

Etude expérimentale et numérique de micro-sources thermiques industrielles, en régime transitoire rapide

Franck LEMEUNIER^{**}, Nadine ALLANIC, Sofiane BELHABIB, Pierre MOUSSEAU, Bertrand GARNIER^{*}

LUNAM Université, Université de Nantes, CNRS, GEPEA, UMR 6144, IUT de Nantes, 2 avenue du Professeur Jean Rouxel, 44475 Carquefou Cedex

^{*}LUNAM Université, Université de Nantes, Laboratoire de Thermocinétique, CNRS-UMR 6607, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, B.P. 50609, Rue C. Pauc, 44306 Nantes cedex 3

^{**}(auteur correspondant : franck.lemeunier@univ-nantes.fr)

Résumé. La transcription de données numériques sur des supports physiques, par dépôt de matière fusible, induit le recours à des sources thermiques résistives miniatures. L'optimisation de ces systèmes repose sur une connaissance fine des transferts de chaleurs impliqués. Un modèle numérique bidimensionnel de ces sources est proposé. Sa validation est obtenue par comparaison des températures calculées avec celles mesurées par thermographie infra-rouge. Les paramètres d'entrée du modèle sont ajustés par méthode inverse.

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	z	coordonnée, m
e	épaisseur, m	<i>Symboles grecs</i>	
L	Longueur, m	λ	Conductivité thermique, $W.K^{-1}.m^{-1}$
h	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
Q	puissance volumique, $W.m^{-3}$	ε	émissivité
\bar{P}	puissance normalisée,	<i>Indices et exposants</i>	
t	temps, s	ti	tête d'impression
\tilde{T}	température normalisée	k	indice des couches
v	vitesse d'impression, $m..s^{-1}$		

1. Introduction

La miniaturisation des systèmes industriels rendue possible par les avancées technologiques récentes, pose de nouvelles contraintes lors de leur étude. Dans ce travail, nous nous intéressons à un procédé, largement employé dans l'industrie, de transcription de données numériques par impression thermique [1]. Cette technologie est utilisée dans le cadre de l'écriture, par dépôt de matière solide, de codes à barres et d'étiquettes. Elle peut être mise en œuvre sur des supports variés (papier, métaux, polymères, etc.), aux vitesses relativement élevées de 50 à 600 $mm.s^{-1}$. Le principe consiste à provoquer, par fusion ou changement d'état de l'encre, le transfert de ce matériau, porté par un ruban, vers un support receveur. L'énergie requise est apportée par excitation de micro-sources résistives. L'obtention d'une haute qualité d'impression est un prérequis incontournable à la lecture des données imprimées (p. ex codes à barres 1D ou 2D). Aussi, est-il nécessaire de prévoir et contrôler le transfert de chaleur impliquée dans le processus d'impression.

Les documents traitant du procédé d'impression thermique, disponibles dans la littérature, montre que l'étude du transfert de chaleur considéré est abordé par les auteurs comme un problème unidimensionnel, ou bien ne considèrent pas le déplacement des rubans et supports receveurs. En effet, Sanders [2] a formulé un modèle unidimensionnel à deux couches, la

première correspondant à un verre entourant l'élément chauffant, la seconde se composant des matériaux mobiles. Assimilant le problème à une source de chaleur plate, une solution analytique est développée afin de décrire l'évolution temporelle de la température à l'interface des deux couches. Dans leur travail, King-Hele et Uyhan [3] proposent des modèles uni et bidimensionnels de la tête d'impression et du support d'impression sans intégrer le déplacement de matière. L'analyse bidimensionnelle du transfert de chaleur est réalisée dans le plan "XZ" (figure 1). L'objectif de leurs travaux est d'étudier l'influence thermique des électrodes sur la distribution du champ de température pour une source de chaleur unique.

Une analyse plus détaillée de ce procédé d'impression montre que les modèles décrits sont discutables pour les raisons suivantes : (i) La surface de contact entre la tête d'impression et le ruban n'est pas plane mais cylindrique (§ 2.1), (ii) le défilement du support d'impression n'est pas pris en compte, (iii) l'accumulation de chaleur dans la tête d'impression après un cycle d'impression n'est pas modélisée. L'objectif de cette étude est de développer et valider par méthode inverse, un modèle numérique bidimensionnel d'une source de chaleur et de son environnement immédiat. Dans ces travaux, les rubans et supports d'impression ne sont pas considérés. Les mesures thermiques sont obtenues par thermographie infra-rouge [4]. Le modèle proposé intègre les informations issues de la mesure des cycles électriques impulsionnels appliqués aux résistances, dans le cadre du tracé d'un code à barre unidimensionnel perpendiculaire au sens de défilement théorique du ruban.

