



2 sept. 2022, Nantes

Fusion d'un filament de polymère amorphe dans une tête d'impression 3D FDM

S. Marion^a, L. Sardo^b, T. Joffre^c & F. Pigeonneau^d

^aMines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, Centre SMS, Saint-Etienne

^bSciences Computers Consultants, 10 rue du plateau des Glières, Saint-Etienne

^cIPC Innovation Plasturgie Composites, Bellignat

^dMines Paris, PSL Research University, CEMEF, UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis



1. Position du problème

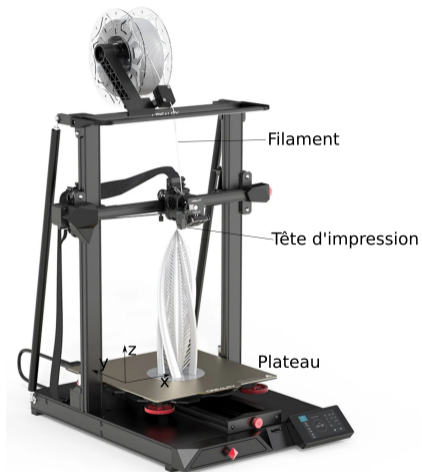
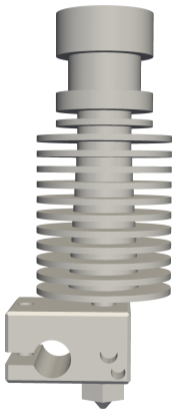


Figure 1 – Imprimante 3D FDM (cartésienne) (source <https://creality3d.shop/>).

1. Position du problème

(a) Vue perspective



(b) Coupe

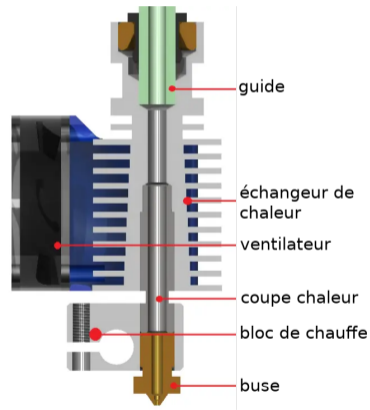


Figure 2 – (a) Perspective et (b) Coupe d'une tête de chauffe E3D-V6.

1. Position du problème

Comment est produite la fusion du polymère ?



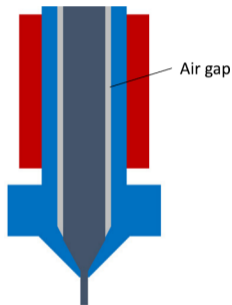
Figure 3 – Modèles de fusion proposés par (a) Bellini et al. ¹ et (b) Osswald et al. ².

1. A. Bellini/S. Güçeri/M. Bertoldi : Liquefier dynamics in fused deposition, in : *J. Manuf. Sci. Eng.* 126.2 (2004), p. 237-246.

2. T. A. Osswald/J. Puentes/J. Kattinger : Fused filament fabrication melting model, in : *Addit. Manuf.* 22 (2018), p. 51-59.

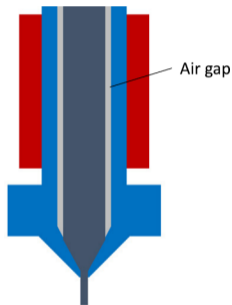
1. Position du problème

- ▶ Modèles avec transfert de chaleur purement axial.
- ▶ Existence d'un gap d'air entre le polymère et le bloc de chauffe de $125\ \mu\text{m}$:



1. Position du problème

- ▶ Modèles avec transfert de chaleur purement axial.
- ▶ Existence d'un gap d'air entre le polymère et le bloc de chauffe de $125\ \mu\text{m}$:



Simuler la fusion tenant compte de l'aspect diphasique

1. Position du problème

2. Simulation numérique de la fusion

2.1 Matériaux

2.2 Équations du problème

3. Résultats

3.1 Établissement du régime stationnaire

3.2 Étude du régime stationnaire

3.3 Force de poussée

4. Synthèse & perspectives

2. Simulation numérique de la fusion

2.1 Matériaux

- ▶ Matériaux incompressibles ;
- ▶ Le polymère (ABS) considéré comme un fluide newtonien généralisé :

$$\eta_p(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_{p,0} a_T}{[1 + (\lambda a_T \dot{\gamma})^a]^{(1-n)/a}}, \quad (1)$$

$$a_T = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right], \quad \dot{\gamma} = \sqrt{2\dot{\epsilon} : \dot{\epsilon}}. \quad (2)$$

