

Analyse des transferts thermiques mis en jeu dans un procédé d'impression par dépôt de fil fondu de thermoplastiques

Ronan HUOU¹, Sofiane BELHABIB^{1*}, Nadine ALLANIC¹, Alain SARDA¹, Gaël COLOMINES¹, Yannick MADEC¹, Sofiane GUESSASMA², Rémi DETERRE¹

¹ Laboratoire GEPEA, UMR CNRS 6144, Université - IUT de Nantes, 2 avenue du Professeur Jean Rouxel, 44470 Carquefou, France

²INRA, UR1268 Biopolymères Interactions Assemblages, 44300 Nantes, France

* (auteur correspondant : sofiane.belhabib@univ-nantes.fr)

Résumé - L'objectif de ce travail est d'aider à la compréhension des transferts thermiques mis en jeu lors des procédés d'impression par fil fondu de polymères (impression 3D) afin de proposer des pistes d'amélioration. Pour cela, une imprimante 3D open source a été thermiquement instrumentée. Plusieurs dépôts ont été réalisés avec un matériau à base de PLA (Acide Polylactique). Des thermocouples placés à la surface du plateau qui sert de support d'impression ont été utilisés pour effectuer un suivi thermique de la matière déposée. Les résultats obtenus ont mis en évidence une cinétique de refroidissement rapide à cause de la taille du fil déposé. Ces résultats ont été ensuite exploités dans la mise en place d'un modèle 2D de calcul par éléments finis dont l'objectif est de prédire le refroidissement des pièces imprimées.

Nomenclature

c_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
dt	temps caractéristique de diffusion, s
L	longueur, m
t	temps, s
T	température, K
T_g	Température de transition vitreuse, K
Q	puissance volumique, $W.m^{-3}$

<i>Symboles grecs</i>	
α	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
δ	épaisseur du dépôt, m
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
<i>Indices et exposants</i>	
c	consigne
∞	ambient

1. Introduction

L'impression 3D regroupe plusieurs technologies basées sur le principe de construction additive de la matière par opposition au principe classique d'enlèvement de matière qu'on retrouve en usinage par exemple [1, 2]. Le procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu généralement appelé FDM (Fused Deposition Modeling) connaît un grand essor grâce notamment à l'apparition d'imprimantes de coûts abordables et faciles à utiliser. Les domaines d'application sont divers et variés (aéronautique [3], agroalimentaire [4], architecture [5],...). La qualité des pièces obtenues à l'aide de ce procédé reste, néanmoins, très inférieure à celle des pièces issues des procédés classiques tels que l'injection plastique [6]. La génération des trajectoires de dépôt de fil est souvent dictée par des considérations purement géométriques. Celles-ci doivent limiter les vides interstitiels entre les couches de filament pour améliorer la tenue mécanique de la pièce [7]. Les solutions industrielles actuellement proposées pour minimiser les problèmes de stabilité dimensionnelle liée à un

retrait non homogène lors du refroidissement de matière extrudée, consistent à conditionner le plateau, voire l'ensemble du système d'impression, à une température supérieure à la température ambiante. Cela permet de freiner le refroidissement de la matière déposée avec toutefois une augmentation des temps de fabrication et un coût énergétique supplémentaire non négligeable [8].

Afin d'optimiser ce procédé, il est très important de comprendre quels sont les transferts thermiques ayant lieu lors du dépôt du fil fondu. Dans ce premier travail, nous décrivons le dispositif expérimental qui a été mis en place afin de mesurer la température lors du dépôt. Les mesures thermiques réalisées lors de l'impression de lignes successives sont analysées. Une modélisation en deux dimensions par éléments finis est également proposée afin d'analyser les échanges thermiques mis en jeu.

