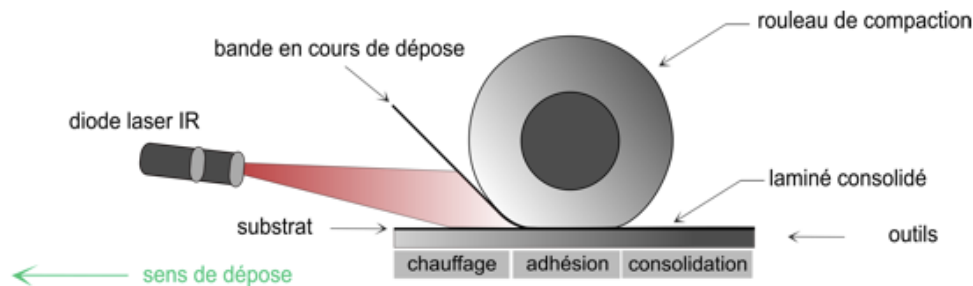


Procédés Composites SLC - Travaux Pratiques

## Simulation thermique du procédé de dépôt de bandes avec chauffage laser (AFP)



### Contexte :

On s'intéresse au procédé de dépôt de bande automatisé à chauffage laser tel qu'introduit dans le cours. Des bandes composites à matrice thermoplastique **PEEK/Carbone** sont déposées par couches successives sur un substrat par l'intermédiaire d'un rouleau de compaction. L'adhésion est réalisée par diffusion moléculaire de la matrice thermoplastique, ce qui s'obtient grâce au chauffage laser, qui permet d'obtenir une source de chaleur très dense, et d'uniformité bien contrôlée grâce à la présence d'optiques spécifiques. On supposera ici l'optique parfaite et permettant de générer un faisceau d'intensité uniforme carré de côté  $b=12\text{mm}$ .

En pratique, le rouleau est fait d'une mousse silicone qui permet, de par sa déformabilité, d'obtenir une zone de contact suffisamment large. Une géométrie simplifiée vous est proposée dans le **modèle Comsol** fourni.

Les paramètres de contrôle du procédé sont : la vitesse d'avance de la tête de dépôt  $V$ , la puissance du faisceau laser  $Q$ , sa largeur  $b$ , son angle d'incidence par rapport au substrat  $\alpha$ , et son décalage par rapport au nip-point (point de contact des bandes supérieure et inférieure)  $Dx$ . En pratique, quelle que soit la vitesse d'avance, les paramètres doivent être réglés de façon à obtenir (i) une température suffisante au nip-point,  $T > T_f = 345^\circ\text{C}$ , et (ii) en respectant un critère de non dégradation du PEEK qui est  $T < 550^\circ\text{C}$ .

On se place dans une approche de type *tranche stationnaire*. Pour ce faire, on se place dans un repère lié à la tête de dépôt et on « regarde » la matière passer. Tout se passe donc comme si le composite s'écoulait en suivant la géométrie imposée par le substrat et le rouleau. Les équations présentent donc un terme convectif, tout comme à l'intérieur d'un fluide. Dans le module thermique de Comsol, on utilise donc un modèle de thermique dans les fluides. La vitesse de fluide doit alors être définie par l'utilisateur pour bien suivre la géométrie. Ceci a été fait dans le modèle fourni. On suppose ensuite que le régime est établi d'un point de vue thermique, c'est-à-dire qu'on est dans une phase de dépôt où tous les effets transitoires sont supposés disparus.

L'équation de la chaleur résolue est ainsi de la forme :

$$\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\mathbf{k} \nabla T) = 0$$

Où  $\rho$  et  $C_p$  sont respectivement la masse volumique et la capacité calorifique massique, et où  $\mathbf{k}$  est le tenseur de conductivité. Ces 3 grandeurs peuvent en toute généralité dépendre de la température. Le vecteur  $\mathbf{v}$  désigne ici le champ de vitesse.

