
Influence des propriétés thermiques des pré-impregnés composites thermoplastiques pour l'enroulement filamentaire laser

Benoît Courtemanche¹, Kévin Fouyer², Anaïs Barasinski²

1. CETIM, Technocampus Composite
Allée du Chaffault, 44340 Bouguenais, France
benoit.courtemanche@cetim.fr

2. GeM UMR CNRS, Centrale Nantes
1 rue de la Noe, 44300 Nantes
anaïs.barasinski@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ. L'enroulement filamentaire laser de composites pré-impregnés thermoplastiques requiert une analyse multiphysique, aboutissant à la maîtrise des paramètres de transformation. Une telle analyse est généralement réalisée en considérant que la matière première est une « matière étalon ». Par conséquent, les conclusions peuvent être biaisées par la variabilité de cette matière, qui présente au mieux une variabilité naturelle, au pire des défauts locaux ou répétés. Ainsi, dans ce travail, l'objet d'étude est le comportement thermique des composites pré-impregnés, indépendamment des conditions de fabrication. Les anomalies thermiques détectées sont ensuite mises en perspective avec les irrégularités de la matière, telles que des variations d'épaisseurs ou la présence de porosités.

ABSTRACT. The laser filament winding of preimpregnated thermoplastic tapes requires a multiphysical analysis, leading to the control of transformation parameters. Such an analysis is generally carried out by considering the raw material, the tape, as a "standard material". Consequently, conclusions can be biased due to the material variability, which presents at least a natural variability, at worst local or repeated defects. Therefore, in the present work, the subject under study is the thermal behavior of the tape, independently of the manufacturing conditions. The detected thermal irregularities are then put into perspective with the irregularities of the material, such as thickness variations or porosities.

MOTS-CLÉS : propriétés thermiques, composite thermoplastique, enroulement laser, placement de tape, contrôle en ligne, thermographie infrarouge, épaisseur, porosité.

KEYWORDS: thermal properties, thermoplastic composite, laser winding, tape placement, on-line monitoring, infrared thermography, thickness, porosity.

DOI:10.3166/RCMA.28.69-88 © Lavoisier 2018

Extended abstract

In the development of laser winding of thermoplastic composites, the raw material, called tape, must be as constant as possible to avoid distorting the conclusions. Natural variability is unavoidable. But in recent works, CETIM has highlighted the major influence of tape variability, which may question research strategies such as design of experiments. This initial observation led to the development of a bench for tape thermal measurement.

Firstly, measurement methods are evaluated and compared on a static tape. Two thermal imaging cameras are selected. One is the embedded control camera of the winding head, the other is a specific infrared thermography camera. The thermal images are compared with other measurements performed with thermocouples of 25 μ m, sufficiently reactive to follow the sudden temperature changes (above 1000°C/s).

In a second step, a control bench is developed, allowing thermal measurements over long lengths of tape, under constant heating conditions.

This work makes it possible to demonstrate the possibility of continuously detecting the local variation of tape void content. From a given tape where porosity controls are less than 1% on average, it is possible to detect an isolated concentration of 5% porosity.

Similarly, with another material, the thickness variations are correlated with changes in thermal behavior. The observed deviations, of the order of 100 μ m, can lead to deviations of more than 50°C under reduced heating conditions, i.e. more than 100°C at actual process temperatures.

This work on tape variability for thermoplastic laser winding opens the way to a better control of development and optimization of the manufacturing process. Indeed, by detecting the defects of the tape, one can avoid misinterpretations of results, within the framework of design of experiments methods for instance.

The control presented here was performed without modifying tape structure. Therefore, the same tape can be used afterward for manufacturing, or for health inspections. In addition, this method can be easily adapted to on-line control and production monitoring.

Finally, a future modeling and simulation work published soon will make it possible to generalize the influence of tape defects on the thermal variables, with the final aim of defining the admissibility criteria of the raw materials.

1. Introduction

Les matériaux composites thermoplastiques (TP) montrent des avantages très importants pour les industriels. Leurs conditions de stockage et de fabrication sont en effet très favorables, comparées à celles des composites thermodurcissables plus classiques. Techniquement, les composites thermoplastiques présentent également

un intérêt dans la résistance aux chocs. Ces matériaux sont donc de bons candidats dans les applications de réservoirs de stockage.

L'enroulement filamentaire assisté par chauffage laser de pré-imprégnés thermoplastiques (ou tapes) est l'un des procédés de fabrication de réservoirs en composites (cf. figure 1). La consolidation du composite y est réalisée par soudage instantané de la matière déposée grâce à un galet de compactage. Ce procédé requiert une analyse multiphysique, aboutissant à la maîtrise des paramètres de transformation.



Figure 1. Réservoir composite thermoplastique conçu, fabriqué et testé en éclatement à plus de 900bar par le CETIM

L'analyse du procédé est généralement réalisée en considérant que la matière première, le tape carbone-TP par exemple, est une « matière étalon » (Grouve, 2012). Par conséquent, les conclusions peuvent être biaisées par la variabilité de cette matière, qui présente au mieux une variabilité naturelle, au pire des défauts locaux ou réguliers. L'objet de notre étude est donc le comportement thermique du tape, indépendamment des conditions de fabrication. Les anomalies thermiques détectées sont ensuite mises en perspective avec les irrégularités de la matière, telles que des variations d'épaisseurs ou la présence de porosités.

Le procédé d'enroulement laser de tapes thermoplastiques est représenté sur la figure 2.

Le défi principal de ce procédé vient des ordres de grandeur des paramètres physiques. Par exemple, à des vitesses de dépose de tape de l'ordre de 1 m/s, les températures varient de plus de 1000 °C/s lors des phases de chauffe et de refroidissement (Stokes-Griffin, 2015), impliquant des phénomènes de conduction thermique très rapides et à très forts gradients (Weiler *et al.*, 2017). Ce comportement fortement dynamique et potentiellement instable pose la question des conditions de fabrication « nominales » et des variations « raisonnables » autour des points de fonctionnement connus (Di Francesco *et al.*, 2017).

