

Simulation du procédé de soudage laser par transparence de polymères thermoplastiques

Mariana ILIE^{1,2}, Jean-Cristophe KNEIP¹, Simone MATTEI^{1*}, Alexandru NICHICI²

¹ Institut Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 5209, Département IRM,
IUT Le Creusot, 12 rue de la Fonderie - 71200 Le Creusot

² Université « Politehnica » Timișoara, Faculté de Génie Mécanique,
Mihai Viteazu, Nr 1, 300222 Timisoara, Romania

* (auteur correspondant : s.mattei@iutlecreusot.u-bourgogne.fr)

Résumé – Nous présentons la simulation numérique du procédé de soudage laser par transparence de polymères thermoplastiques, limitée au cas des matériaux semi-transparents ayant une matrice amorphe et non absorbante, contenant des charges optiquement diffusantes vis-à-vis du rayonnement laser incident. La démarche suivie est fondée sur la théorie de Mie et sur une approche statistique du phénomène de diffusion. L'étude met en évidence les facteurs influents du phénomène de diffusion, en utilisant la méthode des plans d'expériences. Les simulations réalisées sont comparées à des essais expérimentaux.

Nomenclature

c	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>
I	intensité, $W.m^{-2}$,	α coefficient d'absorption, m^{-1}
κ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$
q	densité volumique de puissance $W.m^{-3}$,	<i>Indices et exposants</i>
r	rayon m	i incident
T	température $^{\circ}C$	o transmis

1. Introduction

Le soudage par faisceau laser de matières thermoplastiques est un procédé d'assemblage innovant qui ouvre des perspectives dans le domaine industriel. Elle diffère des techniques conventionnelles du fait qu'elle offre une grande flexibilité, une haute précision, et est une technique polyvalente. Le procédé de soudage par transparence nécessite que le faisceau laser traverse un premier polymère transparent à la longueur d'onde du laser, et soit absorbé à la surface du second matériau à assembler. L'énergie déposée reste confinée à l'interface, provoquant ainsi le chauffage des deux plaques et la formation du cordon soudé. L'efficacité de ce type de soudage est fortement dépendante des propriétés optiques des deux matériaux à assembler [1] : absorptivité, transmittivité, réflectivité, diffusivité optique ainsi que des propriétés thermiques : capacité thermique massique, conductivité, masse volumique.

Les lasers à diodes ayant une longueur d'onde de $0,8 \mu m$, les propriétés optiques intervenant sont celles du proche infrarouge. Dans ce domaine, la plupart des matériaux polymères sont peu réfléchissants, avec une réflectivité qui se situe au tour de 4%, et assez transparents. La transparence joue un rôle décisif en ce qui concerne l'énergie qui arrive à l'interface et est fortement influencée par l'ajout des charges dans la matrice du polymère. Dans cet article, le rôle de ces hétérogénéités sur la diffusion du faisceau est tout d'abord étudié. L'effet thermique du faisceau laser est ensuite modélisé. La modélisation permet de prévoir la température à l'interface. Les résultats du modèle sont comparés à des mesures thermographiques obtenues sur la face arrière de l'assemblage en cours de l'irradiation laser.

2. Diffusion optique du faisceau laser

L'atténuation d'une radiation électromagnétique à travers un milieu est due à un phénomène d'extinction, dans lequel l'absorption et la diffusion peuvent coexister également ou prédominer l'un sur l'autre en fonction des propriétés optiques du milieu. La famille de polymères thermoplastiques présentant une grande variété de matériaux amorphes ou semi-cristallins, avec des charges, des adjuvants, des pigments ou colorants, on se trouve dans le cas d'un milieu qui comporte des hétérogénéités très diverses et avec des tailles d'échelles variées. Dans ces conditions, une modélisation de la propagation d'un faisceau laser paraît essentielle.