2. Expérimentation

2.1. Imprimante

L'imprimante 3D utilisée est de type Prusa i3 Rework 1.5 (Figure 1). Cette dernière est dédiée à un usage plutôt grand public. Le choix de cette machine a été dicté par la facilité d'instrumentation et son aspect open source. Le fil, à base de PLA (Acide Polylactique) de 1,75 mm de diamètre, enroulé en bobine est extrudé à travers une tête d'impression ayant la forme d'un téton débouchant d'un corps cylindrique. Le diamètre de la buse est de 0,4 mm. Les trajectoires peuvent être générées par des logiciels open source. Dans ce travail, des scripts écrits sous le logiciel Matlab ont été mis au point pour générer les lignes de commande en format Gcode [9] interprétable par l'imprimante.

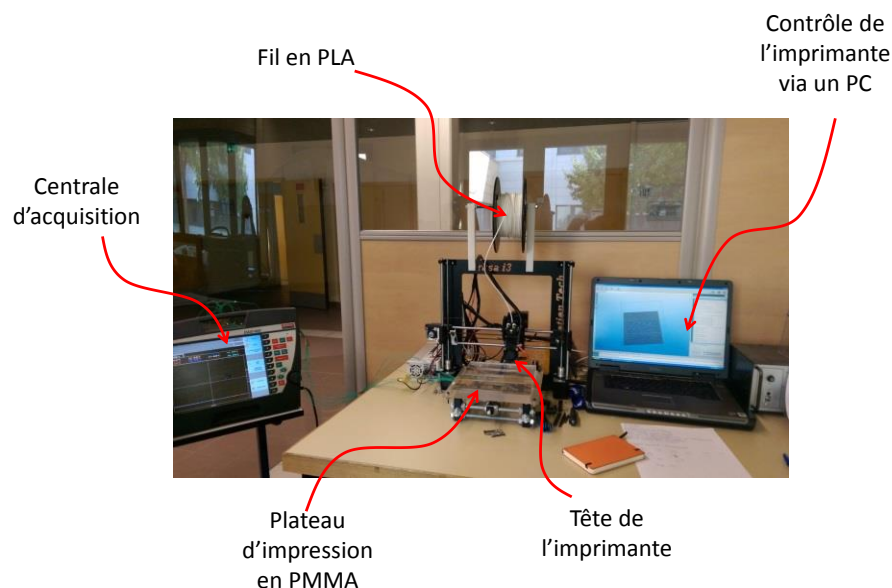


Figure 1 : Imprimante Prusa i3 utilisée dans le cadre de cette étude

Le dépôt de la matière extrudée se fait sur une plaque en PMMA (Polyméthacrylate de méthyle) non chauffée de 230 x 230 mm². Celle-ci a été instrumentée de thermocouples de diamètre 0,1 mm affleurant à la surface du plateau. La configuration d'impression est décrite sur la Figure 2. Trois lignes séparées d'une distance $\delta = 0,4$ mm (correspondant à l'épaisseur du dépôt) et de longueur $L = 85$ mm sont tracées en parallèle des thermocouples notés T_1 , T_2 et T_3 . Les thermocouples distants de 30 mm sont centrés sur la deuxième ligne imprimée.