- ▶ Pb. normalisé :

x par D , diamètre d'entrée de l'extrudeur, 2 mm ;

u par $U = 4Q/(\pi d^2)$, $d=0.4$ mm (dia. buse) ;

t par D/U ; σ & P par $\eta_{p,0} U/D$; T sous la forme :

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}. \quad (3)$$

2. Simulation numérique de la fusion

2.1 Matériaux

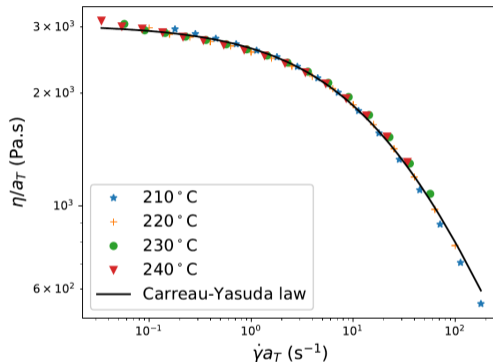


Figure 4 – $\eta(\dot{\gamma}, T)/a_T$ vs. $\dot{\gamma} a_T$ de l'ABS.

$\eta_{p,0}$ (Pa.s)	λ (s)	n	a	E_a (kJ mol $^{-1}$)	T_{ref} (K)
3.04×10^3	3.2×10^{-2}	0.28	0.6	115.06	493.15

2. Simulation numérique de la fusion

2.1 Matériaux

Table 1 – Propriétés thermiques de l'ABS³ et de l'air⁴.

	ρ (kg/m ³)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)
ABS	1150	2100	0.21
Air	0.701	1034.78	0.0399

3. M. E. Mackay et al. : The performance of the hot end in a plasticating 3D printer, in : J. Rheol. 61.2 (2017), p. 229-236.

4. K. Kadoya/N. Matsunaga/A. Nagashima : Viscosity and Thermal Conductivity of Dry Air in the Gaseous Phase, in : J. Phys. Chem. Ref. Data 14.4 (1985), p. 947-970.

2. Simulation numérique de la fusion

2.2 Équations du problème

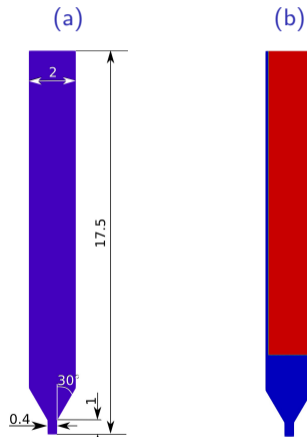


Figure 5 – (a) Domaine de calcul & dimensions (b) Polymère & air.

2. Simulation numérique de la fusion

2.2 Équations du problème

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4)$$

$$\text{Re} \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot [2\eta(\dot{\gamma}, \theta, \varphi)\dot{\epsilon}] + \text{Ca}^{-1} \kappa \|\nabla\varphi\| \delta(\varphi) \mathbf{n}_\varphi - \text{Ga} \rho \mathbf{k}, \quad (5)$$

$$\text{Pe} \rho C_p \frac{D\theta}{Dt} = \nabla \cdot [k \nabla \theta] + \text{Br} \eta(\dot{\gamma}, \theta, \varphi) \dot{\gamma}^2, \quad (6)$$

$$\frac{D\varphi}{Dt} = 0, \quad (7)$$

$$\eta_p(\dot{\gamma}, \theta) = \frac{a_T}{[1 + (\text{Wi} a_T \dot{\gamma})^a]^{(1-n)/a}}, \quad (8)$$

$$\rho(\varphi) = H(\varphi) + \rho_{\text{air}} [1 - H(\varphi)]. \quad (9)$$

Reynolds	capillaire	Galilée	Péclet	Brinkman	Weissenberg
Re	Ca	Ga	Pe	Br	Wi
$\frac{\rho_p U D}{\eta_{p,0}}$	$\frac{U \eta_{p,0}}{\gamma}$	$\frac{\rho_p g D^2}{U \eta_{p,0}}$	$\frac{U D}{a_p}$	$\frac{\eta_{p,0} U^2}{k_p (T_\infty - T_0)}$	$\frac{\lambda U}{D}$
3.8×10^{-5}	5×10^3	2.9×10^{-4}	1.15×10^3	1.7×10^{-1}	8×10^{-1}

2. Simulation numérique de la fusion

2.2 Équations du problème

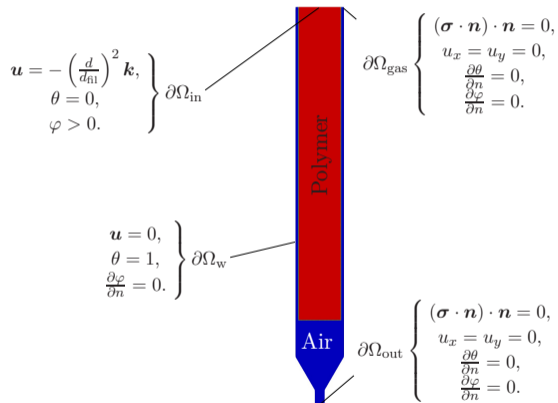


Figure 6 – Conditions aux limites utilisées pour les simulations numériques.