Après avoir abordé le contexte de l'étude, une seconde partie est consacrée à la description d'une source de chaleur et de son environnement. Une troisième partie présente les aspects expérimentaux relatifs à la détermination de la puissance électrique fournie à la tête d'impression ainsi que des résultats de mesures en températures obtenues par une méthode sans contact. Enfin, dans une dernière section, un modèle numérique ainsi que la procédure de validation adoptée sont décrits. Une étude comparative des températures mesurées et calculées est menée.

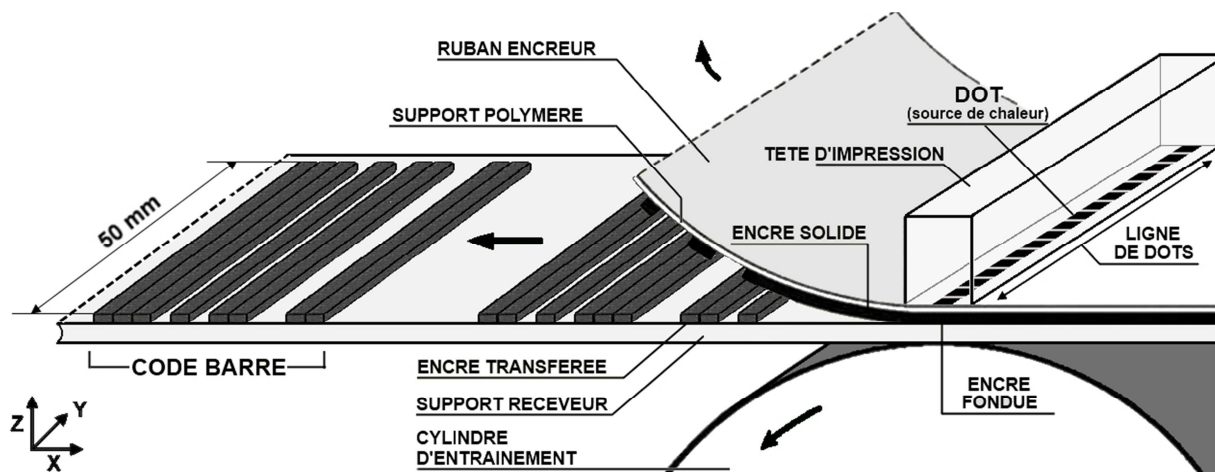


Figure 1 : Schéma fonctionnel d'un système d'impression

2. Caractérisation des éléments constitutifs de la tête d'impression

Pour bien appréhender les transferts de chaleur intervenant au cours d'un cycle d'impression, il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-physiques des matériaux ainsi que leurs dimensions. Dans ce travail, nous nous attachons à caractériser la partie du système relative à la tête d'impression notamment au voisinage immédiat des sources de chaleur. La structure multicouche et la composition de la tête d'impression ont été révélées par observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB), dans le plan xz. Afin de déterminer les espèces chimiques en présence, une analyse dispersive en énergie (EDX) a été

réalisée. Ces données ont permis d'émettre des hypothèses sur la nature des constituants de la tête d'impression et ainsi, de remonter à des propriétés thermo-physiques extraites de la littérature [5].

2.1. Géométrie

La Figure 2 présente une schématisation de la géométrie de la tête d'impression. La couche $L_{ti2.1}$ est destinée à accumuler de la chaleur dans la tête d'impression tandis que la couche $L_{ti2.2}$ protège la résistance et les électrodes de l'usure due aux frottements induits par le défilement du ruban. Dans ce qui suit, nous nommerons « dot » l'ensemble constitué de ces deux couches et de la source de chaleur composée d'une résistance électrique de longueur $135 \mu\text{m}$. Le dot est adossé au support L_{ti1} , lui-même fixé sur une dernière couche L_{ti0} , non représentée sur le schéma présenté.