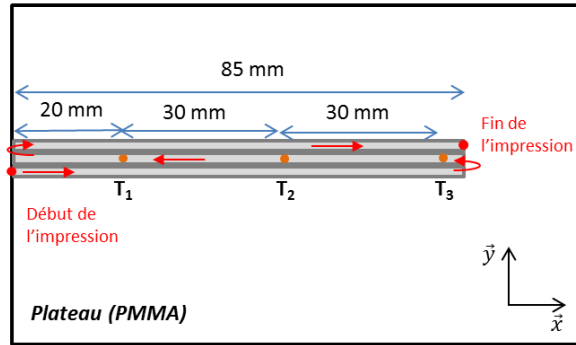


Figure 2: Instrumentation du support et configurations d'impression

2.2. Mesures thermiques

La Figure 3 présente les mesures de température relevées pour une vitesse d'impression fixée à $v = 33$ mm/s. Cette valeur a pu être vérifiée à l'aide des vidéos acquises lors de l'impression. La température de consigne de la tête d'impression est fixée à $T_c = 210^\circ\text{C}$. La vitesse d'impression peut-être aussi être retrouvée à partir de l'analyse de ces courbes. En suivant la courbe T_1 , la première montée en température ($t \sim 1,8$ s) correspond au passage de la T_1 sur la ligne 1 et la troisième montée ($t \sim 7$ s) correspond au passage de la tête face à T_1 sur la ligne 3. La distance parcourue par la tête entre ces deux positions étant de 170 mm, la vitesse de buse obtenue est de 32,7 mm/s, ce qui est cohérent avec la mesure obtenue par vidéo. Malgré les passages successifs de la tête d'impression, la température monte uniquement jusqu'à 80°C . Dès le premier passage, les températures T_2 et T_3 mesurées sont supérieures à la température de transition vitreuse du PLA ($T_g = 60^\circ\text{C}$). On observe ensuite des chutes de température, liées au temps de refroidissement entre deux dépôts successifs, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de degrés. Le matériau tend à se solidifier, ce qui rend plus délicate l'adhésion entre les couches. A la fin de l'impression de la deuxième ligne (soit 5 secondes après le début de l'impression), les écarts de température mesurés sont de 24°C . De tels gradients thermiques, peuvent introduire par la suite des problèmes de retraits dimensionnels lors de la phase de refroidissement.

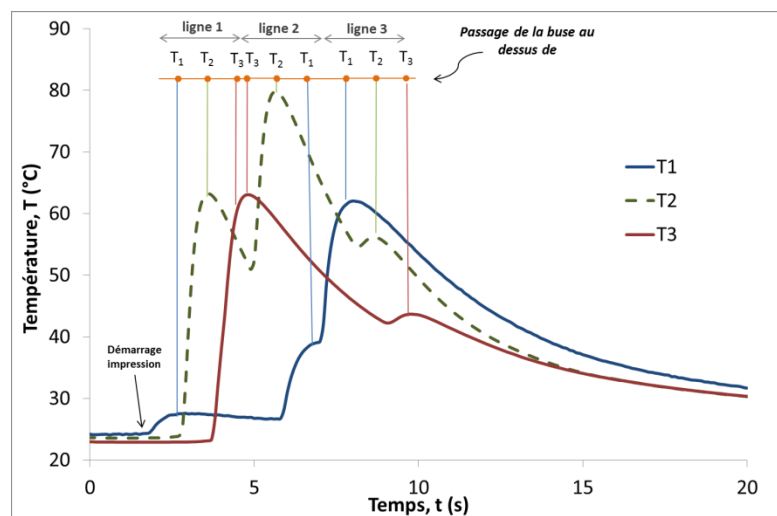


Figure 3 : Evolution de température lors de l'impression de trois lignes consécutives à $v = 33$ mm/s et $T_c = 210^\circ\text{C}$.

La Figure 4 présente les mesures obtenues dans les mêmes configurations d'impression mais en marquant un temps d'attente de 5 secondes à la fin de chaque ligne afin de laisser la matière se refroidir entre chaque passage. Ceci permet de représenter le comportement lors de l'impression de pièces de plus grande longueur.

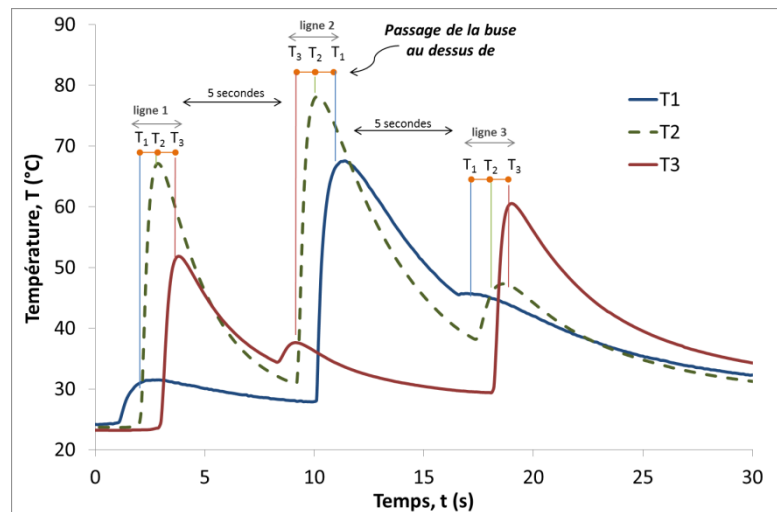


Figure 4 : Evolution de température lors de l'impression de trois lignes consécutives à $v = 33 \text{ mm/s}$ et $T_c = 210^\circ\text{C}$ et un temps d'attente de 5s à la fin de chaque ligne.