2.1. Modélisation numérique de la diffusion du faisceau laser

La solution analytique exacte des équations de Maxwell pour la diffusion d'une onde plane par une sphère homogène, isotrope et non magnétique est donnée par la théorie de Mie depuis 1908 [3]. Pendant les dernières années, des efforts intensifs ont été consacrés pour surmonter les limitations de cette théorie et la généraliser aux différents profils laser et formes asymétriques de particules [2] [3]. La propagation d'un rayonnement dans un milieu diffusant peut être décrite à partir de cette théorie qui fournit les paramètres de diffusion pour une seule particule et faisant le passage à un ensemble de particules par une méthode statistique telle que la méthode de Monte Carlo. Un code de calcul basé sur ces deux théories a été développé pour décrire le comportement d'un faisceau laser à travers un milieu semi-transparent. La méthode de Monte Carlo permet la simulation statistique des trajectoires d'un grand nombre de photons, dans le milieu considéré, jusqu'à ce qu'ils atteignent une surface de détection prédéfinie. Dans notre étude, le milieu considéré est plan, parallèle, infini dans les directions x et y , d'épaisseur L dans la direction z , non absorbant, contenant des particules sphériques aléatoirement distribuées, et éclairé par un faisceau Gaussien à incidence normale (fig. 1). Le calcul permet d'obtenir le profil de la distribution de la puissance du faisceau laser à la sortie du milieu diffusant (fig. 2). Le modèle numérique a été validé sur des échantillons en PMMA chargés avec de la silice avec deux concentrations et plusieurs diamètres des particules [4].

2.2. Etude des facteurs influençant le phénomène de diffusion

Pour étudier le comportement des systèmes diffusants réels dans le proche infrarouge, rencontrés dans le cas du soudage des polymères par laser, on utilise un scénario pour les simulations numériques qui implique :

- ✓ une matrice homogène d'indice 1,49 et d'épaisseur 1 mm
- ✓ des particules sphériques, non absorbantes et mono- dispersées avec :
 - un diamètre compris entre 0,01 et 100 μ m
 - une concentration de 0,3 (en % massique)
 - un indice de réfraction compris entre 1,7 et 2.

Les premières études effectuées montrent l'importance du diamètre des particules sur l'atténuation du faisceau (fig. 3 et 4). Lorsque le diamètre des particules est comparable à la longueur d'onde, l'atténuation de l'intensité peut atteindre 20%. Ce domaine est connu comme étant la résonance de Mie [5]. Pour des particules de diamètres inférieurs à 0,2 μ m et supérieurs à 10 μ m le milieu se comporte comme un milieu homogène de point de vue

optique. On observe aussi que le maximum d'atténuation du faisceau ne correspond pas à la valeur maximale de l'épaisseur optique.

Afin d'avoir une première idée sur l'importance de chaque facteur d'influence et de leurs éventuelles interactions sur l'intensité transmise par un milieu inhomogène, on applique la méthode des plans d'expérience pour le domaine de Mie. Ce type d'analyse suppose une approximation de la fonction de réponse par un modèle linéaire pour le domaine exploré, on divise donc l'intervalle mentionné en deux sous-domaines : le premier compris entre 0,05 μm et 0,45 μm et le deuxième entre 0,45 μm et 15 μm . Pour les trois autres facteurs d'influence les niveaux de variation sont :

indice de réfraction	1,7 : niveau bas,	1,9 : niveau haut
concentration massique	0,1 : niveau bas,	0,2 : niveau haut
épaisseur du milieu	1 mm : niveau bas,	2 mm : niveau haut

La hiérarchisation des facteurs, pour le domaine étudié, en fonction de l'influence exercée sur l'atténuation du faisceau laser, ainsi que les interactions entre eux, sont données en figure 5.

