



### Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6625>

#### To cite this version :

Myriam GHARBI, Patrice PEYRE, Cyril GORNY, Rémy FABBRO, Maryse MULLER, Muriel CARIN, Simon MORVILLE, Denis CARRON, Philippe LE MASSON - Étude thermique des bains liquides et son effet sur l'état de surface des pièces fabriquées par le procédé de Fabrication Directe par Projection Laser (FDPL) - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Etude thermique des bains liquides et son effet sur l'état de surface des pièces fabriquées par le procédé de Fabrication Directe par Projection Laser (FDPL)

**M. Gharbi, P. Peyre, C. Gorny, R. Fabbro, M Muller**

PIMM – UMR 8006 CNRS- Arts et métiers Paris Tech, 75013 Paris

**M. Carin, S. Morville, D. Carron et P. Le Masson**

LIMATB, Université de Bretagne-Sud, 56321 Lorient cedex

**Résumé :** La fabrication directe par projection laser (FDPL) est un procédé de prototypage rapide et de fabrication des petites séries de pièces complexes, par simple interaction entre un faisceau laser, un substrat, et une poudre projetée. Ce procédé a été largement étudié ces dernières années, à la fois au niveau des propriétés métallurgiques et mécaniques des matériaux obtenus [1], que de la modélisation thermo-physique du procédé [2, 3]. L'un des problèmes récurrents du procédé est la mauvaise qualité des états de surface des pièces élaborées [4], qui est directement liée à la taille, la morphologie et l'hydrodynamique des zones fondues. L'objectif de cette étude est de présenter la caractérisation expérimentale des zones fondues générées en FDPL à travers des analyses par caméra rapide, et par différents types d'analyses thermiques (caméra IR, spectrométrie), en considérant un alliage de titane : le Ti-6Al-4V. L'évolution des propriétés des zones fondues avec les paramètres du procédé (distribution spatiale de puissance laser, vitesse de scanning, débit massique) est ensuite discutée dans le détail, et corrélée aux états de surface résultants, afin de proposer des voies d'amélioration du procédé.

## 1. Introduction

Le procédé de fabrication directe par projection laser (FDPL) entraîne la formation de mauvais états de surface, dont l'origine est mal connue [5, 6, 7]. A travers une optimisation paramétrique du procédé sur un alliage de titane Ti-6Al-4V, et l'utilisation de différents diagnostics autour de l'interaction laser-poudre-zone fondue (caméra rapide, mesures thermiques), cette étude vise à mieux comprendre l'origine physique des mauvais états de surface en FDPL, mais également à décrire des grandeurs physiques locales (Température en zone fondue), rarement étudiées jusqu'alors.

## 2. Mise en œuvre du procédé de FDPL et instrumentations associées

Les essais de FDPL ont été réalisés avec un faisceau laser défocalisé présentant une distribution spatiale quasi-gaussienne (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), et un diamètre de 1.25 mm avec une distance d'interaction poudre/laser avant l'arrivée au bain liquide ( $d_i=1$  mm,  $v_p=2$  m/s). Les poudres sphériques utilisées présentent des granulométries de 45 -75  $\mu\text{m}$ . Dans cette configuration, la poudre interagit peu avec le laser et reste solide selon le calcul estimatif de la température des particules fait par l'équation (eq 1 [8]).

$$\Delta T = \frac{3A \times \Phi(x,y)}{4r_p \rho C_p} \times \frac{d_i}{v_p} \quad \text{eq 1}$$

Avec  $r_p$ = rayon de la particule,  $\rho$ = masse volumique,  $C_p$ = capacité calorifique,  $v_p$ =vitesse de déplacement de la particule,  $d_i$ =distance d'interaction poudre/laser et  $\Phi(x,y)$  = distribution spatiale du laser.

Nous avons utilisé une distribution spatiale quasi-gaussienne du laser (eq 2) déterminée expérimentalement par un analyseur de faisceau, et une distribution quasi-gaussienne de la poudre (eq 3) déterminé expérimentalement par la méthode du trou déplacé.

$$\phi(x, y) = 5 \frac{\phi_0}{(\pi.r_l^2)} \cdot \exp\left(\frac{-5.(x^2+y^2)}{r_l^2}\right) \tag{eq 2}$$

$$D_m(g.s^{-1}.m^{-2}) = 5 \cdot \frac{D_{m0}}{(\pi.r_p^2)} \cdot \exp\left(\frac{-5.(x^2+y^2)}{r_p^2}\right) \tag{eq 3}$$

Dans ces conditions, des murs de 40 mm de long ont été réalisés à partir de plaquettes d'épaisseur 2 mm, en utilisant les conditions expérimentales résumées en tableau 1, et avec des temps de pause inter-couche fixes  $t_p = 10$  s.