Les températures maximales mesurées par chaque thermocouple lors de chaque passage est donnée dans le Tableau 1. Lors du premier passage, les niveaux de température atteints sont similaires pour les thermocouples T_1 et T_2 avec des écarts de température inférieurs à 4°C . Dans la première configuration (Figure 3), le temps entre les deux premiers passages au-dessus de T_3 est très court ($< 1\text{s}$) et de l'ordre de grandeur du temps caractéristique de diffusion de la chaleur dans le fil $dt = \delta^2/\alpha \approx 1,5 \text{ s}$. On obtient alors dès le premier passage des écarts de température significatifs pour T_3 en comparaison à la deuxième configuration (Figure 4). La température T_2 située au centre de la ligne a un maximum de température comparable dans les deux configurations. Les maximums de températures des thermocouples T_1 et T_3 situés en bout de ligne sont plus impactées par ce temps d'attente. Les valeurs mesurées sont parfois inférieures à la température de transition vitreuse du fil, ce qui ne favorise pas l'adhésion entre les fils.

Temps d'attente (s)	1 ^{er} Passage		2 ^{ème} Passage		3 ^{ème} Passage	
	0	5	0	5	0	5
$T_{1, \text{max}}$	32	31	40	68	62	46
$T_{2, \text{max}}$	63	67	80	78	56	52
$T_{3, \text{max}}$	61	52	63	37	44	60

Tableau 1 : Température maximale mesurée à chaque passage de la tête d'impression dans les deux configurations d'impression (avec et sans temps d'attente à la fin d'une ligne).

La vitesse d'impression (v) et la température de consigne (T_c), sont deux paramètres importants à déterminer pour favoriser l'adhésion des couches et limiter les problèmes de retrait dimensionnel. La figure 5 compare la mesure de température T_2 obtenue pour des

vitesses de 28 mm/s à 33 mm/s et des températures de consignes de 210°C et 215°C. Compte tenu de l'aspect intrusif du moyen de mesure utilisé des faibles dimensions mises en jeu et donc de l'incertitude entre deux essais sur la position du thermocouple par rapport au fil lors du dépôt, il convient de rester prudent sur l'interprétation. Même si les niveaux de température maximum sont similaires, des différences de températures significatives sont observées lors des changements de lignes. Le choix des trajectoires influencent la géométrie de pièce et le taux de vide interstitiel mais aussi les vitesses de refroidissement locales de la pièce. La prédiction du comportement thermique du matériau lors de son impression pourrait permettre de mieux contrôler la température lors du dépôt et la phase de refroidissement.

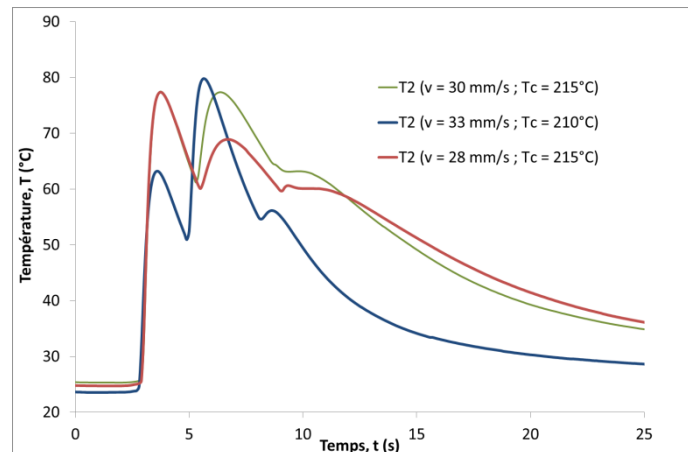


Figure 5 : Influence de la vitesse d'impression et de la température de régulation de la tête d'impression

