



HAL
open science

Thermal study and adhesion of FFF process

Arthur Lepoivre, Nicolas Boyard, Arthur Lévy, Vincent Sobotka

► **To cite this version:**

Arthur Lepoivre, Nicolas Boyard, Arthur Lévy, Vincent Sobotka. Thermal study and adhesion of FFF process. Journées Scientifiques et Techniques FabbAddComp, Oct 2020, Lorient, France. hal-02978677

HAL Id: hal-02978677

<https://hal.science/hal-02978677>

Submitted on 9 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de la thermique et de l'adhésion du procédé FFF

Arthur Lepoivre^{1,2}, Nicolas Boyard¹, Arthur Levy¹, Vincent Sobotka¹

¹: Université de Nantes, CNRS,
Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, LTeN, UMR 6607,
Rue Christian Pauc F-44000 Nantes, France
e-mail: arthur.levy@univ-nantes.fr

²: Institut de Recherche Technologique Jules Verne
44340 Bouguenais, France
e-mail: arthur.lepoivre@irt-jules-verne.fr

L'utilisation de matières thermoplastiques haute performance de type PAEK dans les procédés d'impression 3D a permis d'étendre le champ d'application de ces procédés à des pièces à plus haute tenue mécanique. Lors de leur mise en œuvre, ces matériaux nécessitent des conditions plus drastiques, notamment en termes de niveau de la température. Il s'agit d'une contrainte supplémentaire dans le contrôle du procédé et de la qualité des pièces. Dans le procédé FFF, la porosité et la mauvaise adhésion entre cordons sont une des premières causes de chute des propriétés. Ces deux phénomènes sont fortement dépendants de la thermique du procédé. Dans ce travail nous proposons une étude des transferts de chaleur du procédé lors de l'impression d'une pièce en PEKK, grâce à un banc instrumenté développé spécifiquement. Une comparaison avec un modèle thermique 2D réalisé sur un code éléments finis permet de mettre en avant les paramètres les plus sensibles lors de l'impression. Enfin une évolution de l'adhésion exprimée en fonction du degré de coalescence et du degré de cicatrisation est proposée.

Un banc expérimental a été conçu et fabriqué avec l'objectif de mesurer in-situ la température du polymère pendant son refroidissement durant son impression. Ce banc a été réalisé sur la base d'une imprimante 3D commerciale (Fig. 1a), pour être adapté à l'impression FFF de polymères à hautes performances comme le PEKK. Pour ce faire, une enceinte thermique a été développée permettant une régulation thermique jusqu'à 250°C, tout en préservant d'un échauffement excessif les parties mécaniques et électroniques. Un extrudeur haute température (jusqu'à 400°C), refroidi par eau thermorégulée a été ajouté. Le plateau support chauffant a été adapté pour atteindre des températures de 250°C.

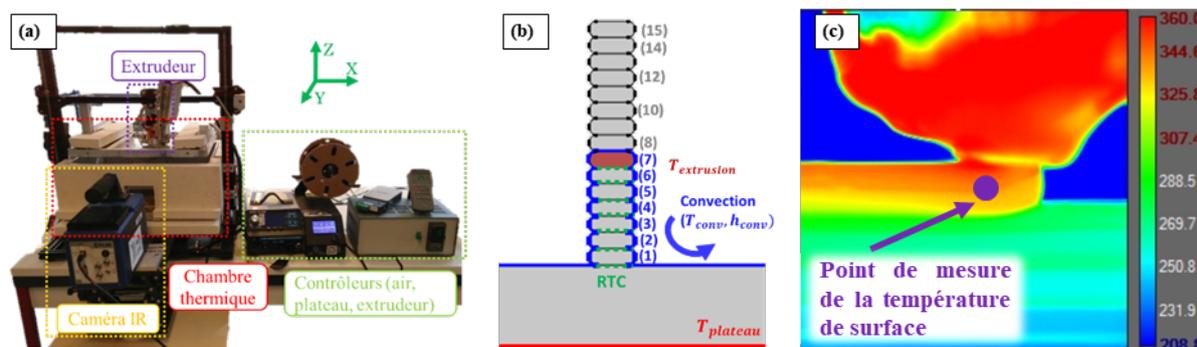


Fig. 1 – (a) banc d'essai de mesure thermique, (b) modèle thermique 2D avec COMSOL Multiphysics[®], (c) mesure expérimentale avec la caméra infrarouge

L'instrumentation thermique consiste en une caméra infrarouge et un pyromètre permettant de mesurer le flux radiatif du polymère imprimé et donc sa température après calibration, à l'échelle du cordon (buse de diamètre 1mm). Une vitre en CaF₂, implantée au niveau de l'enceinte thermique et transparente aux infrarouges, permet d'effectuer la mesure tout en conservant le volume d'air chaud à l'intérieur de l'enceinte. Les températures de l'air, de la buse et du plateau sont mesurées à l'aide de thermocouples. Afin de réaliser une mesure simple, la pièce imprimée correspond à un mur d'une hauteur de 50mm correspondant à 63 cordons superposés, large de 55mm et avec seulement un cordon dans l'épaisseur. La mesure de la température de surface du PEKK par la caméra infrarouge est représentée sur la Figure 1c.