Des analyses des zones fondues (ZF) réalisées avec une caméra CCD rapide ( $f_{max}=10$  kHz), ont permis d'évaluer: les dimensions des ZF (Figure 1), l'interaction poudre-métal liquide, et l'hydrodynamique des ZF (vitesse fluide, stabilité du bain).

Sur chaque mur ont été relevés: (1) la largeur  $e$  et la hauteur par couche moyenne  $\Delta h$ , (2) les paramètres topographiques de la surface mesurés perpendiculairement au substrat initial, en considérant une longueur d'onde de coupure (Cut-off) de  $90 \mu m$ , pour séparer les valeurs de topographie du 3<sup>ème</sup> ordre (rugosité  $R$ ), de celles du 2<sup>ème</sup> ordre (ondulation  $W$ ). Les paramètres  $R_a$  et  $W_a$  correspondent aux moyennes arithmétiques par rapport à la ligne de régression du profil  $Z(x)$ . Les paramètres  $R_t$  et  $W_t$  correspondent à l'écart maximal creux-bosse du profil. Le paramètre  $W_t/2$  est assimilable à la hauteur du ménisque latéral (Figure 3).

$$R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)|. dx \tag{eq 4}$$

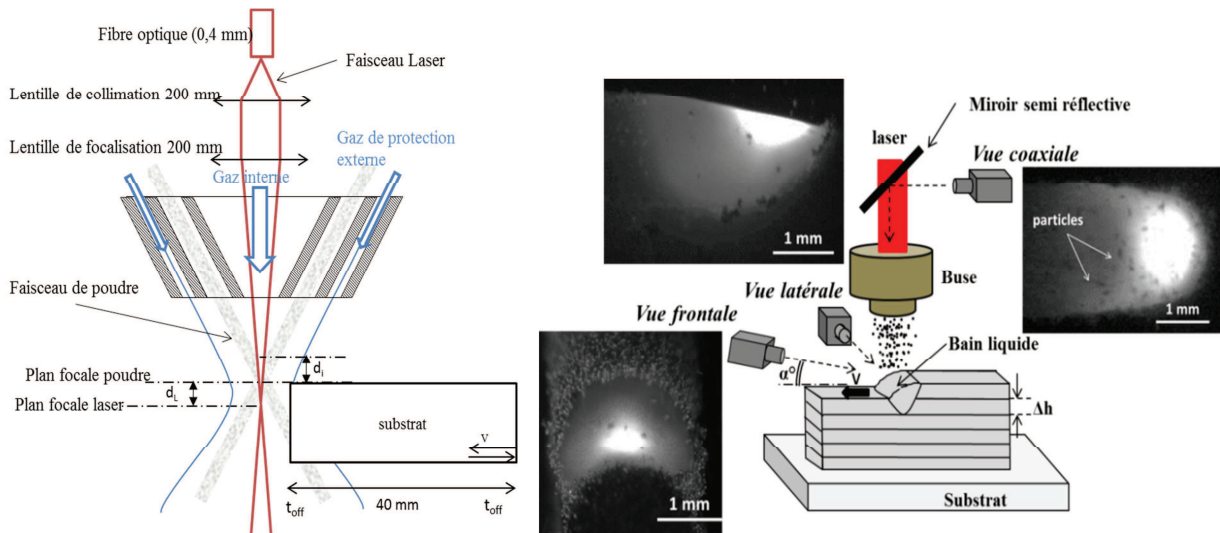


Figure 1 : Fabrication Directe par projection laser – (a) configuration expérimentale (b) Positionnement des caméras de contrôle du procédé

Différentes mesures thermiques ont été réalisées autour du procédé de FDPL :

- Des mesures par thermocouple de type K (diamètre  $125 \mu m$ ) en deux points du substrat ;
- Des analyses par caméra thermique Flir SC4000 ( $2-4 \mu m$  de bande spectrale) de la distribution de température dans le mur et le substrat ;
- Des mesures par pyrométrie optique dans la zone fondue en utilisant la loi de Planck.

$$L_{\lambda,B}(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left(\exp\left(\frac{hc}{k_b\lambda T}\right) - 1\right)}, \quad \text{eq 5}$$

Avec  $h$  : la constante de Planck,  $c$  la célérité de la lumière et  $k_b$  la constante de Boltzmann.

Deux techniques de pyrométrie optique différentes (pyrométrie spectrale et pyrométrie 2D à bande spectrale) sont utilisées pour mesurer la température du bain liquide (Figure 2 (b)). Ces deux techniques ont été étalonnées en utilisant comme référence la luminance du niobium et du vanadium à leur point de fusion, dont l'émissivité est connue et donnée dans [9, 10, 11, 12].