3. Modélisation

On s'intéresse ici à la modélisation des transferts de chaleur lors de l'impression des trois lignes illustrées par la figure 2. Dans ce premier travail, une modélisation 2D a été retenue pour des raisons évidentes de temps de calcul afin de mener une étude qualitative. Le dépôt des trois lignes a été modélisé par le déplacement d'une source thermique à la vitesse d'impression v selon l'axe \vec{x} .

La figure 6 montre la géométrie retenue qui comporte un premier domaine représentant la plaque support de PMMA. Le second domaine représente un rectangle contenant de l'air initialement et dont les propriétés thermophysiques sont converties graduellement et d'une façon permanente en celles du PLA lors du premier passage de la tête d'impression pour simuler le dépôt de la matière fondue.

Le transfert de chaleur opéré lors du processus d'impression est régi dans les parties fixes du dispositif, par l'équation (1).

$$(\rho C_p)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \Delta T_i + Q_i(t) \quad (i = 1:2) \quad (1)$$

Le terme $Q_i(t)$ donné par l'équation (2) représente les apports volumiques dans chacune des deux couches, non nuls uniquement pour le domaine 2 contenant le PLA.

$$Q_1(t) = 0 ; Q_2(t_r, x) = Q_0 \text{ pour } |x - v \times t_r| \leq \delta \quad (2)$$

$$\text{avec } t_r = \begin{cases} t, & \text{ligne 1} \\ \frac{2L}{v} - t, & \text{ligne 2} \\ -\frac{2L}{v} + t, & \text{ligne 3} \end{cases}$$

où v représente la vitesse de déplacement de la tête d'impression lors du dépôt de la matière fondue et δ représente l'épaisseur de fil déposé ($\approx 0,4\text{mm}$). La longueur du fil déposé ($L = 85 \text{ mm}$), représente la largeur des domaines 1 et 2, et est similaire à celle utilisée dans le dépôt expérimental. Dans ces premières simulations du procédé, la puissance de la source injectée dans le fil Q_0 a été fixée arbitrairement à 1600 W/m^3 de manière à obtenir une température maximale dans le fil ayant le même ordre de grandeur que celle mesurée par les thermocouples.

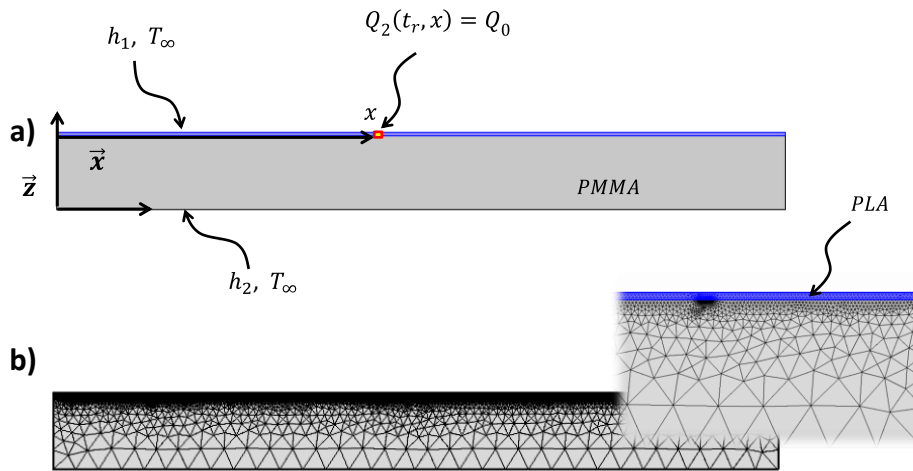


Figure 6 : Domaines (a) et maillage (b) utilisés dans le calcul par éléments finis.