Dans le modèle proposé, la réflectivité normale hémisphérique (RNH) du composite en fonction de l'incidence a été rentrée sous forme tabulée à partir de mesures expérimentales. Elle traduit le

fait que plus l'incidence est rasante, plus le laser est réfléchi par les surfaces qu'il impacte. Dans le premier modèle proposé, les réflexions n'ont pas été prises en compte.

**Travail demandé :** (le TP fera l'objet d'un compte-rendu de 10 à 15 pages)

- 1) Recenser et comprendre dans un premier temps l'ensemble des paramètres et fonctions du modèle et ainsi que les conditions aux limites appliquées. Vous analyserez en particulier les champs de vitesse imposés, ainsi que la façon dont est imposé le flux du laser.
- 2) Modifier les paramètres matériaux pour coller à des valeurs plus réalistes, les données ont été mises de façon approximative. Dans un premier temps, vous pourrez prendre une conductivité isotrope pour le composite. Dans un second temps, essayer d'imposer une conductivité anisotrope, avec les valeurs indiquées ci-dessous.
- 3) Etudier la convergence numérique du problème en jouant sur le maillage et en analysant l'évolution de la solution. Vous rechercherez un compromis entre la précision et la vitesse de calcul. Attention ! pour les fortes vitesses et fortes puissances, le **maillage** doit certainement être plus fin que celui proposé initialement. Vous adapterez le modèle numérique pour essayer de couvrir les situations les plus extrêmes.
- 4) Etudier la thermique du procédé en analysant l'influence de différents paramètres : puissance, vitesse de dépose, angle d'incidence du laser, valeur de décentrage du laser par rapport au nip-point.
- 5) *Amélioration du modèle*: prise en compte de la première réflexion et évaluation des conséquences sur les profils de température. Vous pourrez alors reprendre certains points de l'étude faite en 4)
- 6) Effet du nombre de couches : à partir de combien de couches déposées peut-on considérer que la condition sur la surface inférieure du substrat n'a plus d'influence sur la thermique du procédé ?
- 7) Questions facultatives :
  - a. Introduire un modèle de cicatrisation sur l'interpli qui vient d'être soudé pour calculer un taux d'adhésion.  

$$\frac{\partial}{\partial t} (D_h^4) = \frac{1}{t_R(T)}$$
 où le temps de reptation  $t_R$  est supposé suivre une loi de type Arrhénius :  

$$t_R(T) = t_{ref} \exp\left(\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$
 La valeur de l'énergie d'activation  $Q$  sera ajustée pour obtenir des effets plus ou moins réalistes.
  - b. Ajouter un modèle de fusion/ cristallisation du PEEK pour observer ses effets sur la thermique du procédé.

*Matériaux :*

Le rouleau sera supposé en silicone. Il y en a un proposé dans la bibliothèque de Comsol, mais ses propriétés ne semblent pas réalistes. Vous rechercherez les valeurs typiques pour ce type de matériau.

Pour le composite, les valeurs suivantes pourront être choisies :

$$\rho = 1500 \text{ kg.m}^{-3} ; C_p = 1200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} ; k_T = 0.45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} ; k_L = 5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Les couches déposées ont typiquement une épaisseur de 0.2mm.

Les paramètres du modèle cinétique et du modèle d'adhésion vous seront communiqués en séance en cas de besoin.

*Modélisation de la source laser :*

La source laser est modélisée par un flux de chaleur surfacique uniforme dont l'intensité dépend de la puissance, de l'incidence et du coefficient d'absorption  $\alpha=1-RNH$ .

*Paramètres du procédé :*

Industriellement, la vitesse de dépose varie de 10mm/s quand on cherche à faire de la consolidation in-situ, jusqu'à 500mm/s et plus quand on cherche des taux de production plus élevés. Pour chaque vitesse que vous étudierez, et pour une incidence donnée, vous essaieriez d'adapter la puissance pour rester dans les critères usuels de dimensionnement :

- $T > T_f$  au point de contact
- $T_{max} < T_{degradation}$ ,  $T_{max}$  étant la température maximale atteinte.