protocole du TP ou d'autres sources, rapide description et comparaison des autres méthodes qui existent ...etc.

**3. Partie expérimentale** : équipement et matériel nécessaires. Présentation de la préparation du TP (calculs des CPT et des masses de résine). Puis description des différentes étapes du TP (fabrication des plaques) en précisant au besoin les choses à ne pas oublier, à ne pas faire, les spécificités de certains tissus, méthodes etc.

**4. Résultats et discussion** : Discussion des résultats : leurs exactitudes, les sources d'erreur potentiels pendant le TP, l'impact des porosités sur le composite etc.

**5. Réponses aux questions**

**6. Conclusion du TP** : Résultats de votre discussion, influence des méthodes de production sur le composite final, fiabilité de ces procédés pour des pièces techniques ou structurelles etc.

**7. Références si besoin**