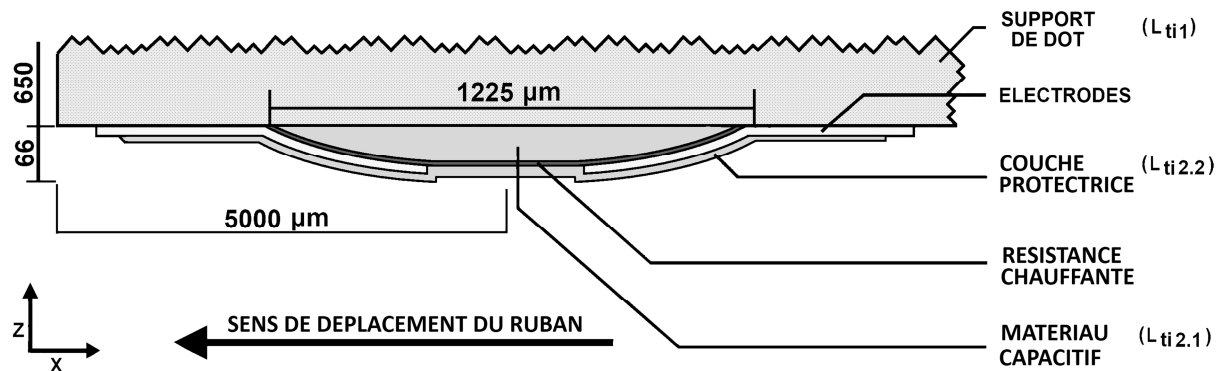


Figure 2 : Schéma en coupe de la tête d'impression

2.2. Composition

Les dimensions et la composition des quatre couches constituant la tête d'impression sont données dans le Tableau 1. Les couches L_{ti0} et L_{ti1} sont clairement identifiées comme étant constituées respectivement d'un alliage d'aluminium et d'une alumine. Les couches $L_{ti2.1}$ et $L_{ti2.2}$ sont supposées avoir des propriétés proches de celles de verres de borosilicate, connu pour leur résistance aux contraintes thermiques élevées. La résistance électrique, alimentée par des électrodes en aluminium pur, n'a pas pu être observée directement. Nous faisons l'hypothèse que son épaisseur n'est pas suffisante pour être clairement différenciée de l'interface entre les couches $L_{ti2.1}$ et $L_{ti2.2}$. Les propriétés thermiques des matériaux, sont ramenées à des valeurs de référence relatives au verre.

Matériau	Désignation de la couche	$\frac{\lambda_{ti,k}}{\lambda_{ti,ref}}$	$\frac{Cp_{ti,k}}{Cp_{ti,ref}}$	$\frac{\rho_{ti,k}}{\rho_{ti,ref}}$	$e_{ti,k}$ [μm]	ϵ
Aluminium (alliage)	L_{ti0}	171	1.08	1.21	3000	
Alumine	L_{ti1}	26	0.92	1.78	650	
Céramique	$L_{ti2.1}$	1	1	1	60	
Verre	$L_{ti2.2}$	1	1	1	6	0.81

Tableau 1 : Dimensions et propriétés des matériaux constitutifs de la tête d'impression

3. Etude expérimentale de la tête d'impression

3.1. Mesure du signal électrique d'entrée

Le circuit d'alimentation électrique de la tête d'impression a été instrumenté afin de

mesurer le signal envoyé à une ligne de dot. La tension aux bornes de la tête d'impression est constante et vaut 16 V. En revanche, l'intensité délivrée varie en fonction de la vitesse de défilement du ruban mais également de l'histoire thermique vécue par le dot.

Des mesures ont été effectuées avec un enregistreur de données Sefram DAS 1000 et un taux d'échantillonnage de 4 μs . En supposant que les pertes résistives dans les circuits sont négligeables, nous avons alors accès à la puissance électrique $P(t)$ fournie aux dots. Dans ce travail, nous considérons le signal correspondant au tracé d'un trait de 1 mm de longueur. Les motifs imprimés ont une largeur de 50 μm (Figure 1) soit 400 sources contiguës excitées simultanément.