Un spectromètre (pyrométrie spectrale), utilisé dans la gamme de longueurs d'onde 500-700 nm à une fréquence 500 Hz et pendant un temps d'intégration de 1 ms, permet de mesurer simultanément et indépendamment la température  $T$  et l'émissivité  $\varepsilon$ . Un système de deux lentilles (distance focales 20 et 12 mm) permet d'injecter l'image de la zone observée de diamètre 0.56 mm dans une fibre de 1 mm de diamètre reliée au spectromètre. La technique, décrite dans [13], ne fait aucune hypothèse forte sur l'émissivité du corps étudié, et ne nécessite aucune connaissance préalable de cette émissivité. La variation d'émissivité avec la longueur d'onde est cependant supposée toujours pouvoir être décrite par une relation du type  $\varepsilon = m.\lambda + b$ . L'algorithme de Levenberg-Marquardt [18] permet de déterminer, d'après le spectre de la zone observée, la valeur des coefficients  $m$ ,  $b$  et les températures de manière indépendante. Les valeurs d'incertitudes (cf [13]) sont évaluées à environ 4% pour notre dispositif.

Une caméra (Pyrométrie 2D à bande spectrale) Photron CMOS, utilisée avec une fréquence de 250 à 2000 Hz et un temps d'intégration de 0.5 à 2 ms selon la configuration a été étalonnée de manière à pouvoir déterminer la luminance en chaque point du bain liquide. Cette luminance permet, en supposant l'émissivité de la zone observée comprise entre 0.3 et 0.4 pour le Ti6Al4V (déterminée par pyrométrie spectrale), de déduire la température avec une incertitude de l'ordre de 90 K, 75 et 100 K respectivement pour 2100 K, 2600 K et 3300K.

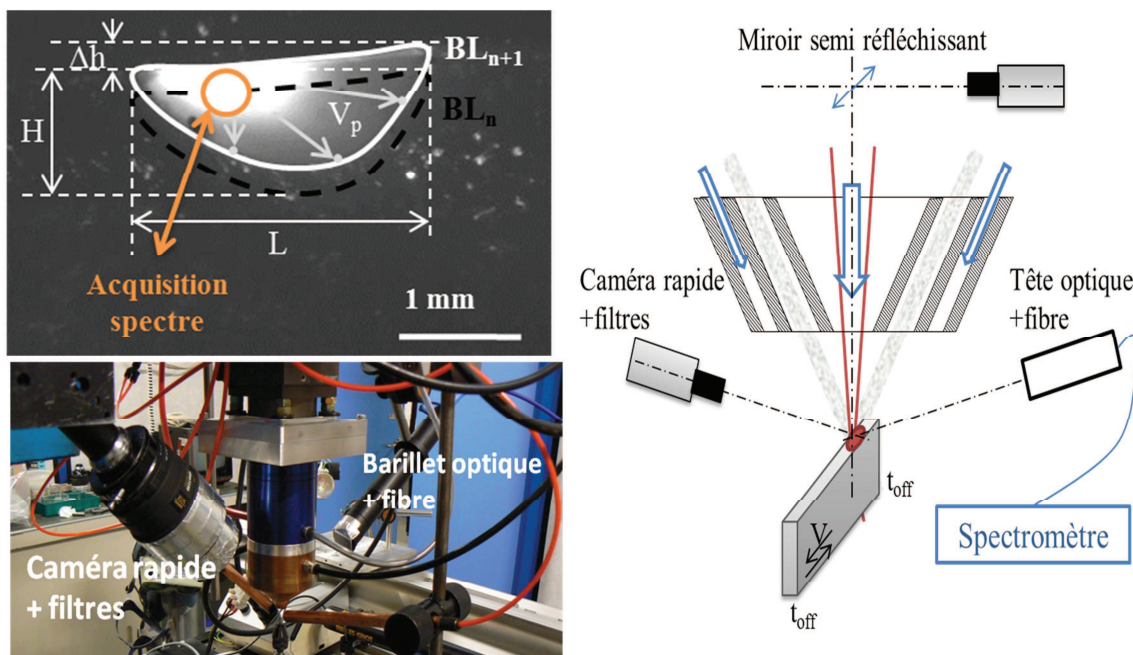


Figure 2 : (a) Vue latérale d'une zone fondue et dimensions associées ( $L$ = longueur de ZF,  $H$ =hauteur de ZF,  $\Delta h$ =hauteur par couche) (b) dispositif expérimental de pyrométrie optique