Les conditions aux limites sont représentées schématiquement sur la Figure 6. Sur les différentes faces de la géométrie, les conditions aux limites sont considérées convectives avec une température ambiante $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ et deux coefficients d'échanges h_1 et h_2 respectivement sur la face supérieure (convection PLA-Air) et les autres faces (convection PMMA-Air). Les propriétés thermophysiques de l'air, du PLA et du PMMA sont synthétisées dans le Tableau 2.

	ρ kg.m^{-3}	λ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	c_p $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Air	1.29	0,026	1000
PLA	1200	0,13	1200
PMMA	1180	0,20	1500

Tableau 2 : Propriétés du filament à base de PLA et du plateau d'impression en PMMA.

Le maillage utilisé comporte 10000 éléments triangulaires à 6 nœuds. Le maillage est raffiné dans la couche contenant le PLA où les gradients de température sont importants. Le logiciel de calcul par éléments finis Comsol-Multiphysics[®] est utilisé pour résoudre l'ensemble des équations régissant le transfert de chaleur au sein du plateau. Le calcul prend 6h environ avec processeur Intel i7-4800 QM, et 24 Go de RAM.

Les résultats obtenus montrent des thermogrammes d'une allure similaire à celle des mesures expérimentales avec, cependant, des valeurs maximales plus élevées (Figure 7). On remarque que la signature thermique des multiples passages est bien prédite. En effet, les niveaux de température atteints lors du premier passage sont plus faibles que ceux des passages suivants. Les calculs montrent également l'existence d'une cinétique de refroidissement de l'ordre de 6°C/s . La différence des niveaux de températures constatés est liée en partie aux limites de la modélisation 2D où les trois lignes occupent le même domaine, à la valeur retenue pour la puissance volumique Q_0 et à l'intrusion due à la taille et à la position des thermocouples dans le plateau d'impression.

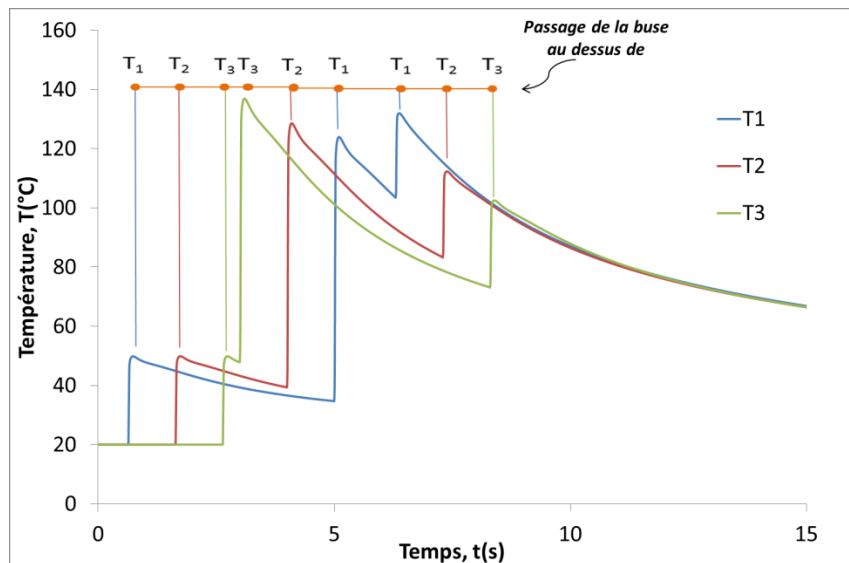


Figure 7 : Simulation numérique 2D de l'impression de trois lignes dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y}) - Evolution de température lors de l'impression à $v = 30\text{mm/s}$

La modélisation réalisée permet d'accéder au champ de température dans le fil déposé. Les résultats montrent que la température est très inhomogène (Figure 8). On peut remarquer également la diffusion thermique dans la plaque en PMMA ce qui accélère le refroidissement de la matière déposée. Cela engendre une augmentation graduelle de la température du plateau d'impression. Par conséquent, la matière sera déposée sur un support dont la température évolue ce qui peut générer des problèmes d'adhésion.