3.1.1. Impression d'un trait de 1 mm

La Figure 3 présente la puissance électrique normalisée $\tilde{P}(t)$ mesurée lors du tracé d'un trait de 1 mm de longueur à la vitesse de 60 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Après les impulsions nécessaires au préchauffage des sources de chaleur (p1 et p2), huit impulsions de marquage, notées i1 à i8, sont observées. Pour chacune d'entre elles, la puissance délivrée est la même, seul les temps d'impulsion varient. Les trois premières, notées i1 à i3, représentent la séquence de chargement thermique. Dans un second temps, le signal est basé sur la répétition d'impulsions périodiques identiques (i4 à i7). Enfin, une impulsion plus brève est émise afin d'anticiper la fin de l'impression évitant ainsi l'accumulation d'énergie dans la tête d'impression. Notons que pour des vitesses différentes, les durées d'impulsions varieront.

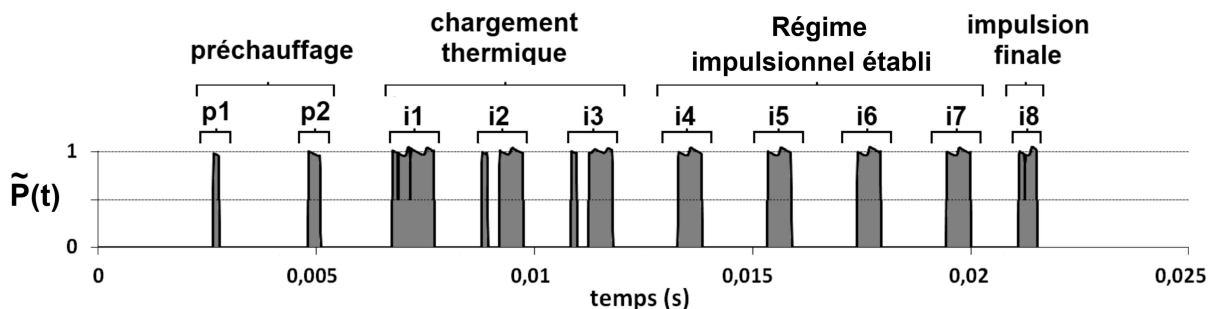


Figure 3 : Signal électrique correspondant au tracé d'un trait de 1 mm à la vitesse de 60 mm/s

3.2. Mesure par caméra thermique de la température au centre d'un dot

Afin de bien appréhender le comportement thermique de la tête d'impression, des mesures ont été réalisées, par thermographie infrarouge et sont analysées.

3.2.1. Matériel et conditions expérimentales

Lors des mesures, la tête d'impression est exposée à l'air libre, les sources étant dirigées vers le haut. Une enceinte de protection isolante est disposée tout autour de la tête afin de limiter les effets convectifs dus au local d'expérimentation. Les mesures sont réalisées au centre de la source (dot), en moyennant les valeurs des températures sur une aire couvrant 10 pixels. Sur cette surface, l'écart type des mesures de température obtenues est inférieur à 2 $^{\circ}\text{C}$. La caméra de thermographie rapide infrarouge FLIR SC7500 InSb utilisée, couvre la bande spectrale 2,5 – 5 μm et est couplée à un microscope grossissant 3 fois. Les dimensions de la matrice d'acquisition sont de 80*64 pixels pour une taille unitaire de 10x10 μm . La fréquence d'acquisition est de 3598 Hz, soit une image toutes les 278 μs . Le temps d'intégration des capteurs renvoie à la gamme de mesure en température normalisée, comprise entre 0,4 et 1. L'émissivité du matériau testé est fixée à 0,81. Chaque essai est répété dix fois. Un calage temporel est ensuite réalisé entre les différents essais pour obtenir un seul et unique thermogramme, permettant la détermination précise des extrêmes.

3.2.2. Résultats expérimentaux

La Figure 5 présente l'évolution temporelle de la température moyenne normalisée $\tilde{T}(t)$ au centre d'un dot, pour un signal électrique équivalent au tracé d'un trait de 1 mm de longueur à la vitesse de 60 mm/s. Nous constatons que les impulsions de préchauffage permettent une augmentation progressive de la température des dots. A la fin de ce cycle $\tilde{T}(t)$ a déjà atteint 50% de sa valeur maximale. Les signaux i_1 à i_3 sont destinés à provoquer la fusion de l'encre portée par le ruban. Ils permettent également l'augmentation globale du niveau d'énergie du système. Au terme de la 3^{ème} impulsion, un état thermique quasi-périodique s'installe. Nous pouvons observer que les niveaux d'énergie délivrés à la tête d'impression sont ajustés de sorte à assurer l'équilibre entre les différentes séquences d'une période impulsionnelle ($\tilde{T}(t)$ reste compris entre 0,5 et 1). Ainsi, l'intégrité de la source est garantie contre une élévation trop importante des températures et permet la diffusion de la chaleur dans l'ensemble du dispositif.