Le graphique de Pareto standardisé affiche les effets dans l'ordre décroissant de signification permettant l'identification rapide des facteurs et des interactions qui jouent un rôle important dans le processus. La longueur de chaque barre est proportionnelle à la valeur de la statistique t calculée pour l'effet associé. Toute barre au-delà de la ligne verticale est statistiquement significative au niveau de signification de 5%. Dans notre cas, on observe que tous les facteurs sont significatifs et on distingue trois interactions importantes entre eux : diamètre - indice de réfraction, diamètre – épaisseur, diamètre – concentration. Le graphique des interactions montre la moyenne de la fonction de réponse (intensité transmise I_t) pour chaque niveau du facteur - diamètre lorsque les trois facteurs (indice de réfraction, concentration et épaisseur) varient. On note que si le diamètre est à son niveau bas, ce qui est le cas des milieux chargés avec des particules de petit diamètre (fig. 5 a), les effets sur l'atténuation de la radiation des trois autres facteurs sont très faibles. En revanche, pour de particules dont le diamètre est proche de 0,45 μm une petite variation de l'indice, de la concentration, ou de l'épaisseur du milieu, aura des effets importants sur l'atténuation du faisceau.

3. Couplage modèle optique – modèle thermique

A partir du modèle de diffusion optique, on peut déterminer la source thermique à l'interface des deux matériaux à assembler en fonction de l'atténuation de l'intensité et l'élargissement du faisceau à la sortie du milieu semi-transparent. On obtient une intensité équivalente I entrante ou sortante, corrélée au nombre de photons "lancés" ou "reçus" et à leurs énergies respectives.

La densité de puissance à la sortie du milieu diffusant s'écrit :

$$P_o = P_i \cdot \frac{I_o}{I_i} \quad (1)$$

Si on considère que le faisceau laser est absorbé dans le deuxième matériau suivant la loi de Beer – Lambert, dans une épaisseur très mince, le rayon restant constant sur cette épaisseur et égal au rayon sortant du milieu diffusant, la source thermique prend la forme :

$$q_v = \begin{cases} 0 & z < d_1 \\ \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot r_i^2} \cdot \frac{I_o}{I_i} \cdot e^{-\frac{2 \cdot r^2}{r_o^2}} \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot (z - d_1)} & z > d_1 \end{cases} \quad (2)$$

avec : $\frac{I_0}{I_i}$: rapport entre les intensités (transmise/incidente) obtenu avec le modèle optique ;

r_0, r_1 : rayons à $1/e^2$ pour les deux faisceaux (transmis, incident) du modèle optique ; α : coefficient d'absorption pour le matériau absorbant ; P : la puissance réelle du laser ; d_1 : l'épaisseur du matériau diffusant ; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

La température est déterminée par la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur :

$$\vec{\nabla} \left[k(T) \vec{\nabla} T \right] + q_v = \rho \cdot c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

avec $k(T)$: conductivité thermique, ρ : masse volumique, et c : capacité thermique massique.

Le transfert thermique entre l'échantillon et le milieu peut être écrit sous la forme :

$$-k(T) \cdot \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h \cdot (T_\infty - T) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

\vec{n} étant le vecteur normal à la surface, h coefficient de transfert de chaleur par convection, ε l'émissivité et T_∞ , la température du milieu environnant.

Ce modèle est employé dans un code de simulation numérique par éléments finis (COMSOL) qui permet d'estimer l'évolution du champ de température pendant l'irradiation laser dans les deux matériaux à assembler.

Pour la validation expérimentale on utilise comme matériau diffusant une plaque en PMMA de 2 mm épaisseur, chargée avec de la silice de diamètre $5,5 \mu\text{m}$ et une concentration massique de 1,7%. Le matériau absorbant est une plaque en alliage ABS-PC chargée avec 11% de noir du carbone. L'évolution des températures de surface est enregistrée par une camera de thermographie FLIR ThermaCam S60 (domaine de longueur d'onde $7,5\text{-}13 \mu\text{m}$, résolution : 320×240 pixels, fréquence d'acquisition 50Hz). Les échantillons sont irradiés en mode continu avec un laser à diodes ($\lambda = 0,808 \mu\text{m}$), dont la distribution d'énergie du faisceau a un profil trapézoïdal (rayons caractéristiques $r_1=1,75 \text{ mm}$ et $r_2=3,47 \text{ mm}$). La puissance est de 0,28W. Dans une première étape on détermine le coefficient d'absorption de l'alliage ABS-PC (fig. 6), le meilleur ajustement a été obtenu pour une valeur de $19,5 \text{ mm}^{-1}$. Ensuite, grâce aux données obtenues avec le modèle optique on peut définir la source thermique à l'interface.