3. Résultats

Table 2 – Conditions de marche étudiées.

Case	U (m min ⁻¹)	T_0 (°C)	T_∞ (°C)
1	1		
2	3	24	230
3	6		

3. Résultats

3.1 Établissement du régime stationnaire

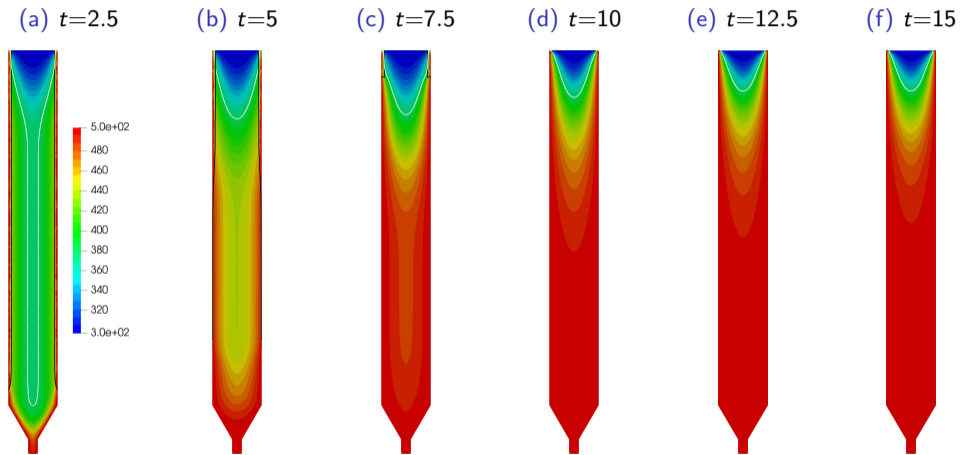


Figure 7 – Température pour $U=1 \text{ m min}^{-1}$.

3. Résultats

3.1 Établissement du régime stationnaire

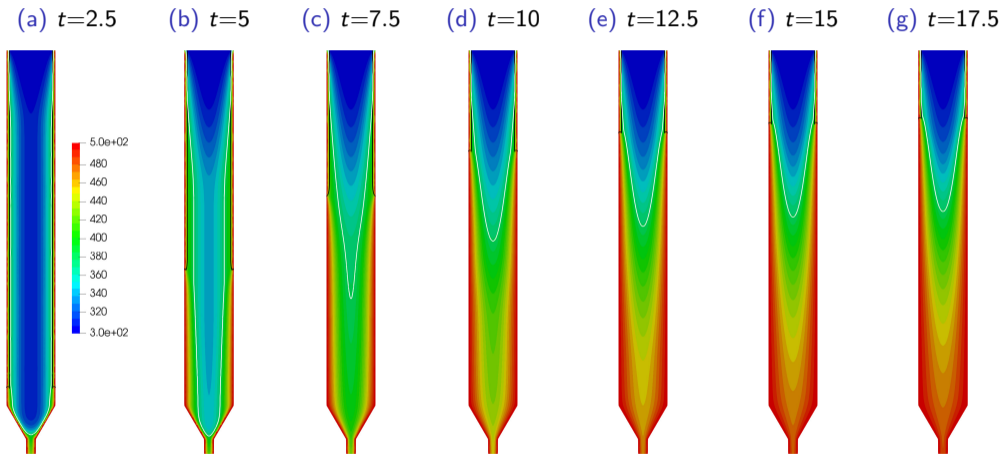


Figure 8 – Température pour $U=3 \text{ m min}^{-1}$.