Tableau 1: Conditions expérimentales ( $P$ ,  $V$ ,  $D_m$ ) utilisées pour les essais de FDPL

Puissance laser $P_0$ (W)	Vitesse Buse/pièce $V$ (m/min)	Débit massique moyen $D_m$ (g/min)
320, 400, 500	0.1, 0.2, 0.4, 0.6	1, 2, 3

### 3. Effets des dimensions du Bain Liquide sur l'état de surface

Les analyses de surface réalisées permettent de distinguer (Figure 3): (1) un phénomène périodique d'ondulation, attribué au bain liquide métallique, et à sa position d'équilibre sous l'effet cumulé des forces de gravité ( $P_g = \rho \cdot g \cdot h$ ) et des forces de capillarité ( $P_\gamma = \frac{2\cdot\gamma}{R}$ ) (ondulation  $W$ ) (2) une rugosité plus microscopique, attribuée aux particules agglomérées, soit partiellement fondues soit restées solides, surtout localisées dans les parties concaves de la surface (micro rugosité  $R$ ).

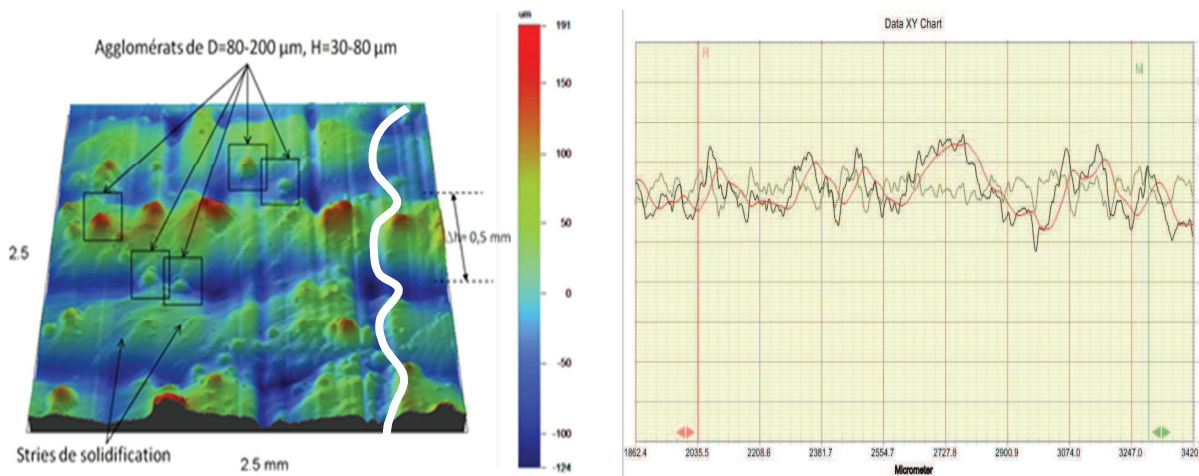


Figure 3 : (a) topographie 3D d'une surface élaborée par FDPL (présence d'ondulation  $W$  et de rugosité  $R$ ), (b) profil de rugosité d'un mur avec distinction de  $R$  et  $W$

On s'intéresse ici aux paramètres d'ondulation (ménisques latéraux), associés à la stabilité des zones fondues. On remarque que la hauteur des ménisques latéraux  $W_t$  diminue avec  $P$  ( $W$ ), et avec la vitesse  $V$ , (Figure 4). Ce résultat peut s'expliquer par l'étude de l'évolution simultanée des hauteurs par couche  $\Delta h$  et des tailles de zones fondues ( $L$ ,  $H$ ) avec  $V$  et  $P$  (rappel : (1) On peut estimer la hauteur  $\Delta h$  par couche avec  $\Delta h = (D_m \times L) / (\rho \times V)$  [14] (2) les dimensions du Bain liquide ( $H$ ,  $L$ ) dépendent directement et uniquement de l'énergie linéique  $P/V$  ( $J/m$ )). Ainsi, on peut montrer que la hauteur des ménisques  $W_t$  diminue linéairement avec le rapport de dilution  $H/\Delta h$  (Figure 4 b.). Cependant, en régime continu, on atteint des hauteurs minimales  $W_t/2$  de ménisques de l'ordre de  $40 \mu m$ .

Au final, les meilleurs états de surface ( $W + R$ ) sont obtenus avec des hauteurs par couche réduites, associées à des profondeurs fondues  $H$  importantes. Ce résultat, qui traduit l'amélioration des états de surface  $W$  avec des hauteurs de liquide importantes, montre la prédominance des effets capillaires sur les effets de gravité, ce que confirme la valeur moyenne du Nombre de Bond  $Bo$  ( $Bo = P_g/P_\gamma = 0,2$ ). Par ailleurs, les premiers essais réalisés en régime pulsé ( $f=60$  Hz à 100 Hz), ont permis de mettre en évidence une fenêtre paramétrique optimale qui améliore considérablement les états de surface.