Tenant compte de la bonne corrélation entre les données simulées et mesurées (fig. 7), on peut considérer que le modèle développé est bien adapté à la modélisation du processus de soudage par laser. En faisant une corrélation entre les températures de surface mesurées par thermographie infrarouge et les températures simulées, on peut remonter par l'intermédiaire de ce modèle au champ de températures dans le volume du matériau polymère donc à la température atteinte à l'interface des deux matériaux.

A partir de ce modèle qui prend en compte les effets de diffusion du faisceau dans le matériau semi-transparent, et permet d'estimer le champ de température au sein du volume des deux matériaux à assembler, on peut identifier les paramètres pour lesquels on peut obtenir le soudage des deux composants. Si on prend le cas présenté plus haut, en réalisant des simulations pour deux valeurs de la vitesse de déplacement du faisceau (1 et 6 mm/s) et deux valeurs de la puissance laser (3,5 et 7 W) on peut estimer l'énergie linéique nécessaire pour le soudage de ceux-ci. Ainsi, sachant que la température de transition vitreuse du PMMA 105°C et que l'alliage ABS-PC a deux températures de transition vitreuse : 105°C et 145°C , on choisira une énergie linéique ($E_l = P/v \text{ [Jm}^{-1}\text{]}$) assurant une température à l'interface plus grande que 145°C (fig.8).

4. Conclusion

Les modèles numériques pour décrire la diffusion du faisceau par les particules contenues dans le polymère et les champs de température à l'intérieur et en surface des deux polymères concordent avec les valeurs déterminées expérimentalement. Il est donc possible, connaissant les propriétés thermophysiques des matériaux à assembler, ainsi que la taille, l'indice et la concentration des particules constituant les charges, de prédire la température à l'interface des deux matériaux. De la valeur de cette température dépend la faisabilité du procédé.

Références

- [1] S. W. Churchill and G. C. Clark. Light-scattering by very dense monodispersions of latex particles. Discuss. Farady Soc. 1960, vol. 30, p. 192-199.
- [2] G. Gouesbet, G. Grehan: Generalized Lorenz-Mie theory for assemblies of spheres and aggregates, *Journal of Optics I*, (1999), 706-712.
- [3] M. Mishchenko, J. Hovenier: Light Scattering by nonspherical particles, Academic Press, (2000).
- [4] M. Ilie, J-C Kneip, S. Matteï, A. Nichici, C. Roze, T. Girasole: Laser Beam Scattering Effects in non-absorbent inhomogenous Polymers: accepté pour publication dans *Journal of Optics and Lasers in Engineering*.
- [5] C. F. Bohren and D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. John Wiley & Sons, Inc. 1996, p. 530

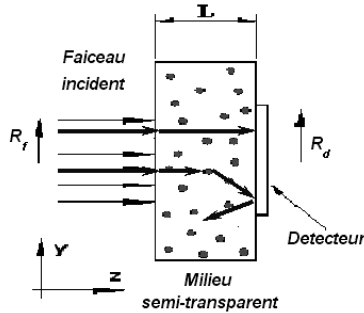


Figure 1 : Système considéré

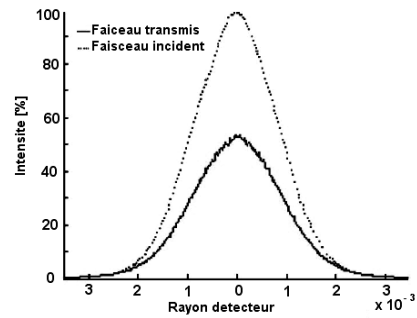


Figure 2 : Profils des faisceaux incident et transmis pour une plaque de 2mm chargée avec des particules de silice de diamètre 0,297 μ m et une fraction volumique de 0,001