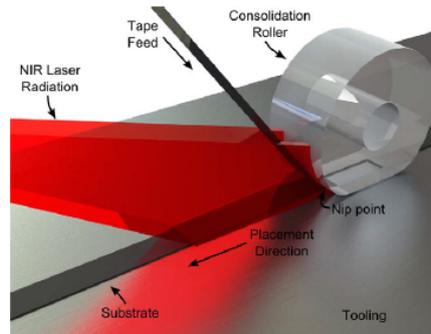


Figure 2. Vue schématique du procédé d'enroulement laser de tapes thermoplastiques (Stokes-Griffin, 2015)

2. Enjeux dans l'optimisation du procédé

La maîtrise du procédé signifie comprendre et décrire les conditions de fabrication acceptables. Celles-ci sont appelées « fenêtre procédé ». La « fenêtre procédé » la plus simple est illustrée sur la figure 3, délimitée par une zone de puissance insuffisante pour la fusion du thermoplastique et une zone de puissance trop forte entraînant sa dégradation thermique.

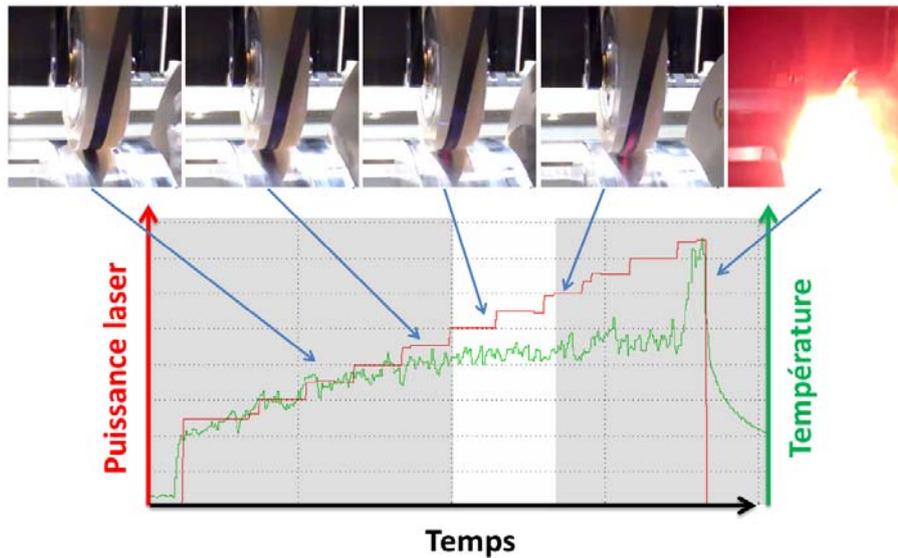


Figure 3. Représentation simplifiée de la fenêtre procédé, encadrée par une zone de puissance insuffisante pour la fusion du TP (à gauche) et une zone de puissance trop forte entraînant sa dégradation thermique (à droite)

Les signes visuels (fumées, fibres incandescentes, flammes) sont des observations grossières de la fenêtre procédé. De façon plus fine, il s'agit de déterminer la plage de fonctionnement à partir de laquelle le polymère TP fondu est suffisamment fluide pour permettre la conformation des surfaces à souder, mais sans dépasser les températures de dégradation des matériaux pour ne pas entraîner de baisse de performance.

La performance des structures peut prendre de nombreuses définitions. On retient ici la performance au sens mécanique, qui peut s'exprimer à travers de nombreux essais (traction, compression, flexion, cisaillement) et qui est généralement corrélée avec le taux de porosité. Le CETIM a également développé un essai spécialement pour ce procédé, l'essai de pelage double tambour, présenté sur la figure 4 avec d'autres moyens de caractérisation.

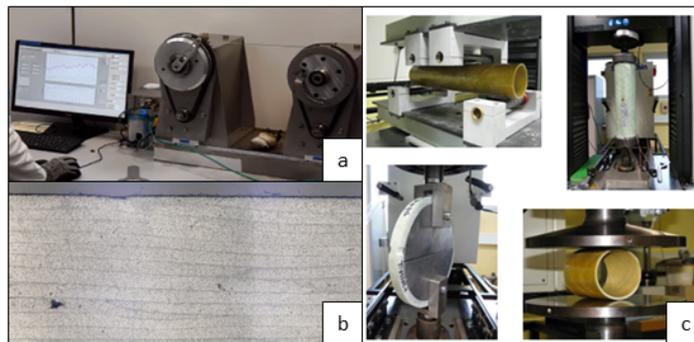


Figure 4. Exemple d'essais mécaniques : pelage double tambour (a) développé par le CETIM ; essais classiques de traction, compression, flexion, cisaillement (c), généralement corrélés avec le taux de porosité obtenu par examens de coupes micrographiques (b)

L'intérêt du pelage double tambour (ou DDP, *Double Drum Peel*) est de permettre de réaliser un essai en pilotant l'angle de pelage, afin d'éviter les phénomènes perturbateurs comme la rupture de fibres ou l'effet *stick-slip*.

Associer les performances mécaniques aux conditions de fabrication suppose que les autres facteurs, comme par exemple la qualité de la matière première, soient constants. Ceci est illustré sur la figure 5.

En réalité, la matière première étant variable, il y a une intrusion de défauts, aléatoires ou constants, pouvant perturber une condition de fonctionnement précédemment maîtrisée. Ce procédé réel est illustré sur la figure 6.

La section suivante démontre l'influence majeure des variations de tape dans les performances finales, et donc dans la compréhension du procédé.

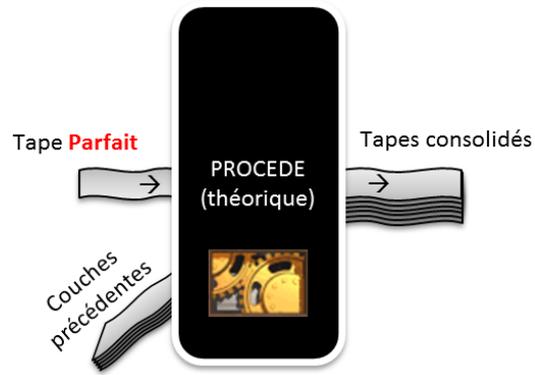


Figure 5. Illustration d'un procédé théorique, sans variation de matière première