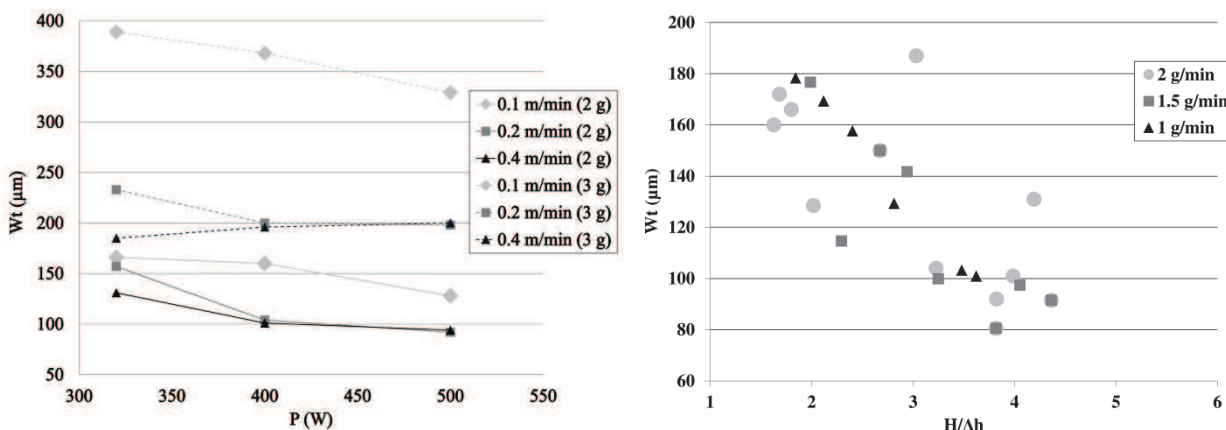


Figure 4 : (a) effet de  $P$  et  $V$  sur la taille des ménisques  $W$  (b) effet de la dilution sur l'état de surface

#### 4. Etude thermique du procédé de FDPL

Nous avons réalisé des mesures thermique par thermocouples et caméra thermique pour des régimes différents (continu et pulsé  $f=60/100$  Hz) et pour une puissance moyenne constante ( $P_m=400$  W).

Les valeurs mesurées par thermocouple dans le substrat ont été comparées avec succès avec les cycles  $T=f(t)$  obtenus par caméra thermique pour une émissivité  $\epsilon=0.6$ . Nous représentons en (Figure 5) l'évolution de la température dans le substrat pour les trois régimes. Le même cycle thermique global de température est obtenu (avec une valeur moyenne de l'ordre de  $550 \pm 50$  °C au bout de 300 s). Donc, à puissance moyenne constante le cycle thermique global  $T=f(t)$  dans le substrat est identique entre le régime pulsé et continu, malgré la différence d'états de surface (le régime pulsé réduit fortement  $W_t$  et  $R_t$ ). Une analyse par caméra thermique avec  $\epsilon=0.6$  confirme ce résultat (Figure 6).

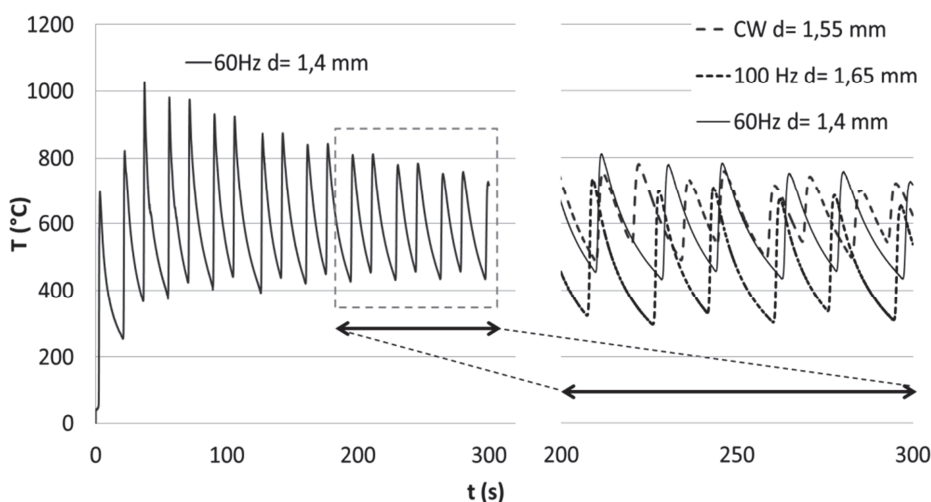


Figure 5 : Températures du substrat mesurées par thermocouples (à distance  $d$  de la 1<sup>ère</sup> couche) pour différents régimes (continu, pulsé 60Hz et pulsé 100 Hz) pour une température moyenne de 400 W