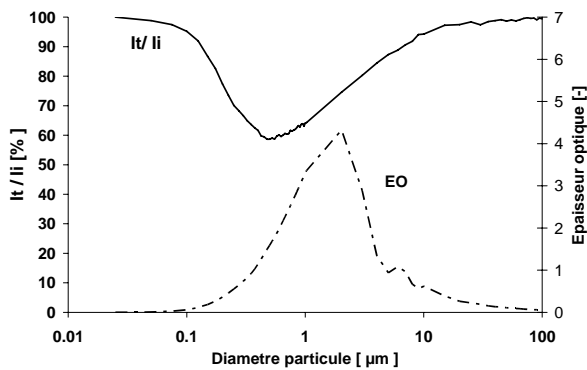


Figure 3 : Evolution du rapport des intensités (transmise/incidente) et de l'épaisseur optique du milieu en fonction du diamètre des particules pour un indice de particules de 1,7 et une concentration de 0,3%

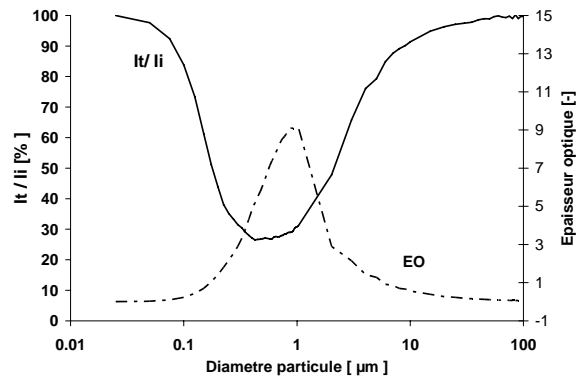


Figure 4 : Evolution du rapport des intensités (transmise/incidente) et de l'épaisseur optique du milieu en fonction du diamètre des particules pour un indice de particules de 1,9 et une concentration de 0,3%

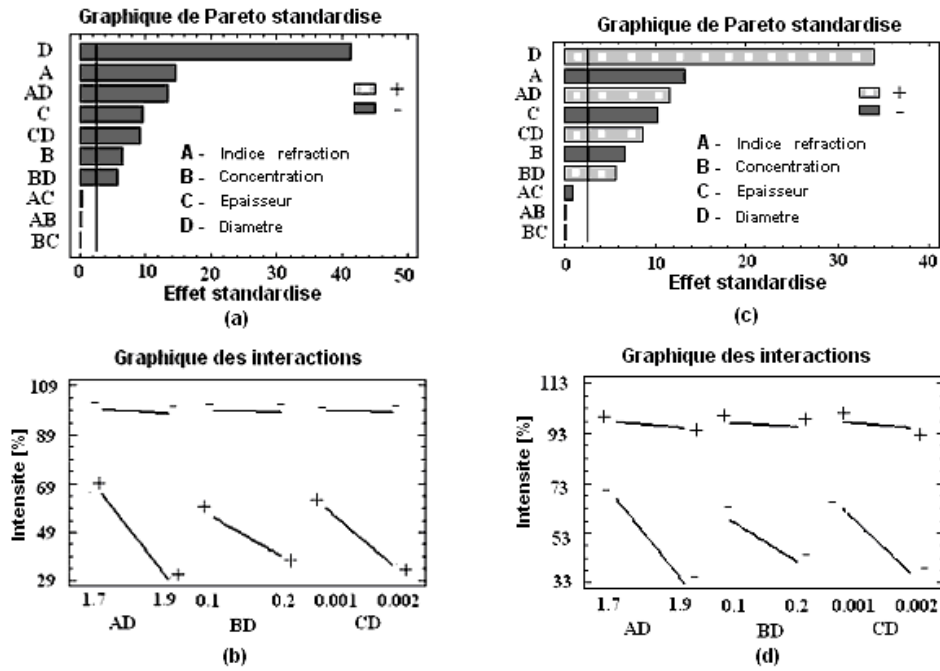


Figure 5 : Hiérarchisation des facteurs en fonction de leur influence et leurs interactions dans les deux sous-domaines : 0,05-0,45µm (a), (b) et 0,45-15µm (c), (d)