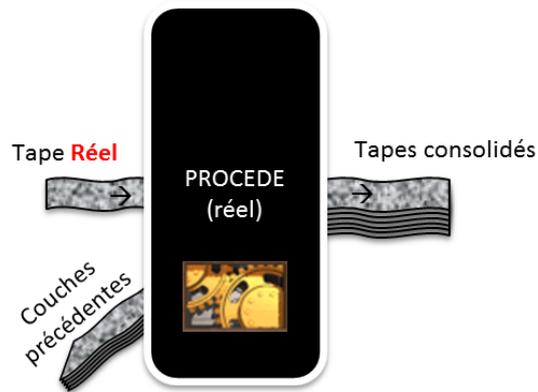


Figure 6. Illustration du procédé réel, avec une matière première variable

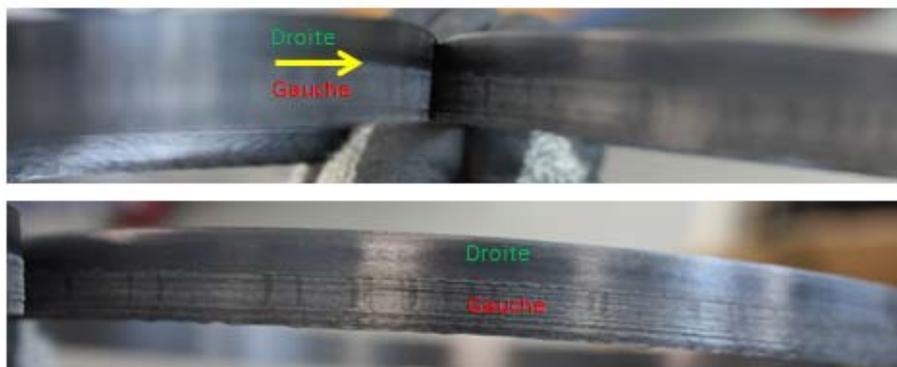


Figure 7. Nette asymétrie gauche/droite après un essai de pelage double tambour

3. Preuve de l'influence du tape

Le CETIM a réalisé une série de plans d'expérience dont les résultats seront publiés prochainement. L'une des grandeurs de sortie du plan d'expérience était la résistance au pelage dans l'essai de pelage double tambour. L'objectif était de corréler les conditions de fabrication avec les performances mécaniques. Un phénomène non désiré est apparu sur des composites carbone-PEEK (C-PEEK), caractérisé par une nette asymétrie dans certains faciès de pelage, illustrée figure 7.

En vérifiant les enregistrements de fabrication des éprouvettes concernées, une nette asymétrie dans l'image thermique du tape pendant le chauffage laser (figure 8) a été constatée.

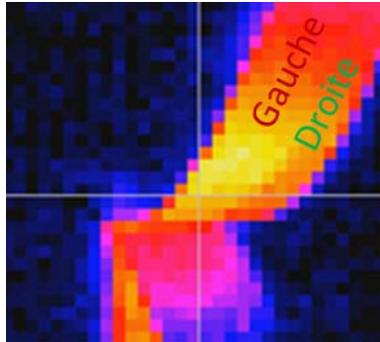


Figure 8. Nette asymétrie gauche/droite dans l'image thermique du tape pendant le chauffage laser

Des prélèvements de matière réalisés entre les éprouvettes ont permis une analyse de la matière première dans son état initial. Cette investigation a démontré que le manque de répétabilité des essais était causé par une forte variation d'épaisseur du tape entre sa moitié gauche et sa moitié droite. Ceci a été observé par coupe micrographique (figure 9).

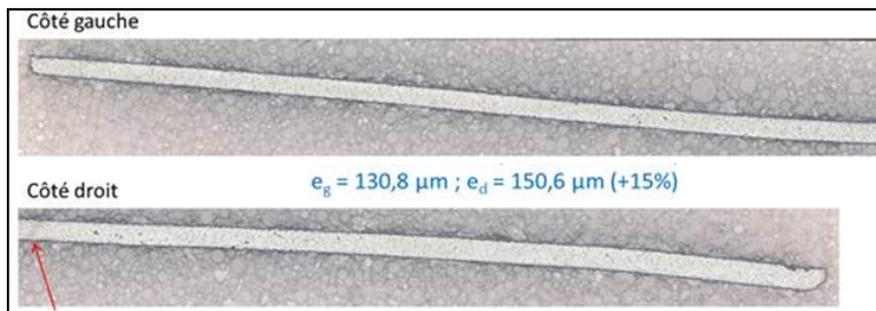


Figure 9. Coupe micrographique du tape montrant un défaut géométrique important : écart d'épaisseur gauche/droite de 15 %

L'écart d'épaisseur de 15 % entre la partie gauche et la partie droite du tape explique que la partie gauche, plus fine, chauffe plus et permet le soudage, alors que la partie droite, plus épaisse, est insuffisamment chauffée, entraînant l'absence de soudage constatée sur la figure 7. Ce phénomène a pu être mis en évidence grâce à la technique de plan d'expérience, qui analyse la limite de la fenêtre procédé, c'est-à-dire la frontière entre le soudage correct et incorrect. Ce phénomène aurait pu passer inaperçu dans une production classique généralement réalisée en milieu de fenêtre.

Ceci démontre que les caractéristiques du tape utilisé comme matière première ont une influence majeure sur la thermique du procédé d'enroulement laser. Ce travail se positionne donc en amont et permet de compléter les informations aval du contrôle en ligne du procédé, qui est un sujet de recherche très actif (Schmidt *et al.*, 2016 ; 2017).

4. Analyse de la variabilité

4.1. Démarche expérimentale

Le cœur de l'étude est le comportement thermique du tape. Le comportement thermique s'exprime dans la réponse en température lorsqu'on apporte de l'énergie au tape. L'énergie est apportée sous forme de rayonnement laser de longueur d'onde comprise entre 800 nm et 1070 nm, comme pour le procédé lui-même (*cf.* figure 10).

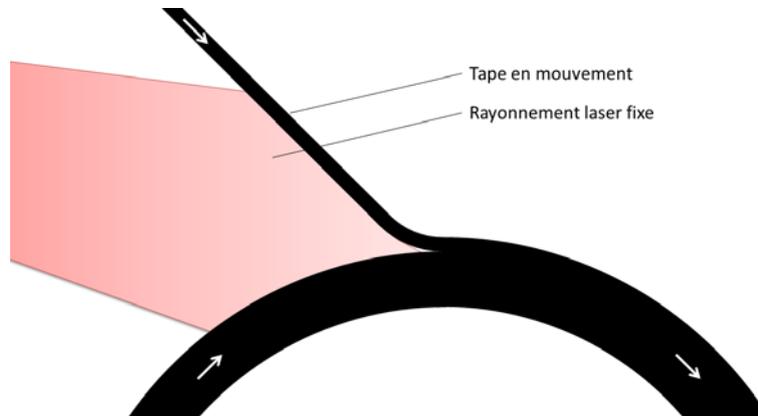


Figure 10. Configuration du procédé d'enroulement filamentaire laser

On s'intéresse d'abord au comportement du tape pendant la chauffe. En configuration normale, le tape défile devant le rayonnement laser. La chauffe est caractérisée par la puissance du rayonnement et le temps d'exposition qui correspond au temps de traversée du spot laser. Ainsi, dans le premier montage (figure 11), on réalise un flash laser qui simule une durée d'exposition d'un tape dans l'air, à puissance imposée.