3. Résultats

3.1 Établissement du régime stationnaire

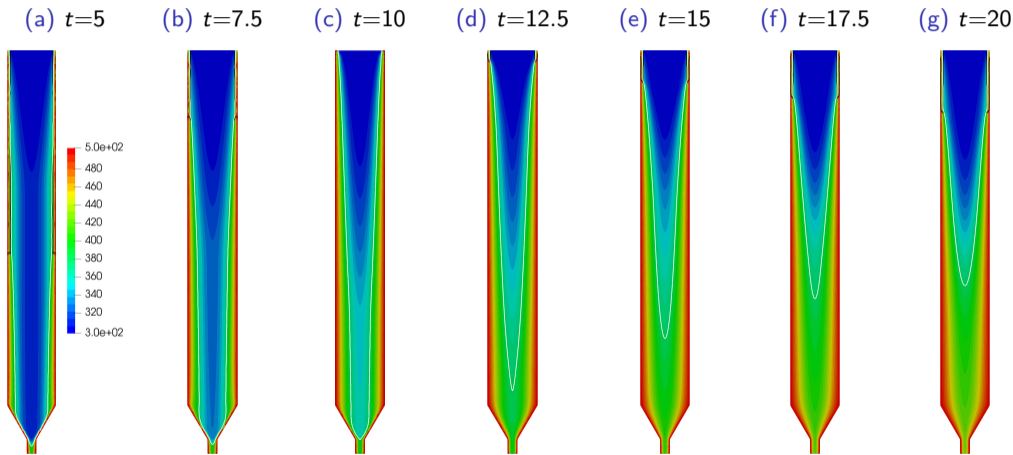


Figure 9 – Température pour $U=6 \text{ m min}^{-1}$.

3. Résultats

3.1 Établissement du régime stationnaire

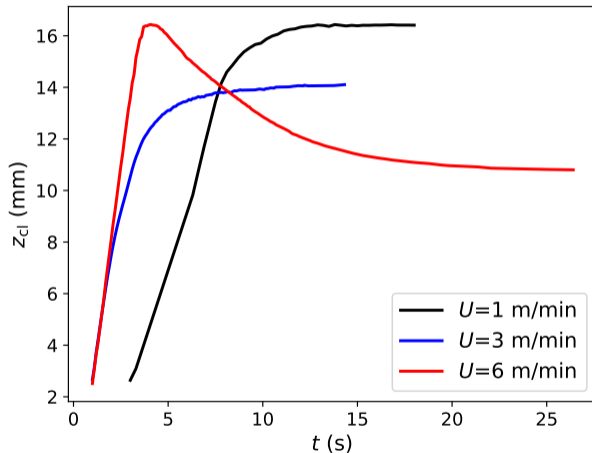


Figure 10 – z_{cl} vs. t (s) pour les 3 cas.

3. Résultats

3.2 Étude du régime stationnaire

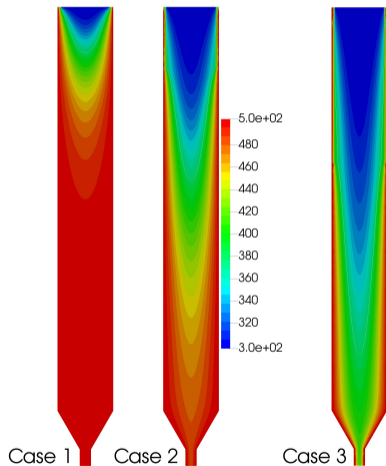


Figure 11 – T dans un plan de symétrie pour les 3 cas.

3. Résultats

3.2 Étude du régime stationnaire

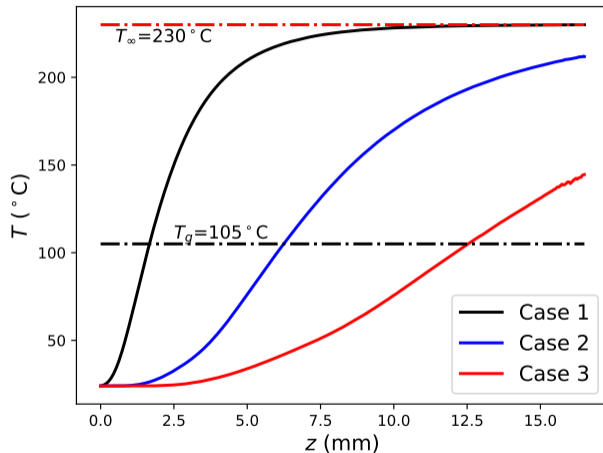


Figure 12 – T (°C) vs. z (mm) pour les 3 cas.