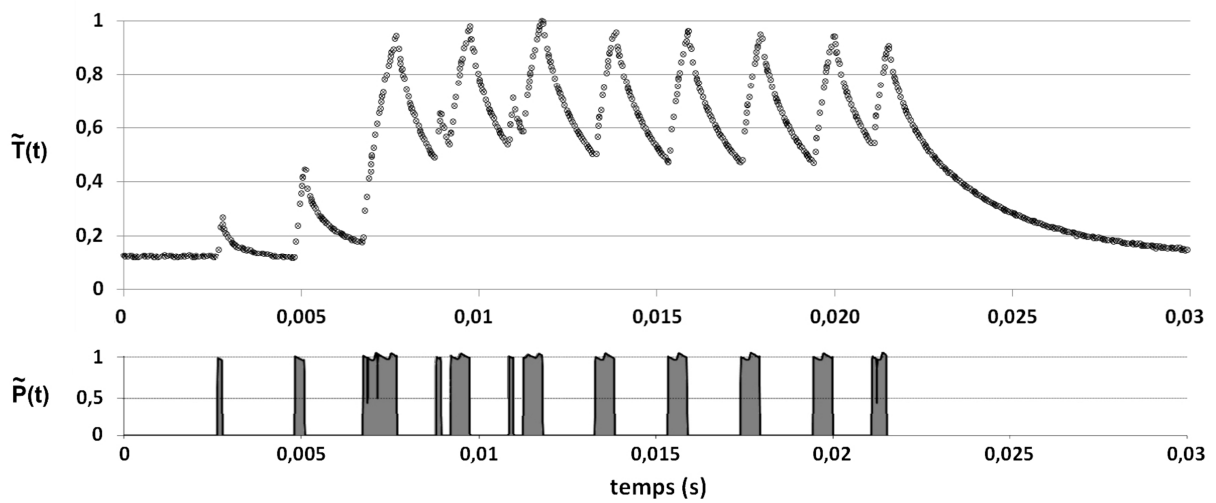


Figure 5 : Mesure expérimentale par thermographie IR et signal électrique associé ($v = 60 \text{ mm/s}$)

4. Analyse numérique de la tête d'impression

L'ensemble des sources étant excitées simultanément, nous considérons l'une d'entre elle non affectée par les effets de bord. Les pertes latérales portées par « y » se compensent autorisant un modèle bi dimensionnel.

4.1. Modèle numérique de transfert de chaleur

Dans ce travail, un modèle numérique à deux dimensions, présenté dans le sens de défilement du papier (Figure 6) a été développé.

Le transfert de chaleur opéré lors du processus d'impression est régi par l'équation suivante:

$$(\rho C_p)_{ti,k} \frac{\partial T_{ti,k}}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{ti,k} \nabla T_{ti,k}) + Q_{ti,k}(t) \quad (k = 0:3) \quad (1)$$

où $Q_{ti,k}$ représente la chaleur volumique générée dans chaque couche. Son expression est donnée par :

$$Q_{ti,0}(t) = Q_{ti,1}(t) = Q_{ti,2}(t) = 0 \quad \text{et} \quad Q_{ti,3}(t) = \frac{P(t)}{V} \quad (2)$$

Les conditions aux limites sont représentées schématiquement sur la Figure 6. Sur la face inférieure du système ($\Gamma_{f,1}$), une condition adiabatique est appliquée. Sur les faces latérales

$(\Gamma_{f, 2 \rightarrow 3})$ et supérieures $(\Gamma_{f, 4})$, les conditions aux limites sont considérées convectives et thermo-dépendantes. Enfin, sur la face du dot exposée à l'air libre $(\Gamma_{f, 5})$, nous ajoutons des échanges par rayonnement.

Le logiciel de calcul par éléments finis Comsol Multiphysics est utilisé pour résoudre l'ensemble des équations régissant le transfert de chaleur au sein de la tête d'impression. Le solveur « direct UMFPACK » est utilisé, avec une gestion automatique des pas de temps d'une durée maximale de 4 μs . Le maillage retenu contient 40.10^3 éléments triangulaires. Chaque couche de matériau est constituée, a minima, d'une superposition de trois mailles. Le maillage est raffiné à proximité des points où les gradients de température sont importants, notamment aux abords de la source de chaleur.