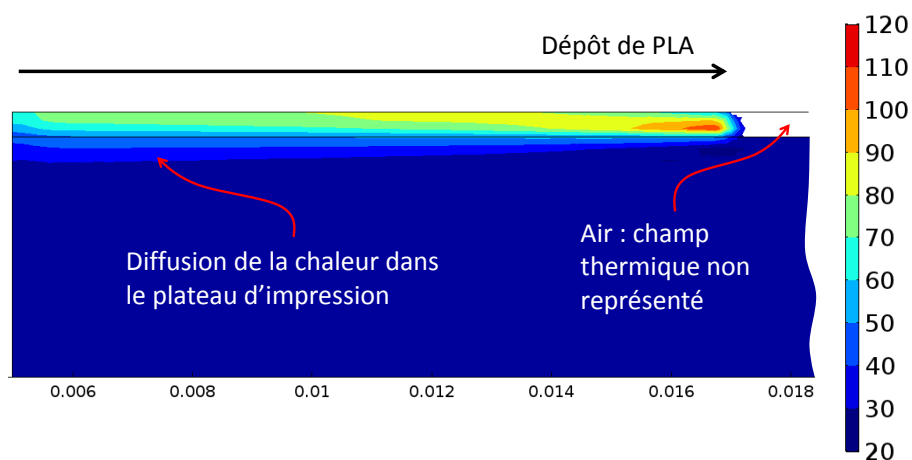


Figure 8 : Champ de température T ($^{\circ}\text{C}$) obtenu lors du dépôt du PLA ($t = 0,4\text{s}$, $v = 30\text{mm/s}$)

4. Conclusion

Dans ce travail, l'instrumentation thermique d'une plaque support d'imprimante 3D, a permis de mesurer lors du dépôt la température de la matière fondue. Les premières mesures thermiques réalisées ont mis en avant des différences significatives entre la température mesurée en contact avec la matière fondue et celle envoyée comme consigne à la tête d'impression. Les passages successifs de la tête d'impression sur le même endroit montrent la complexité des échanges où la matière peut subir plusieurs cycles de chauffage refroidissement. Les forts gradients thermiques mis en jeu dépendent de la diffusion thermique dans les couches de dépôt mais aussi dans le support et sont donc fortement liés à la vitesse de dépôt. Cette étude préliminaire a montré les limites d'une instrumentation thermique en paroi et la nécessité pour mieux caractériser les échanges thermiques mis en jeu lors d'impression par dépôt de matière fondue de modéliser les transferts de chaleur. Le modèle numérique développé a montré qu'il était capable de prédire le comportement thermique de la matière déposée validant ainsi l'hypothèse d'une source thermique mobile liée au déplacement de la frontière polymère/air. Après avoir levé les difficultés liées à un calcul en trois dimensions, les pistes envisagées consisteront à maîtriser et optimiser la définition de la trajectoire par l'introduction d'un critère thermique.

Références

- [1] X. Yan and P. Gu, A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design*, 28-4 (1996), 307-318.
- [2] M.K. Thompson et al., Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65-2 (2016), 737-760.
- [3] A. Uriondo, M. Esperon-Miguez, and S. Perinpanayagam, The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 229-11 (2015), 2132-2147.
- [4] J. Sun, et al., A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1 (2015), 308-319.
- [5] C. Gosselin et al., Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100 (2016), 102-109.
- [6] P. Minetola, L. Iuliano, and G. Marchiandi, Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades. *Procedia CIRP*, 41 (2016), 1027-1032.
- [7] H. Nouri, S. Guessasma, and S. Belhabib, Structural imperfections in additive manufacturing perceived from the X-ray micro-tomography perspective. *Journal of Materials Processing Technology*, 234 (2016), 113-124.
- [8] V.A. Balogun, N.D. Kirkwood, and P.T. Mativenga, Direct Electrical Energy Demand in Fused Deposition Modelling. *Procedia CIRP*, 15 (2014), 38-43.
- [9] A.C. Brown and D.d. Beer. Development of a stereolithography (STL) slicing and G-code generation algorithm for an entry level 3-D printer. in 2013 Africon.