Un modèle de simulation 2D développé sur COMSOL Multiphysics® (Fig. 1b) permet de calculer l'évolution de la température dans la pièce lors du dépôt successif de 15 cordons. Ce modèle est basé sur la résolution de l'équation de la chaleur, dans laquelle les propriétés thermophysiques ont été caractérisées en fonction de la température sur un PEKK, dont nous ne communiquons pas le grade pour des raisons de confidentialité. Les conditions aux limites font intervenir des résistances de contact entre cordons ainsi que des coefficients d'échange autour de la pièce ; ces derniers ont été estimés à partir de corrélations en convection. Le caractère 2D se justifie par analyse dimensionnelle des transferts de chaleur [1]. Une comparaison entre les mesures expérimentales et celles provenant du modèle représentée sur la Figure 2a indique une bonne adéquation globale entre les résultats. Des différences subsistent et peuvent s'expliquer par un manque de précision sur la mesure thermique, ou une mauvaise estimation de certains paramètres procédés, comme le coefficient d'échange convectif dont l'évolution précise au cours du procédé n'est pas connue et est malgré tout sensible.

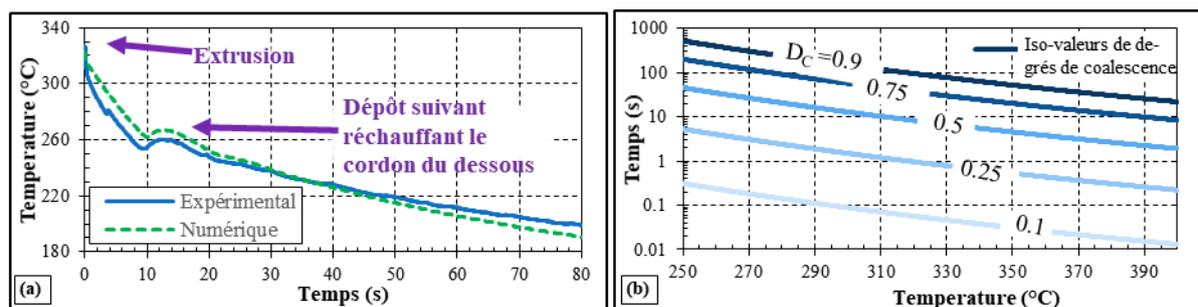


Fig. 2 – (a) comparaison des mesures thermiques expérimentales et celles issues de la simulation, (b) diagramme TTC (température-temps-coalescence)

L'adhésion peut se déterminer via l'étude de deux phénomènes : coalescence et cicatrisation de l'interface. La coalescence peut être modélisée avec un modèle analytique supposant une déformation homogène de deux cylindres sur la base du modèle de Frenkel [2-4] permettant de calculer un degré de coalescence en faisant intervenir deux propriétés thermo-dépendantes qui sont la viscosité et la tension de surface. Une campagne expérimentale a été menée pour mesurer l'évolution de la tension de surface en fonction et la température, de l'ambiante à 400°C, ainsi que la rhéologie du polymère. A partir de ces données, un abaque quantifiant la coalescence a pu être construit (Figure 2b) et montre qu'il faut, par exemple, 10s à 310°C pour atteindre 50% de coalescence.

Concernant la modélisation de la cicatrisation, un degré de cicatrisation [5-7] peut être défini, nécessitant une propriété également thermo-dépendante : le temps de reptation. A partir de ces données, un degré d'adhésion peut alors être défini, exprimé en fonction du degré de coalescence et du degré de cicatrisation. Dû à son haut MFI, le PEKK utilisé diffuse rapidement et provoque une cicatrisation de l'interface rapide. A titre d'exemple, à 350°C, un temps de 1 sec est suffisant pour une cicatrisation totale.

L'ensemble de ces résultats doit permettre à terme de proposer une fenêtre temps-température-adhésion pour le procédé FFF utilisant des polymères haute performance.

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le projet FACT, porté par l'IRT Jules Verne. Les auteurs souhaitent associer les partenaires industriels et académiques de ce projet, à savoir : AIRBUS, ARKEMA, DAHER, DEDIENNE, EOS, LIEBHERR, SAFRAN, ZODIAC Engineering, CANOE, TOBECA, LTeN, PIMM, CNRS, ENSAM et Université de Nantes.

Références

- [1] A. Lepoivre, N. Boyard, A. Levy, V. Sobotka, *Manuf. Process, Procedia Manuf.* **47**, 948–955, (2020)
- [2] J. Frenkel, *J. Phys. (USSR)* **9**(5), 385-391 (1945).
- [3] C. Bellehumeur, L. Li, *Process. J. Manuf. Process.* **6**(2), 170–178 (2004).
- [4] D. Defauchy, *Simulation du procédé de fabrication directe de pièces thermoplastiques par fusion laser de poudre*, Thèse de doctorat de l'Université de Paris, ENSAM, 2013.
- [5] PG De Gennes, *J. Chem. Phys.* **55**(2), 572-9 (1971).
- [6] RP Wool, BL Yuan, OJ McGarel, *Polym Eng Sci*, **29**(19), 1340–67 (1989).
- [7] F. Yang , R. Pitchumani, *Macromolecule*, **35**(8), 3213-24 (2002).