3. Résultats

3.2 Étude du régime stationnaire

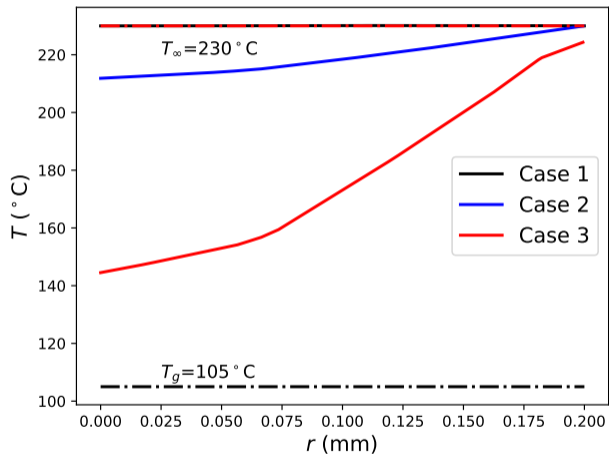


Figure 13 – T (°C) vs. r (mm) pour les 3 cas dans la section de sortie.

3. Résultats

3.3 Force de poussée

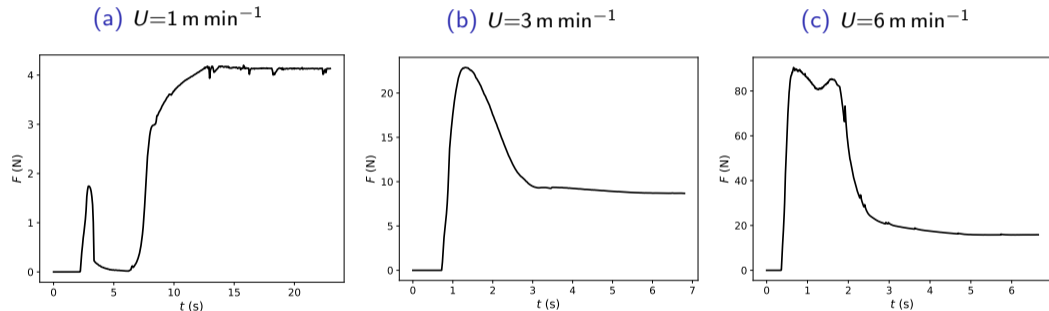


Figure 14 – Force de poussée F (N) vs. t pour les 3 cas.

3. Résultats

3.3 Force de poussée

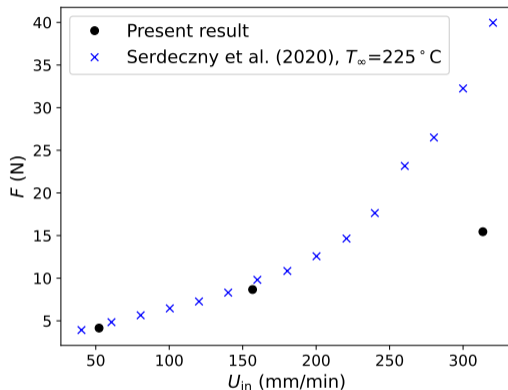


Figure 15 – F (N) vs. U_{in} (mm min^{-1}) pour $T_{\infty}=230^{\circ}\text{C}$ comparée aux données de Serdeczny et al.⁵ pour $T_{\infty}=225^{\circ}\text{C}$.

5. M. P. Serdeczny et al. : Numerical modeling of the polymer flow through the hot-end in filament-based material extrusion additive manufacturing, in : *Addit. Manuf.* 36 (2020), p. 101454.

4. Synthèse & perspectives

(a) $U=1 \text{ m min}^{-1}$



(b) $U=6 \text{ m min}^{-1}$



Figure 16 – Zone de polymère « solide ».

- ▶ A faible vitesse, le modèle de Bellini et al.⁶ est trouvé.
- ▶ A plus haute vitesse, le modèle de Osswald et al.⁷ s'applique.

6. Bellini/Güçeri/Bertoldi : Liquefier dynamics in fused deposition (cf. note 1).

7. Osswald/Puentes/Kattinger : Fused filament fabrication melting model (cf. note 2).

4. Synthèse & perspectives

- ▶ Formation d'un gap d'air permanent augmentant avec U ;
- ▶ L'air isole le polymère du transfert de chaleur ;
- ▶ Le régime stationnaire met plus de 15 à 20 s pour s'établir ;
- ▶ La force de poussée reste modérée mais passe par des valeurs élevées lors de la mise en route.

Perspectives

- ▶ Prendre en compte l'aspect visco-élastique du polymère dans la modélisation ;
- ▶ Réalisation d'expériences in-situ pour observer l'écoulement dans la tête d'impression ;
- ▶ Conception de buse limitant le gap d'air et améliorant le transfert thermique.

4. Synthèse & perspectives

Merci pour votre attention !

Contact :

franck.pigeonneau@minesparis.psl.eu