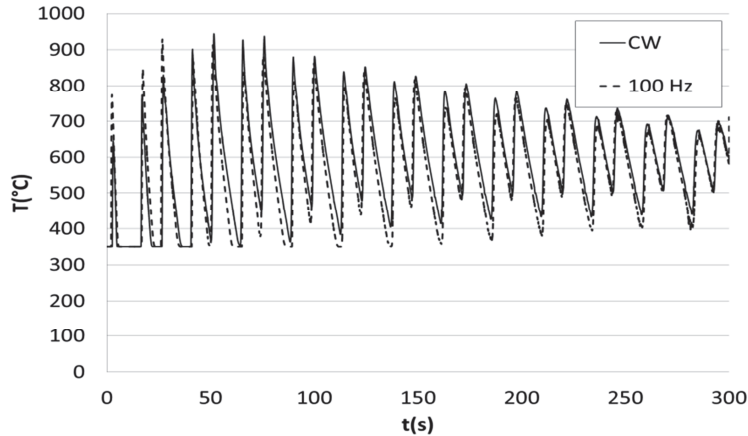


Figure 6 : Températures mesurées par caméra thermique dans le substrat (à  $d=1.5$  mm de la 1ère couche) pour un régime pulsé ou continu à une puissance moyenne de 400 W

Par contre, les variations d'états de surface, directement corrélées aux variations des dimensions des zones fondues (Figure 4), doivent donc également dépendre des gradients de température  $\partial T/\partial x$  au cœur de ces zones fondues, qui sont à l'origine des mouvements de convection thermo-capillaires (vitesse fluide  $V_f$  mesurée par caméra rapide de l'ordre de 0.5 m/s en surface) via une variation des gradients de tensions de surface  $\partial\sigma/\partial T$ . Il est donc important de mesurer les températures dans les bains liquides métalliques afin d'estimer leur impact sur la géométrie stabilisée des murs. Les niveaux de température atteints sont également importants pour estimer des problèmes de vaporisation éventuels.

Nous avons mesuré la température dans le bain liquide grâce à une caméra coaxiale (pyrométrie 2D à bande spectrale) pour différentes puissances (320, 400, 500 et 600 W).

Le calcul des incertitudes sur les températures mesurées a été fait comme suit: (1) calcul de l'incertitude sur le coefficient  $k'$   $|dk'/k'| = 5\%$  de l'équation d'étalonnage par la méthode des moindres carrés (LSM) [17] (avec  $\frac{\partial \epsilon}{\epsilon} = 2\%$  [11] et  $\partial N_g/N_g = 2\%$ ). (2) Calcul des incertitudes sur la luminance du corps noir, en considérant une relation linéaire entre  $L_B$ ,  $N_g$ ,  $\epsilon_{IR}$  et  $k'$  (eq 6), (3) Calcul de l'incertitude sur la température (eq.7)

$$|dL_B/L_B| = |dN_g/(N_g - d)| + |dk'/k'| + |d\epsilon_{IR}/\epsilon_{IR}| \tag{eq 6}$$

$$2. dT = |T(L_B + dL_B) - T(L_B - dL_B)| \tag{eq 7}$$

Les résultats mettent en évidence un gradient spatial de température  $\partial T/\partial x$  plus important à puissance élevée (Figure 7), et des températures maximales supérieures à 3000 K, qui dépassent donc 2770 K, la température de vaporisation de l'Aluminium, au-delà de  $P=500$  W. Dans ces conditions, le matériau élaboré par FDPL aura donc une composition chimique différente de la poudre initiale.

Les gradients moyens de température  $G_{moy}=\partial T/\partial x$  obtenus en zone fondue varient de 788 à 1450 K/mm entre 320 W et 600 W, ce qui traduit des vitesses fluides latérales théoriquement deux fois plus élevées à forte puissance. Par contre, les gradients thermiques maximaux  $G_{max}$ , présents en bord de zone fondue semblent diminuer avec la puissance (tableau 2).

A titre comparatif, des calculs thermiques-fluides résolvant de façon couplée les équations de la chaleur et de Navier-Stokes ont permis [15,5] de confirmer l'ordre de grandeur des vitesses fluides estimées par caméra rapide ( $V_f=0.5-1$  m/s en surface [15]) dans les zones fondues en considérant

des forces thermo-capillaires, et un coefficient  $\partial\sigma/\partial T = -10^{-4} \text{ N.m.K}^{-1}$  pour le Ti-6Al-4V [16]. Le modèle numérique 2D complémentaire de ce travail est présenté en [15].