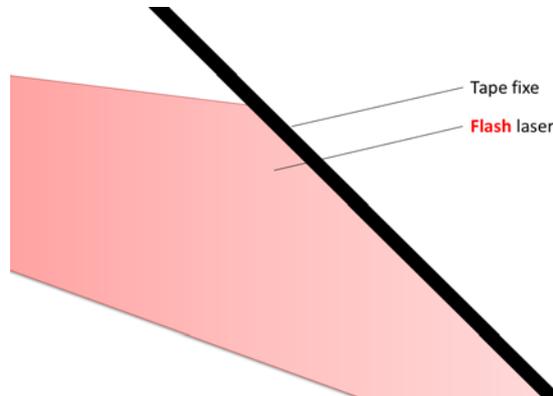


Figure 11. Configuration du premier montage expérimental

Deux moyens de mesure sont comparés pour évaluer la pertinence des mesures : une caméra thermique et un thermocouple de $25\ \mu\text{m}$ permettant de suivre les variations brutales de température (figures 12 et 13).

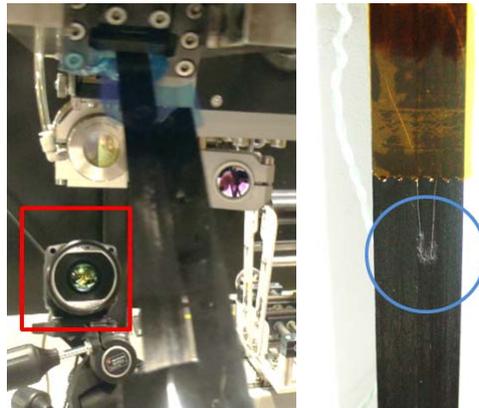


Figure 12. Moyens de mesure du premier montage expérimental : Caméra thermique (gauche), thermocouple (droite)

En superposant les courbes de mesure par caméra thermique et par thermocouple, on souhaite régler le coefficient d'émissivité du tape pour avoir la meilleure cohérence possible, tout en restant dans un cas simple, c'est-à-dire que la dépendance température-émissivité n'est pas prise en compte. Sur la figure 13, on observe des pics de température qui correspondent à l'arrêt du laser. Ces pics sont suivis d'une chute rapide de température sur quelques dizaines de millisecondes, puis d'un refroidissement plus lent. Ce phénomène n'était pas recherché, mais une

expérience complémentaire a été mise au point pour approfondir l'analyse (figure 14). Dans cette nouvelle expérience, on soude deux thermocouples sur les faces opposées du tape. Les mesures sont présentées sur la figure 15.

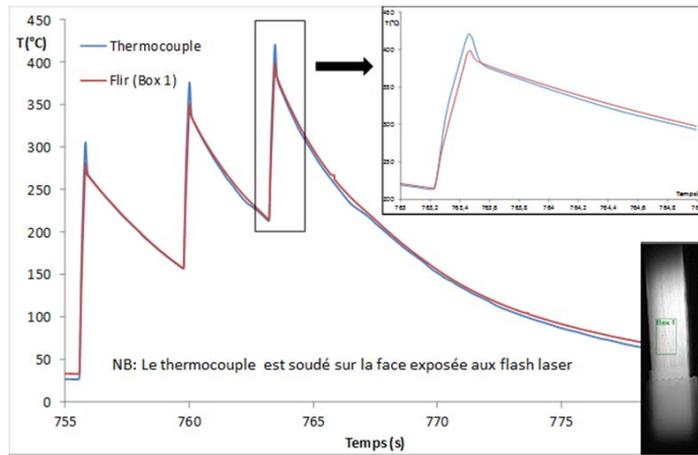


Figure 13. Superposition des mesures par caméra thermique et thermocouple, permettant de régler le coefficient d'émissivité du tape

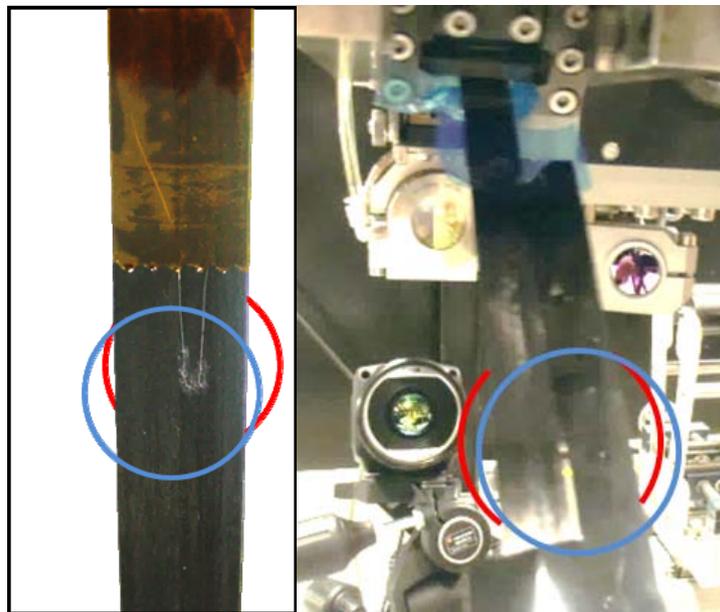


Figure 14. Thermocouples soudés sur chaque face du tape (gauche) ; configuration du montage expérimental (droite)

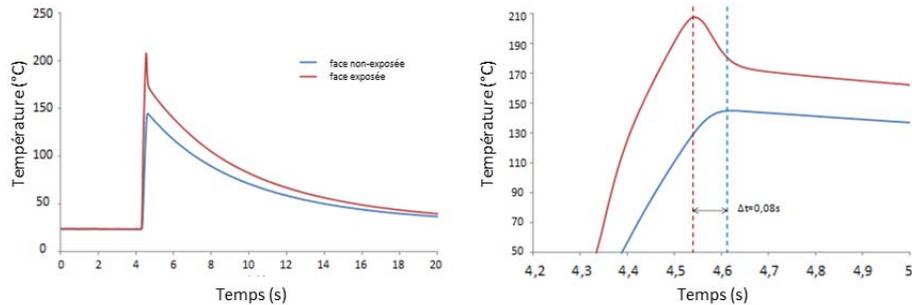


Figure 15. Superposition des mesures des thermocouples installés sur les faces opposées du tape (rouge : face exposée ; bleu : face non-exposée au laser)

De façon intéressante, le bref pic de température au moment de l'extinction du laser est à nouveau observé. De plus, ce phénomène n'est pas observé sur la face opposée au laser. Celle-ci présente un maximum de température 80 ms après l'extinction du laser et, au même instant, la face côté laser change de régime de refroidissement.

