

Etude de l'état de surface et des zones fondues d'un matériau usiné par un laser impulsif nanoseconde

Emilie LE GUEN^{1*}, Leila GUENAD²

¹Institut de Mécanique et d'Ingénierie I2M, Département Transferts et Fluides TREFLE, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France

²EDF R&D, Département Management des Risques Industriels MRI, 6 quai Watier, 78401 CHATOU

* (auteur correspondant : emilie.le-guen@u-bordeaux.fr)

Résumé - Aujourd'hui, l'usinage laser des métaux présente quelques avantages par rapport à d'autres procédés traditionnels. En effet, on augmente la souplesse du procédé du fait que l'usinage se réalise sans contact mécanique avec la surface. En micro-usinage, les impulsions courtes réduisent les impacts thermiques du matériau et ouvrent donc la voie à de nouveaux types d'usinage avec une précision nanométrique. A travers cette étude, on présente une nouvelle utilisation de lasers pulsés. En effet, ce type de laser est généralement utilisé pour le marquage (quelques microns de profondeur). Cette étude a permis d'usiner des profondeurs de plus de dix millimètres sur une surface de quelques centimètres carrés. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu à travers ce procédé. Une étude expérimentale a été réalisée en utilisant un laser pulsé de longueur d'onde 1064 nm avec une énergie de 1 mJ et une durée d'impulsion de 130 à 180 ns pour des fréquences de répétition allant de 50 à 100 kHz. L'influence des différents paramètres opératoires du traitement par laser a été étudiée précédemment [1]. Cet article discute des résultats expérimentaux issus des observations macrographiques de zones fondues.

1. Introduction

Au cours des dernières années, de nombreuses études se sont intéressées au traitement laser avec des impulsions courtes pour les micro-usinages comme le marquage, le perçage, le traitement de surface ou le micro-soudage [2]. Ce dernier offre une plus grande souplesse d'utilisation sans contact mécanique avec la surface. Lors d'un micro-usinage, les impulsions très courtes réduisent l'impact de la chaleur sur la matière et ouvrent de nouvelles voies avec une précision d'usinage nanométrique. Toutefois, pour une meilleure utilisation de ce procédé, il est nécessaire de comprendre précisément les phénomènes physiques qui régissent ce procédé complexe d'usinage. En raison des nombreux paramètres opératoires, les études actuellement réalisées portent essentiellement sur l'optimisation des paramètres opératoires [3, 4, 5, 6, 7, 8], néanmoins la relation entre les paramètres opératoires des procédés et les phénomènes physiques ainsi que l'état résiduel de la matière après un procédé d'usinage n'ont pas été clairement approfondis. Les travaux récents de Cicala soulignent l'importance de connaître l'impact du procédé sur la matière [8].

Une première étude expérimentale a permis d'étudier l'influence des différents paramètres opératoires d'usinage laser sur des échantillons d'acier inoxydable 316L [1]. Au vu des nombreux paramètres opératoires du procédé, l'étude a permis d'optimiser les paramètres opératoires afin d'obtenir le meilleur rendement d'enlèvement de matière. Cependant, dans cette étude, l'impact thermique sur le matériau n'a pas été étudié. Cet article présente donc une première approche à travers une étude des zones fondues obtenues au cours d'un usinage profond par laser impulsif nanoseconde. Des macrographies ont été réalisées afin

d'estimer les dimensions de la zone fondue et d'observer l'état de surface de l'échantillon usiné à travers la géométrie transverse du fond de l'usinage.