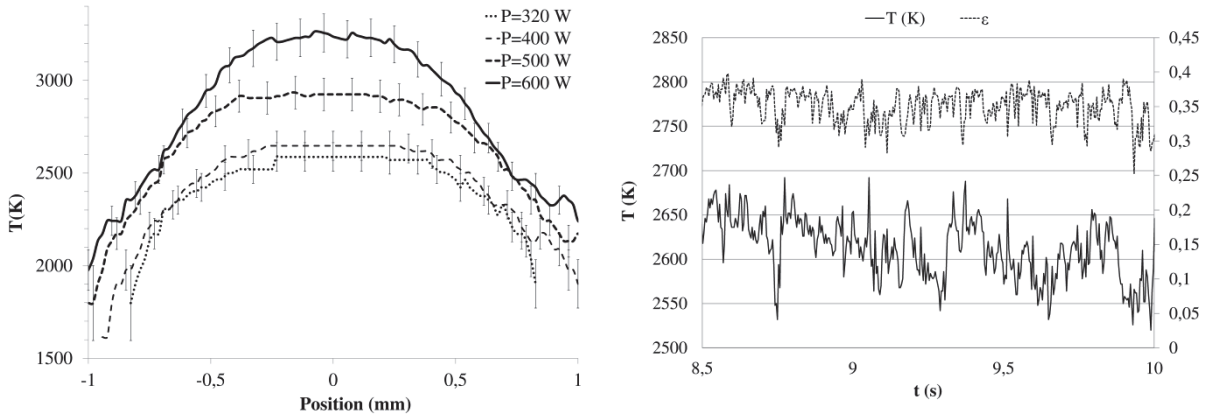


Figure 7 : (a) Evolution de la température en fonction de la largeur du Bain liquide (pyrométrie 2D à bande spectrale) (b) Evolution de la température et de l'émissivité  $\epsilon$  au cours du temps pour  $P=600 \text{ W}$ ,  $D_m=1.1 \text{ g/min}$  et  $V=0.4 \text{ m/min}$  (pyrométrie spectrale)

Tableau 2 : Evolution du gradient thermique moyen  $G_{moy}$  et maximal  $G_{max}$  en ZF en fonction de la puissance (mesures expérimentales)

P(W)	320	400	500	600
$G_{moy}$ (K/mm)	788	1032	1136	1450
$G_{max}$ (K/mm)	2500	1970	1750	1840

La pyrométrie spectrale permet de mesurer simultanément la température et l'émissivité (Figure 7). La température moyenne mesurée (sur une tache de 0.56 mm) est de 2600 K avec une émissivité de 0.37, sachant que (1) la température de vaporisation de l'Aluminium est de 2770 K (2) le bain liquide présente un gradient de température important (Tableau 2). Ce résultat confirme donc que l'Aluminium se vaporise en surface du bain liquide à la puissance de 600 W.

Ces mesures de température permettent donc de définir une plage expérimentale favorable permettant de limiter la vaporisation de Al.

Vis-à-vis des états de surface, les évolutions des gradients thermiques maximaux obtenus expérimentalement permettent de mettre en évidence des variations de vitesses fluides de l'ordre de 50 % par convection thermo-capillaire (eq.8). On peut donc supposer que la réduction des gradients thermiques  $\partial\sigma/\partial x$  obtenue à puissance élevée, permet de limiter la formation des ménisques latéraux, donc d'améliorer les états de surface. Cet effet serait combiné à l'augmentation du paramètre dilution  $H/\Delta h$  comme le confirme un modèle analytique récent [7].

$$\mu \frac{\partial V_f}{\partial y} = \gamma_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{eq 8}$$

Avec  $\mu$ =viscosité dynamique (Pa.s),  $\gamma_T$  = coefficient thermo-capillaire (N/m.K)

## 5. CONCLUSION

Une étude instrumentée du procédé de fabrication directe par projection laser a été menée sur un alliage de titane, avec pour objectif principal de comprendre l'origine des états de surface obtenus après solidification, et d'accéder à des grandeurs physiques (température, vitesse fluide) qu'on puisse comparer à de la simulation numérique. Différents résultats importants ont été mis en évidence

- (1) Les états de surface (R, W) sont améliorés avec une énergie linéique importante  $P/V$  donc un volume de bain liquide plus important



- (2) L'utilisation d'un régime laser pulsé permet d'améliorer les états de surface
- (3) Des températures maximales supérieures à 3000 K ont été mesurées au centre des zones fondues par une technique de pyrométrie 2D à bande spectrale. Ces niveaux de température peuvent entraîner la vaporisation de l'Aluminium présent dans l'alliage.
- (4) Des vitesses fluides, issues de la convection thermo-capillaire, et comprises entre 0.5 et 1 m/s ont pu être mesurées en surface de la zone fondue
- (5) Des gradients thermiques maximaux de 1750 à 2500 K/mm ont été mis en évidence dont l'évolution avec la puissance permet d'expliquer l'amélioration des états de surface à puissance élevée.