Pour interpréter ce phénomène, on observe qu'avant le maximum de température, les faces du tape ont un écart de température important, il y a donc un fort gradient thermique dans l'épaisseur, entretenu par l'apport de chaleur constant du laser. L'extinction du laser est suivie d'une courte période de 80 ms durant laquelle le gradient diminue fortement, mettant en évidence une phase de conduction thermique de la face exposée (où la température diminue rapidement) vers la face opposée (où la température augmente encore). Enfin, après cette phase, les deux faces présentent un refroidissement plus lent, attribué à la convection naturelle dans l'air. Les conditions de cette expérience sont simplifiées car on s'affranchit des variations thermiques de contact propres au procédé réel (Leon *et al.*, 2015). La diffusion de chaleur longitudinale, pendant la phase de refroidissement, ne semble pas intervenir sur la baisse de température.

L'observation des régimes dominés soit par la conduction, soit par la convection est un apport supplémentaire de cette étape. L'objectif initial étant de valider la cohérence des mesures thermiques – ce qui est fait –, les expériences se poursuivent avec la mise au point d'un banc de mesure thermique.

4.2. Principe et pertinence du banc de mesure thermique

Les mesures précédentes ont été faites sur tapes fixes pour des raisons pratiques, mais cette configuration est différente de celle du procédé réel. Ainsi, un banc de mesure est développé pour contrôler la température d'un tape en mouvement (figure 16). De façon avantageuse, cette évolution permettra aussi de contrôler de grandes longueurs de tape.

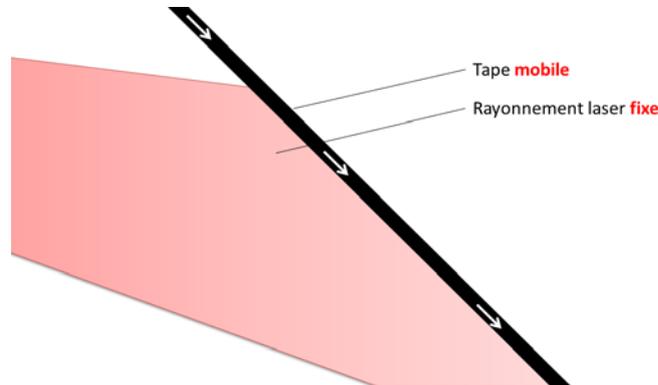


Figure 16. Configuration du banc de mesure thermique

On s'intéresse à un tape d'environ 2 m de longueur défilant devant un faisceau laser constant, partant du principe qu'un tape sans défaut est nécessairement constant thermiquement lorsque la chauffe est constante. Pour évaluer facilement la répétabilité de la mesure, le tape est attaché sur lui-même pour former une boucle (figure 17). Ainsi, les 2 m de tape tournent en boucle devant le faisceau laser et la caméra thermique de la tête de dépose (dont on a contrôlé la cohérence avec les autres moyens de mesure au préalable).

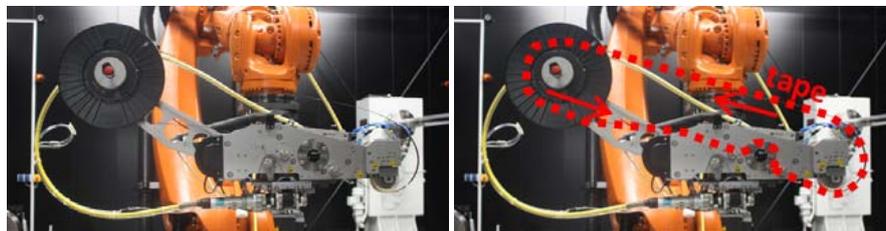


Figure 17. Tête d'enroulement filamenteuse équipée d'un tape qui tourne en boucle devant le faisceau laser et la caméra thermique

Le tape est entraîné par un dispositif extérieur, à une vitesse constante de 7 m/min. Le laser émet une puissance constante de 150 W, suffisamment faible pour rester éloigné de la température de fusion de la matrice thermoplastique. Ainsi, il sera possible de réaliser des analyses de tape *a posteriori*, en faisant l'hypothèse que cette chauffe n'a pas modifié son état. Lorsque la boucle de 2 m a défilé 10 fois devant la caméra thermique, l'expérience est stoppée. On obtient les courbes présentées sur la figure 18.

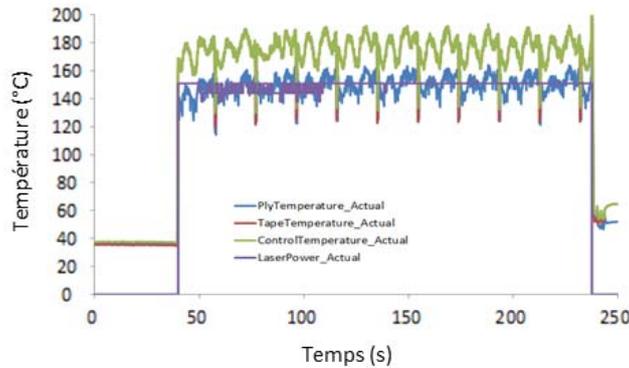


Figure 18. Enregistrement thermique d'une boucle de 2m de longueur, contrôlée 10 fois (courbe verte)

La mesure retenue est la courbe verte *Control Temperature*. Comme attendu, le signal est périodique et présente 10 périodes. Un pic négatif marque le début et la fin de chaque passage de boucle (ce point froid est lié à la superposition locale des extrémités du tape). Pour évaluer la répétabilité de la mesure, les 10 périodes sont superposées sur la figure 19.