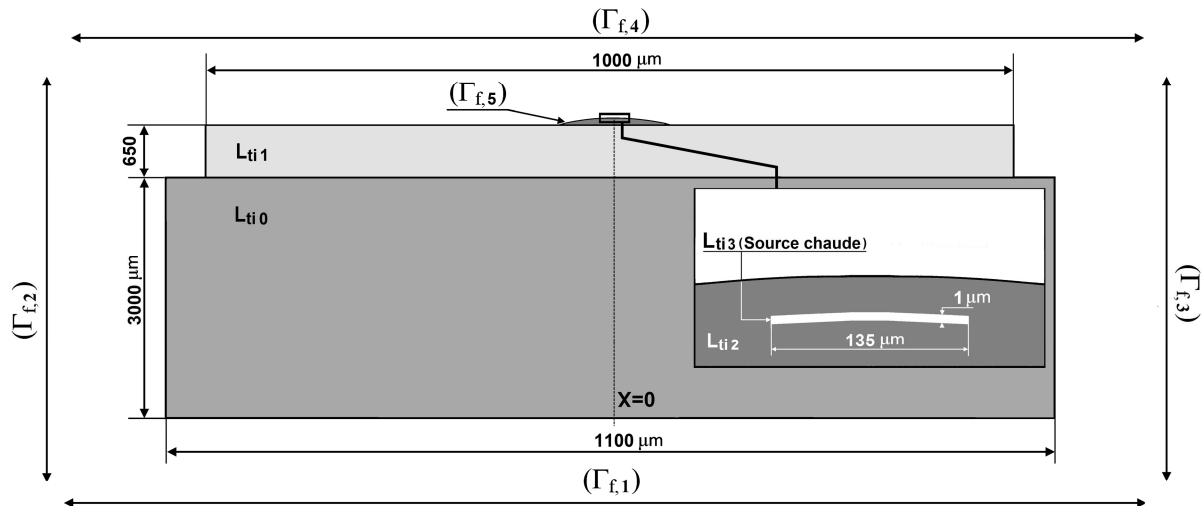


Figure 6 : *Modèle numérique de la tête d'impression*

4.2. Etude de sensibilité et recherche de paramètres

Les premiers essais comparatifs entre les thermogrammes numériques et expérimentaux obtenus, ont montré qu'il était nécessaire, compte tenu des hypothèses faites sur les valeurs des propriétés thermo-physique des matériaux constitutifs de la tête d'impression, de procéder à un ajustement de celles-ci. De plus, les dimensions de la source n'ayant pas pu être déterminées par imagerie électronique, nous ne connaissons pas la puissance volumique exacte à injecter dans le système. Par méthode inverse, une procédure de détermination de coefficients multiplicateurs appliqués à ces valeurs initiales, est mise en place.

La Figure 7 présente une analyse de sensibilité du modèle à ces différents paramètres, mais également au coefficient de convection h appliqué en surface ainsi que la valeur d'émissivité $\epsilon_{ti,2}$ prise en compte dans les échanges par rayonnement. Pour cela, une variation de 10% des paramètres fixés initialement est imposée, dans le cas du tracé d'un trait continu de 1mm à la vitesse de défilement de 60 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. L'analyse de sensibilité montre que la capacité calorifique du dot $C_{p_{ti,2}}$ ainsi que la puissance délivrée $Q_{ti,3}$ et dans une moindre mesure $\lambda_{ti,2}$, sont trois paramètres prépondérants du modèle. A l'inverse, l'évolution de la température est peu sensible à l'émissivité $\epsilon_{ti,2}$ et au coefficient de convection h . Enfin, la sensibilité du modèle aux propriétés de l'alumine reste modérée.

De fait, les paramètres retenus afin d'ajuster le modèle numérique aux données extraites de l'expérimentation, sont la capacité et la conductivité thermique du dot ($C_{p_{ti,2}}$ et $\lambda_{ti,2}$) ainsi que la puissance délivrée ($Q_{ti,3}$). La poursuite de l'analyse de sensibilité montre cependant une forte corrélation de ces différents paramètres les uns avec les autres. De fait, dans les limites que nous fixons à la variation de ceux-ci, il existe une infinité de jeux de solutions.