Ces résultats ne permettent toutefois pas encore complètement d'expliquer l'origine précise des évolutions d'états de surface obtenues en FDPL.

## REFERENCES

- [1] J.Maisonneuve, C.Colin, Y.Bienvenu & P.Aubry, Etude des phénomènes thermiques associés à la fabrication directe de pièces en TA6V, Actes de Matériaux'2006, (Dijon (2006)
- [2] A.Fathi, E.Toyserkani, A.Khajepour, M.Durali, J.Phys D : Applied Physics, 41 (2006), 2613-2623
- [3] A.Kumar, S.Roy, Computational Materials Science, 46 (2009), 495-506
- [4] A.Pinkerton, L.Li, Applied Surface Science, 208-209 (2003), 411-416
- [5] P.Peyre, M. Gharbi et al, Actes de la Conférence Thermec'2011 (Québec, 1-5 Aout 2011) (à paraître)
- [6] M. Gharbi, P. Peyre, C. Gorny, R. Fabbro, M. Carin, S. Morville, D. Carron et P. Le Masson, Fabrication directe par projection laser : problèmes d'états de surface et solutions expérimentales, Conférence PMF (St Etienne), 25-27 Mai 2011
- [7] M. Gharbi, P. Peyre, C.I Gorny, R. Fabbro, S. Morville, M. Carin, T. Malot, Influence of process conditions on surface finishes obtained with the Direct Metal Deposition laser technique, conférence ICALEO, LIA, 2011
- [8] H.Qi, J.Mazumder & H.Ki, Journal of Applied Physics, 100(2), (2006)
- [9]. Cezairliyan, A. «High-speed (subsecond) Measurement of Heat-capacity, Electrical Resistivity, and Thermal-radiation Properties of Niobium in Range 1500 To 2700 K.» Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A-physics and Chemistry A75 Issue 6 (1971): pp. 565-&.
- [10]. Cezairliyan, A., et A.P. Miiller. «Radiance Temperatures (in the Wavelength Range 522-906nm) of Niobium at Its Melting-point by a Pulse-heating Technique.» 2nd Workshop On Subsecond Thermophysics (Cnr, Ist Metrol Gustavo Colonnetti, Torino, Italy) 13 Issue 1 (1992): pp. 39-55.
- [11] McClure, J.L., et A. Cezairliyan. «Radiance Temperatures (in The Wavelength Range 525 to 906 Nm) of Vanadium at Its Melting Point by a Pulse-heating Technique.» International Journal of Thermophysics 18 Issue 1 (1997): pp. 291-302.
- [12] Pottlacher, G., T. Hüpf, B. Wilthan, and C. Cagran. «Thermophysical Data of Liquid Vanadium» Thermochemica Acta 461 Issue 1-2 (2007): pp. 88-95.
- [13] M. Muller, R. Fabbro, H. El-Rabii, K. Hirano, 2D single-band and spectral pyrometer for temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment, JLA 2012 (à paraître)
- [14] P.Peyre, R.Neveu, P.Aubry, R.Fabbro, A.Longuet, J.Phys D:Applied Physics, 41 (2008), 025403.
- [15] S.Morville et al., Modélisation thermo-hydraulique 2D d'un procédé de fabrication directe par projection laser, Conférence PMF (St Etienne), 25-27 Mai 2011
- [16] R. Wunderlich, R. Aune, L. Battezzati, R. Brooks et al: Surface Tension and Viscosity of Industrial Alloy - the ThermoLab Project, Microgravity sci. technol. XVI-1 (2005)
- [17] York, D., N.M. Evensen, M.L. Martinez, et J.D. Delgado. «Unified Equations for the Slope, Intercept, and Standard Errors of the Best Straight Line.» American Journal of Physics 72, n° 3 (2004): pp. 367-375.
- [18] Bevington, P. et Robinson, K. «Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. » [éd.] Boston McGraw-Hill. 2003, pp. 161-165

## REMERCIEMENTS

Etude est financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) à travers le projet ANR Blanc ASPECT (ANR-09-BLAN-0014-01)