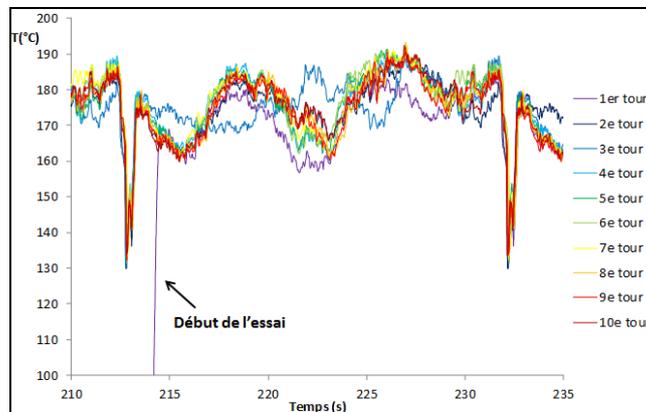


Figure 19. Superposition des 10 périodes de l'enregistrement thermique présenté figure 18

On constate une relative homogénéité des mesures à l'exception des 3 premières périodes. Ceci est attribué à la montée en températures des différents composants mécaniques à proximité du tape. En supprimant ces 3 premières périodes, la répétabilité de mesure est très bonne (figure 20).

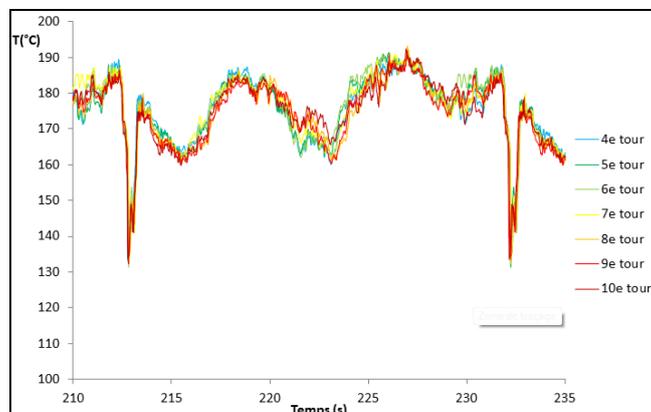


Figure 20. Superposition des 7 périodes finales de l'enregistrement thermique présenté figure 18, validant la répétabilité de la mesure

Cette corrélation de mesure étant obtenue sur plusieurs boucles, on conclut que les variations thermiques sont bien créées par des variations dans le tape. Par la suite, on s'intéressera à identifier les causes de ces variations.

4.3. Résultats principaux

4.3.1. Détection de porosités

Dans cette expérience, un tape réputé de « bonne qualité » est utilisé. Il s'agit d'un tape carbone-PEEK, dont les taux de porosité sont relativement faibles et présentant une épaisseur relativement stable. Ce tape a été considéré comme une matière de référence pour les mesures thermiques, et les résultats ont été généralement très stables. Cependant, sur l'un des échantillons, deux zones anormales sont apparues, se traduisant par les pics de températures numérotés 3 et 4 sur la figure 21.

Grâce au protocole expérimental qui impose une faible chauffe du tape (180 °C alors que la fusion du PEEK est à 343 °C), il est possible d'analyser localement le carbone-PEEK dans la zone d'anomalie sans qu'il y ait eu de transformation majeure de la matière lors du contrôle.

Les coupes micrographiques du tape prélevées en zone 3 présentent des taux de porosité anormalement élevés (de l'ordre de 5 %), alors que les prélèvements hors des zones 3 et 4 conduisent à des taux moyens inférieurs à 1 % (cf. figure 22).

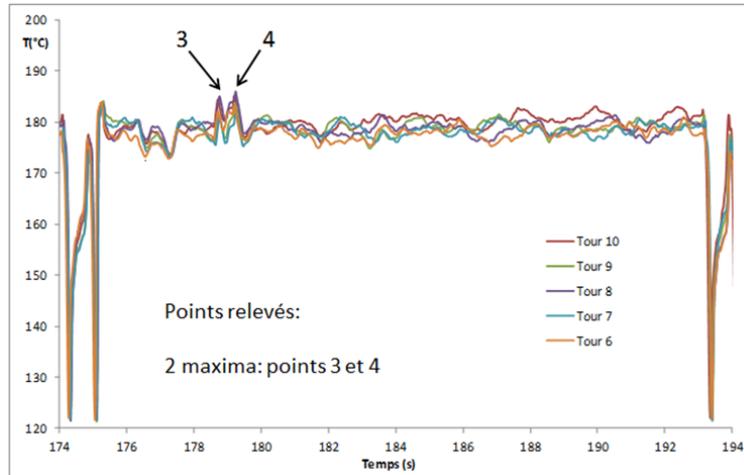


Figure 21. Mesure thermique sur un tape présentant deux pics de températures (repères 3 et 4)

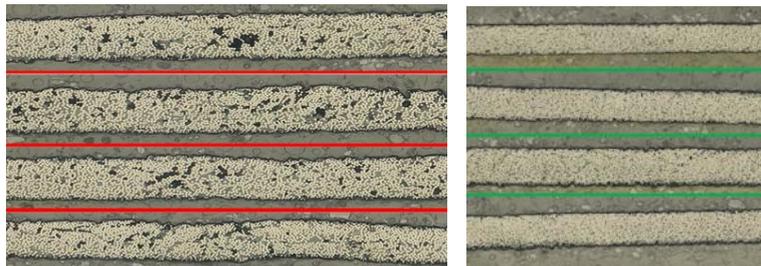


Figure 22. Coupes micrographiques prélevées au repère 3 de la figure 21 approchant les 5 % de porosités (à gauche) ; coupe micrographiques en dehors des zones 3 et 4 (à droite) – l'épaisseur des tapes est de 150 μm environ

Cette expérience, qui s'apparente à une thermographie infrarouge embarquée sur la tête d'enroulement, montre qu'il est possible de détecter une variation locale anormale du taux de porosité sur la longueur de la bobine. Ce contrôle, réalisé à basse température pour les besoins de l'analyse, pourrait être déployé aux températures effectives de transformation (de l'ordre de 400 °C), permettant ainsi un contrôle en ligne de la matière.