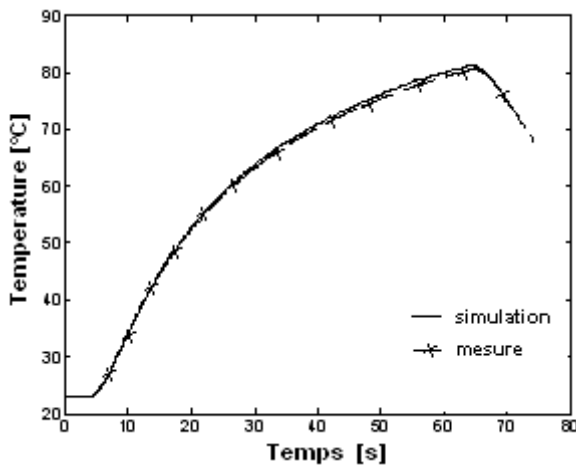


Figure 6 : Le profil thermique calculé et mesuré pour le centre du spot laser sur la face arrière de la plaque de l'ABS-PC

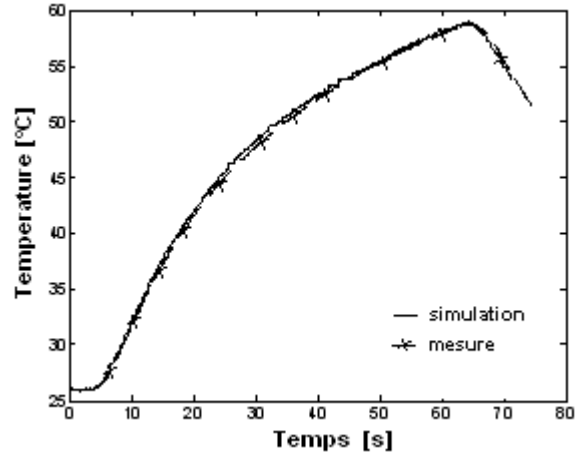


Figure 7 : Le profil thermique calculé et mesuré pour le couple ABS-PC et PMMA dans le centre du spot laser sur la face arrière de la plaque de l'ABS-PC

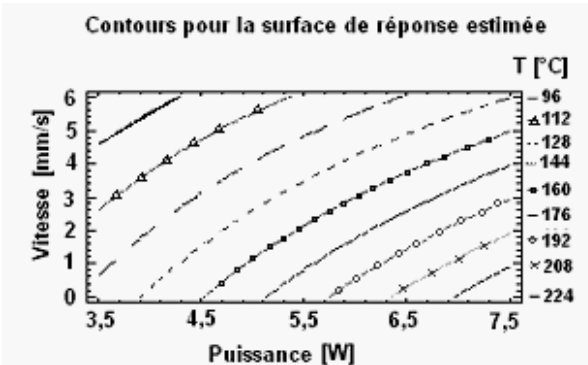


Figure 8 : L'influence de la puissance et de la vitesse du faisceau laser sur la température atteinte à l'interface de matériaux

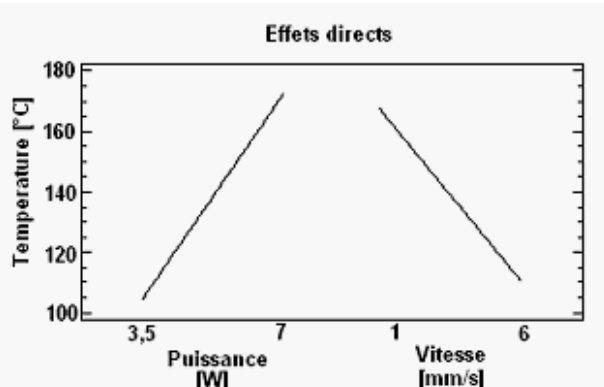


Figure 9 : Les effets de la puissance et de la vitesse du faisceau laser sur la température atteinte à l'interface de matériaux