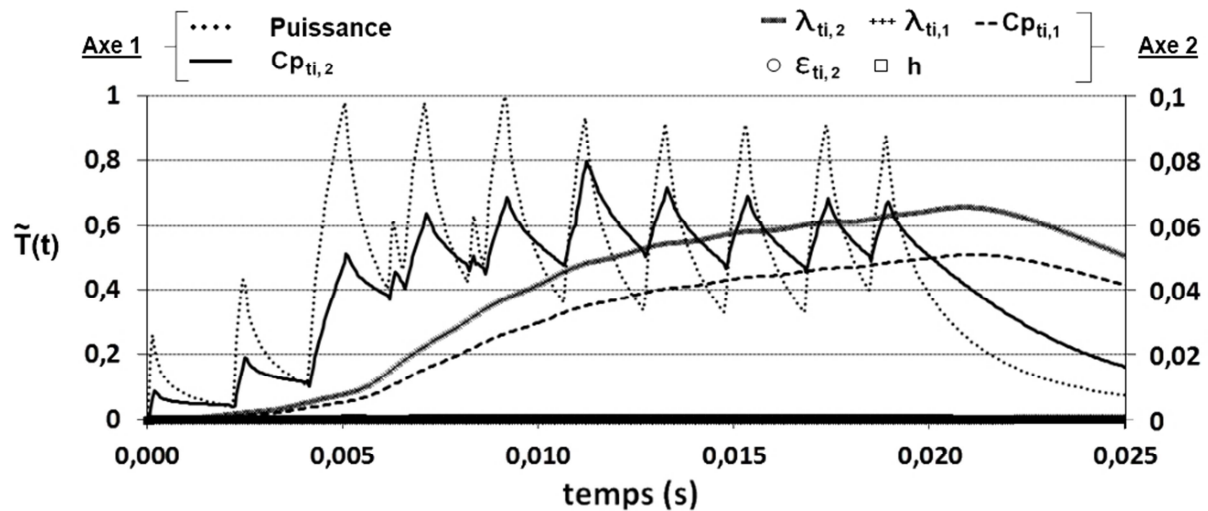


Figure 7 : Sensibilités relatives du modèle aux propriétés thermo physiques et à la puissance injectée

4.3. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

L'analyse du signal électrique délivré aux dots, nous a permis de mettre en évidence le comportement linéaire de l'évolution de la puissance, en fonction de la vitesse de défilement du ruban. Cette contrainte est prise en compte dans la procédure d'inversion. La plage comparative retenue s'étale de i1 à i8. L'estimation des paramètres est obtenue en considérant simultanément les résultats relatifs à trois vitesses : 60, 100 et 200 mm/s. Le paramètre « pr 3 » correspondant à la puissance injectée dans le système, est relatif à la vitesse 200. Les coefficients appliqués aux vitesses de 50 et 100 mm/s, sont calculés à partir de la contrainte évoquée ci-dessus, selon la formule suivante :

$$pr(v) = (A * pr3) * v + (B * pr3)$$

Avec A et B, des coefficients constants déterminés à partir des mesures du signal électrique.

Le Tableau 3 présente les paramètres optimisés de réduction du critère quadratique.

Désignation (coefficient)	Paramètre	Vitesse 60 mm/s	Vitesse 100 mm/s	Vitesse 200 mm/s
Capacité thermique (dot)	pr 1	1,393	id	id
Conductivité thermique (dot)	pr 2	0,991	id	id
Puissance	pr 3	1,094	1,133	1,214
Ecart absolu moyen (%Tmax)		1,27	1,48	3,21

Tableau 3 : Valeur des paramètres optimisés

La Figure 8 présente pour la vitesse de 60 mm/s, les thermogrammes expérimentaux et numériques obtenus à partir du jeu de paramètres optimisés. Nous constatons la bonne adéquation des résultats. L'écart absolu moyen relevé est de 1.27% pour un maximum de 6.07% et un minimum proche de 0. Nous pouvons observer qu'au-dessous de la température de $0.4 * T^{max}$ (°C), les mesures effectuées par thermographie sont légèrement en deçà de celles obtenues par simulation. En effet, compte tenu de la gamme de température d'observation imposée à la caméra thermique, le temps d'intégration des capteurs est trop court pour traduire correctement l'élévation en température du système.