4.3.2. Détection d'épaisseur anormale

Dans cette section, on analyse plus en détail l'échantillon utilisé pour valider la répétabilité du banc de mesure. Il s'agit d'un tape carbone-PEEK présentant de

fortes variations d'épaisseur. Lors de cet essai, référencé BT33, on observe 4 zones d'intérêt : deux minima locaux et deux maxima locaux de température (figure 23).

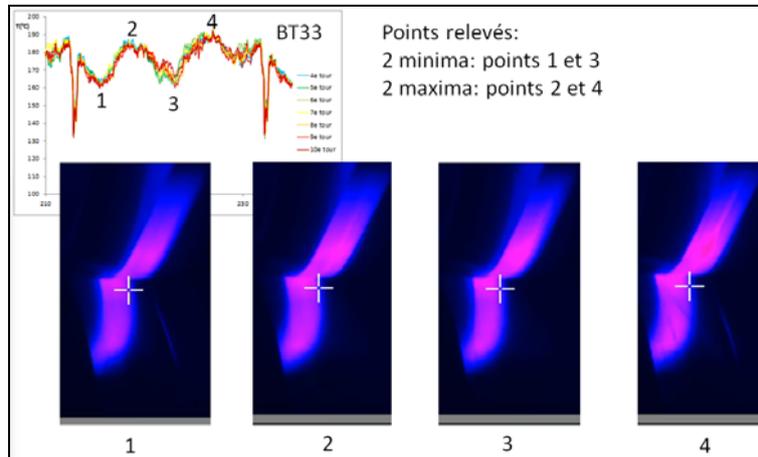


Figure 23. Vues de la caméra thermique embarquée aux 4 extrema locaux de température lors du contrôle thermique du tape

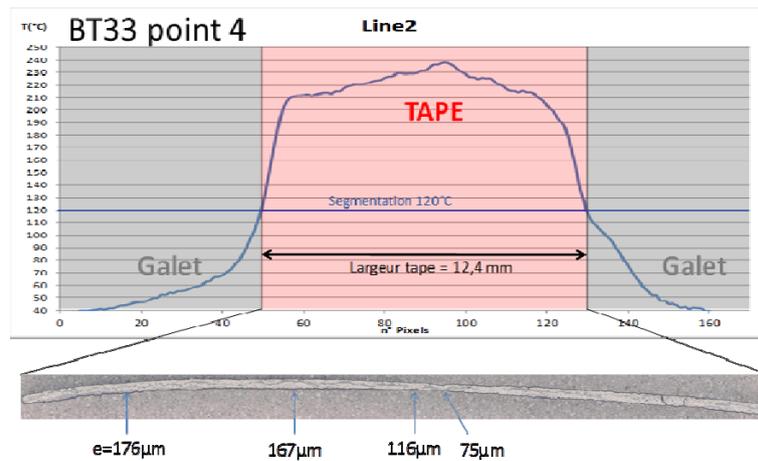


Figure 24. Profil transversal de température au point 4 (en haut), comparé à la coupe micrographique à la même position sur l'échantillon (en bas)

Les images thermiques confirment l'écart de température, mais une analyse approfondie est nécessaire pour déterminer l'origine de ces variations. Une caméra spécifique de thermographie infrarouge (FLIR) est utilisée, ainsi que son logiciel de

traitement. Celle-ci permet de tracer le profil de température transversal en chacun des 4 points et de comparer au profil d'épaisseur transversal, comme présenté en figure 24.

Le point 4, qui présente la température maximale de toute la boucle de tape, n'est pas plus chaud sur toute la largeur mais présente une zone chaude près du centre du tape. Sur la coupe micrographique, il y a au même endroit une réduction locale et très forte de l'épaisseur (75 μm , contre 150 μm en moyenne), qui était visible sur l'image thermique. Celle-ci est agrandie sur la figure 25.

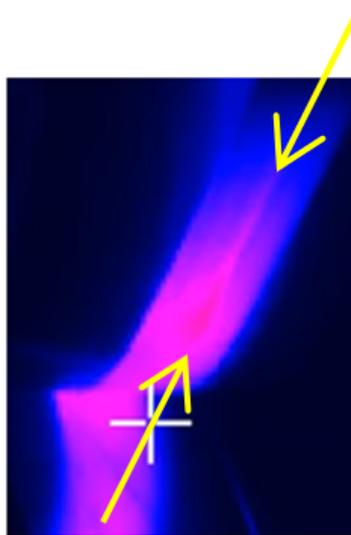


Figure 25. Agrandissement de l'image thermique au point 4, sur laquelle une ligne chaude est visible

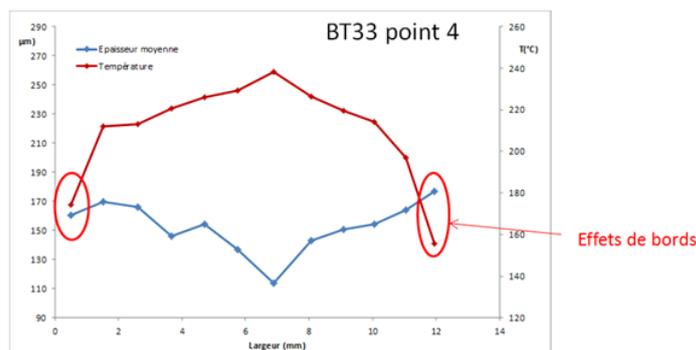


Figure 26. Profils de température et d'épaisseur dans la largeur du tape (repère 4)

Toujours dans la zone 4, on met en relation les profils de température et d'épaisseur dans la largeur du tape, comme présenté sur la figure 26.

En plus du point remarquable d'épaisseur minimale et de température maximale, la température semble influencée négativement par l'épaisseur. En représentant les couples températures/épaisseurs discrétisées à partir de 3 essais différents, on fait apparaître la relation présentée sur la figure 27.

