

## ETUDE EXPERIMENTALE ET MODELISATION DE LA QUALITE DES INTERFACES DANS LE PROCEDE L-AFP

Le procédé AFP assisté laser (L-AFP) est aujourd'hui l'une des méthodes les plus prometteuses et novatrices pour la fabrication de pièces en composites à matrice thermoplastique.

Il permet la réalisation de pièces composites complexes, éventuellement de fortes épaisseur, avec des cadences de production compatibles avec les exigences du secteur aéronautique.

Développé depuis une quinzaine d'années maintenant, il arrive aujourd'hui à un bon niveau de maturité technologique, mais un certain nombre de verrous scientifiques persistent pour arriver à une parfaite maîtrise de la qualité des pièces produites. Le manque de connaissances fines de la physique et de la modélisation numérique limitent à ce jour la maîtrise du procédé en termes de qualité des interfaces pour des géométries complexes (cornières et autres courbures fortes, bossages, ...), en particulier si on souhaite aller vers le procédé dit "in-situ", où la pièce drapée en L-AFP posséderait déjà les propriétés finales souhaitées (porosité, cristallinité, résistance mécanique). Cette thèse vise à explorer ces interfaces, à identifier les facteurs clés de performance, et à développer des stratégies innovantes pour optimiser leur fabrication, leur utilisation dans un environnement industriel concurrentiel et répondre aux fortes sollicitations thermomécaniques associées aux pièces cibles.

Plus précisément, la thèse vise à améliorer la connaissance des phénomènes physiques et leur modélisation pour la prédiction de la qualité des interfaces, que ce soit pour les procédés in-situ ou d'agrafage (à vitesse très élevée). Cette qualité se caractérise par :

- 1) Un taux de porosité interfacial, encore appelé degré de contact intime ( $D_{ic}$ ). Celui-ci est déterminé par les conditions thermo-mécaniques engendrées par le passage du rouleau de dépose. Il est intimement lié à la résistance thermique de contact qui est un paramètre très important pour la prédiction de l'échauffement des tapes.
- 2) Un degré de cicatrisation, qui mesure le taux d'interdiffusion des macromolécules de polymères à l'interface ( $D_h$ ). Celui-ci est entièrement contrôlé par l'histoire thermique à partir de la mise en contact de la tape déposée sur son substrat, il dépend essentiellement du temps passé au-dessus d'une certaine température.
- 3) Un degré de cristallisation ( $c$ ) à l'interface qui, au même titre que le niveau d'adhésion, va impacter la tenue mécanique de l'interface, certaines propriétés mécaniques et performance globale de la pièce.
- 4) Un niveau de contraintes résiduelles engendré par la combinaison de la tension des fibres, de la pression du rouleau, des évolutions thermo-mécaniques et dimensionnelles de la matière lors de son refroidissement. Cette grandeur est difficilement mesurable mais est bien connue pour avoir des conséquences importantes sur les distorsions de pièces à l'échelle macroscopique. Il est aujourd'hui difficile d'estimer son impact sur la tenue mécanique de l'interface.

La thèse visera principalement les verrous scientifiques 1) à 3), en développant des méthodes de caractérisation expérimentales originales et des modélisations phénoménologiques simples. Les principaux verrous sont liés aux conditions thermiques extrêmes (900 à 9000 K/s) pour lesquelles il n'existe pas aujourd'hui d'outil expérimental adapté. Elle s'appuiera largement sur les appareils de caractérisation et les bancs spécifiques L-AFP du LTEN, ainsi que sur les outils numériques et modèles développés au cours des travaux précédents [1-9]. Le travail comportera une partie expérimentale importante (caractérisations thermiques, rhéologiques, DSC Flash, caractérisation mécaniques locales des interfaces, essais mécaniques spécifiques) couplée à du contrôle non destructif et de manière assez équilibrée à des aspects numériques (transferts radiatifs, méthode inverse, couplages multiphysiques).

Contact :

Merci d'envoyer CV et lettre de motivation aux adresses suivantes :

- Steven Le Corre, [steven.lecorre@univ-nantes.fr](mailto:steven.lecorre@univ-nantes.fr)
- Camille Vernejoux, [camille.vernejoux@safrangroup.com](mailto:camille.vernejoux@safrangroup.com)

## **REFERENCES**

- [1] Le Louët, V., Rousseau, B., Le Corre, S., Boyard, N., Tardif, X., Delmas, J., & Delaunay, D. (2017). Directional spectral reflectivity measurements of a carbon fibre reinforced composite up to 450 C. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, 882-890.
- [2] Levy, D. Heider, J. Tierney, J. W. Gillespie, Inter-layer thermal contact resistance evolution with the degree of intimate contact in the processing of thermoplastic composite laminates, *Journal of Composite Materials* 48 (4) (2014) 491–503.
- [3] Le Reun, A., Le Louët, V., Le Corre, S., & Sobotka, V. (2024). Numerical simulation at the micro-scale for the heat transfer modelling in the thermoplastic composites laser-assisted AFP process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 179, 108010.
- [4] Le Louët V., Etude du comportement thermique de bandes composites pré-imprégnées au cours du procédé de fabrication AFP avec chauffage laser, PhD Thesis, Université de Nantes, 2018
- [5] Badri, M. A., Jolivet, P., Rousseau, B., Le Corre, S., Digonnet, H., & Favennec, Y. (2018). Vectorial finite elements for solving the radiative transfer equation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 212, 59-74.
- [6] Storti, B. A., Albanesi, A. E., Peralta, I., Storti, M. A., & Fachinotti, V. D. (2022). On the performance of a Chimera-FEM implementation to treat moving heat sources and moving boundaries in time-dependent problems. *Finite Elements in Analysis and Design*, 208, 103789.
- [7] Storti, B. A., Le Reun, A., & Le Corre, S. (2024). Accurate 3D modeling of laser-matter interaction in the AFP process by a conductive-radiative FEM approach. *Materials Research Proceedings*, 41.
- [8] Benarbia, A., Sobotka, V., Boyard, N., & Roua, C. (2024). Modelling the Melting Kinetics of Polyetheretherketone Depending on Thermal History: Application to Additive Manufacturing. *Polymers*, 16(10), 1319.
- [9] Le Louët, V., Le Corre, S., & Sobotka, V. (2024, July). Experimental bench for the determination of the thermal contact resistance between tapes in the AFP process. In *21st European Conference on Composite Materials (ECCM21)*.