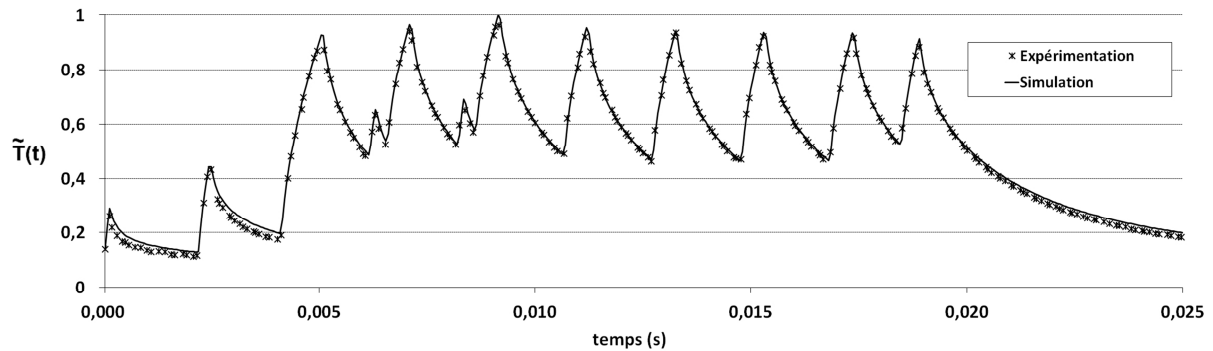


Figure 8 : Thermogrammes expérimentaux et numériques normalisés ($v = 60 \text{ mm/s}$)

Les essais comparatifs réalisés pour des vitesses de 100 et 200 mm/s donnent des niveaux d'adéquation des courbes expérimentales et numériques, semblables à ceux présentés ci-dessus. Pour un signal correspondant à la vitesse de 100 mm/s, l'écart absolu moyen relevé, est de 1,48% pour un maximum de 9,01 et un minimum proche de 0. Pour une vitesse de 200 mm/s, ces valeurs respectives sont de 3,21, 14,8 et 0,1%.

Compte tenu de la bonne corrélation des résultats numériques et expérimentaux obtenus, nous considérons que le modèle numérique bidimensionnel du système d'impression est validé. Il permet de reproduire correctement le comportement thermique de la micro-source de chaleur.

5. Conclusion

Dans ce travail, un modèle numérique de micro-sources de chaleurs utilisées dans un procédé d'impression thermique par dépôt de matière solide, est présenté. Dans un premier temps, des observations au Microscope Electronique à Balayage couplées à une analyse EDX sont utilisées afin de déterminer les dimensions géométriques et la nature des matériaux constitutifs du système. La mise en correspondance des données recueillies avec les ressources de la littérature, conduit à émettre des hypothèses sur les propriétés thermo-physiques de ces matériaux. Dans un second temps, une étude expérimentale du signal électrique alimentant les sources de chaleur, ainsi que des mesures en température sans contact, obtenues par thermographie infra-rouge, est présentée. Compte tenu de la brièveté des impulsions émises, un post-traitement des informations collectées sur plusieurs essais, est réalisé. Un unique thermogramme est obtenu, faisant apparaître les détails du comportement thermique de la source, notamment les extrêmes. Dans une dernière partie, une modélisation numérique bidimensionnelle du système est proposée. Les paramètres d'entrée du modèle sont ajustés par une méthode inverse. Les résultats obtenus permettent de prédire avec précision le comportement thermique des sources de chaleur. Par la suite, ces travaux seront réinvestis afin de modéliser en deux dimensions un système complet, tenant compte des effets thermiques induits par le déplacement des rubans et supports d'impression.

Références

- [1] BRADBURY, R., *Colorants for non-textile applications*. 2000: Elsevier. 35-60.
- [2] SANDERS, D.J., *Heat conduction in thermal transfer printing*. 1985. **63**(1).
- [3] UYHAN, R. and J.A. KING-HELE, *Modeling of thermal printers*. 2008. **32**: p. 12.
- [4] WEBB, P.W. and HANN, J.A, *Measurement of thermal transient in a thermal print head used for dye diffusion colour printing*. 1991. **138**: p. 98.
- [5] INCROPERA, F.P., *Introduction to heat transfer*. 2007, Hobokenm NJ: Wiley