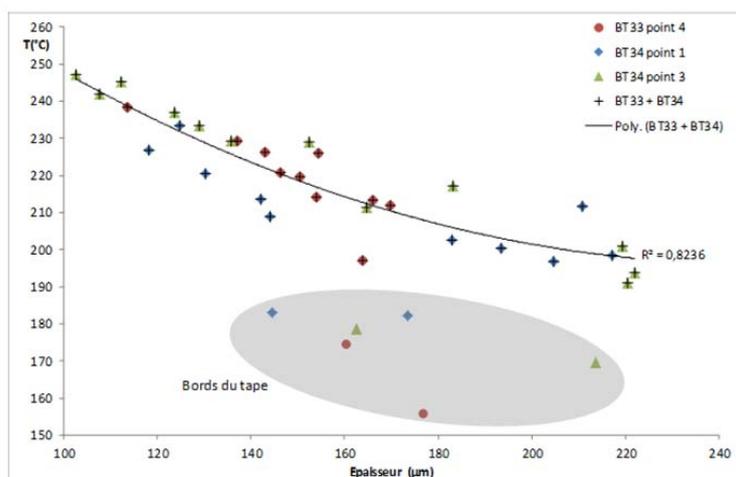


Figure 27. Températures locales en fonction de l'épaisseur locale pour 3 prélèvements de tape

La région grise sur le graphique correspond au bord du tape, dont le comportement thermique est perturbé (pertes thermiques au niveau du champ libre). Les autres points semblent suivre une relation épaisseur/température, ce qui est raisonnable car l'énergie constante apportée au tape se convertit en élévation de température, proportionnellement à la capacité thermique du volume de matière concerné. Ainsi, une quantité de matière plus faible s'échauffera plus rapidement, et inversement pour une quantité de matière plus grande. Les écarts observés sont de l'ordre de 100 μm et peuvent conduire à des écarts de plus de 50 $^{\circ}\text{C}$ dans des conditions de chauffe réduites, soit plus de 100 $^{\circ}\text{C}$ aux températures réelles du procédé.

On démontre ainsi une deuxième application du banc de mesure thermique : la détection de variation d'épaisseur, qui serait aussi adaptable au contrôle en ligne, comme la détection de porosité.

5. Conclusion

Pour développer le procédé d'enroulement assisté par chauffage laser de composites thermoplastiques pré-imprégnés, la matière première, appelée tape, doit être la plus constante possible pour éviter de fausser les conclusions. La variabilité naturelle est inévitable, mais dans de récents travaux, le CETIM a mis en évidence l'influence majeure de la variabilité de la matière, pouvant remettre en cause la maîtrise des conditions thermiques de fabrication.

Ce constat de départ a conduit à mettre au point un banc de mesure thermique du tape. Dans un premier temps, des moyens de mesure ont été évalués et comparés sur un tape statique. Deux caméras thermiques ont été retenues. L'une est la caméra de contrôle embarquée sur la tête d'enroulement, l'autre est une caméra spécifique au contrôle thermographique IR. Les images thermiques ont été comparées avec des mesures par thermocouples de 25 μm , suffisamment réactifs pour suivre les variations brutales de température supérieures à 1000 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$.

Dans un second temps, un banc de contrôle a été développé, permettant une mesure thermique sur de grandes longueurs de tape dans des conditions de chauffage constantes. Ce travail a permis de démontrer la possibilité de détecter en continu la variation locale du taux de porosité d'un tape. Sur une bobine de tape dont le taux de porosités est en moyenne inférieur à 1 %, il a été possible de détecter une concentration locale de 5 % de porosité grâce à ce contrôle.

De même, sur un autre matériau, les variations d'épaisseur ont été corrélées avec des changements de comportement thermique. Les écarts observés sont de l'ordre de 100 μm et peuvent conduire à des écarts de plus de 50 $^{\circ}\text{C}$ dans des conditions de chauffe réduites, soit plus de 100 $^{\circ}\text{C}$ aux températures réelles du procédé.

6. Perspectives

Ce travail sur la variabilité de la matière première utilisée pour le procédé d'enroulement filamentaire assisté par chauffage laser de composites thermoplastiques ouvre la voie permettant une plus grande maîtrise de la mise au point et l'optimisation du procédé de fabrication. En effet, en détectant les anomalies du tape, on s'affranchit de mauvaises interprétations des résultats, notamment dans le cadre des plans d'expérience.

Le contrôle proposé ici se réalise sans modifier la structure du tape, ce qui permet de l'utiliser pour des fabrications ou de réaliser des contrôles a posteriori. De plus, cette méthode peut être facilement adaptée au contrôle en ligne et au suivi de production.

Enfin, un futur travail de modélisation et simulation permettra de généraliser l'influence des défauts du tape sur les grandeurs thermiques dans le but de définir les critères d'admissibilité des matières premières (*cf.* Perez, 2017). On peut dès à présent noter l'importance de maîtriser l'homogénéité en épaisseur du tape. La sévérité du critère dépendra de la largeur de la fenêtre de transformation du

thermoplastique, c'est-à-dire de l'écart entre sa température de fusion et sa température de dégradation.

Bibliographie

- Di Francesco M., Veldenz L., Dell'Anno G., Potter K. (2017). Heater power control for multi-material, variable speed Automated Fiber Placement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 2017, p. 408–421.
- Grouve W. (2012). *Weld strength of laser-assisted tape-placed thermoplastic composites*. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- Leon A., Barasinski A., Nadal E., Chinesta F. (2015). High-resolution thermal analysis at thermoplastic pre-impregnated composite interfaces. *Composite Interfaces*.
- Perez M., Fouyer K., Barasinski A., Courtemanche B. (2017). *Thermal behavior simulation of filament winding process of thermoplastic composites assisted by laser heating*. Rapport de recherche, Ecole Centrale de Nantes-CETIM, mars 2017.
- Perez M., Barasinski A., Courtemanche B., Ghnatios C., Abisset-Chavanne E., Chinesta F. (2017). *Simulation du comportement thermique du procédé d'enroulement filamentaire de composites thermoplastiques assisté par chauffage laser*, Comptes Rendus des JNC 20, École des Ponts ParisTech, 28-30 juin 2017.
- Schmidt C., Denkena B., Hocke T., Völtzer K. (2017). *Influence of AFP process parameters on the temperature distribution used for thermal in-process monitoring*. 1st Cirp Conference on Composite Materials Parts Manufacturing, cirp-ccmpm2017, Procedia CIRP 66, 2017, p. 68-73.
- Schmidt C., Denkena B., Völtzer K., Hocke T. (2016). Thermal image-based monitoring for the automated fiber placement process. *10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, CIRP ICME'16.
- Stokes-Griffin C.-M. (2015). *A combined optical-thermal model for laser-assisted fibre placement of thermoplastic composite materials*. Thèse, Australian National University.
- Weiler T., Emonts M., Wollenburg L., Janssen H. (2017). Transient thermal analysis of laser-assisted thermoplastic tape placement at high process speeds by use of analytical solutions. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1–28, 2017.