2. Conditions expérimentales

Un laser fibré impulsionnel IPG avec une longueur d'onde de 1064 nm et une puissance maximale de 50 W a été utilisé pour réaliser les différentes expériences. Les fréquences de répétition varient de 50 à 100 kHz et les durées de l'impulsion respectivement de 130 à 180 ns. L'énergie caractéristique fournie par le laser est de 1 mJ à 50 kHz et pour une puissance de 50 W. Le faisceau laser est transmis à la tête galvanométrique (tête scanner) à l'aide d'une fibre optique (figure 1). La tête galvanométrique permet de déplacer le faisceau laser sur une surface de 100 x 100 mm². Un logiciel d'interface permet de programmer l'usinage d'une surface ou d'un volume défini par l'utilisateur. La lentille de focalisation de 180 mm génère une tache focale circulaire de 45 µm de diamètre. Un analyseur de faisceau nous a permis d'avoir une information qualitative de la répartition de l'énergie de la tache focale. Cette analyse montre que la distribution d'énergie peut être considérée comme gaussienne. La répartition de l'énergie n'est donc pas homogène sur la surface circulaire impactée.

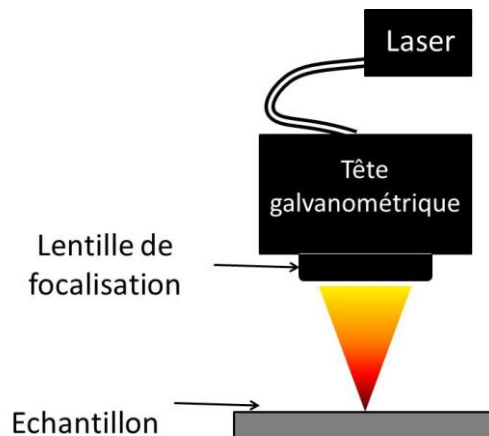


Figure 1 : Montage expérimental

Les essais sont réalisés sur un acier inoxydable 316L. Pour tous les essais, la position du point de focalisation est définie en surface de la pièce à usiner. La stratégie d'usinage est de faire des impacts laser à une distance définie afin de réaliser une géométrie prédéfinie. Il a été choisi d'usiner des carrés de 5 x 5 mm² avec des lignes à une distance définie (figure 2). Après avoir usiné une première couche, l'action est répétée 1000 fois afin d'usiner un certain volume en fonction des paramètres opératoires (figure 3). Pour effectuer un usinage, les différents paramètres opératoires variables sont les suivants :

- La puissance du laser : 20 à 50 W (le constructeur ne garantit pas une stabilisation de la puissance en dessous de 10 W)
- La vitesse de déplacement du faisceau : 100 à 7000 mm/s (limite de la tête galvanométrique)
- La fréquence de 50 à 100 kHz
- La distance entre les lignes 10 à 40 µm (afin d'avoir un minimum de recouvrement entre les lignes : spot de diamètre de 45 µm)
- La distance entre les impacts de 10 à 40 µm (afin d'avoir un minimum de recouvrement entre les impacts : spot de diamètre de 45 µm)

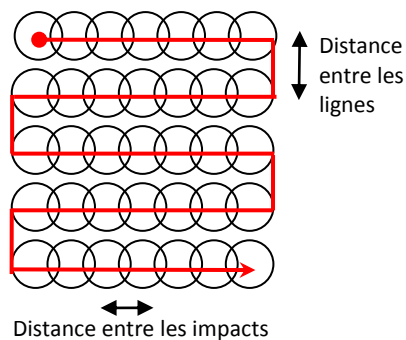


Figure 2 : Stratégie d'usinage laser

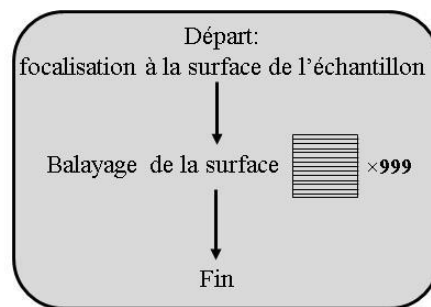


Figure 3 : Cycle d'usinage

Des observations macrographiques ont ensuite été réalisées. Le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une tronçonneuse est effectué perpendiculairement aux lignes effectuées par les impacts laser (figure 4). On obtient ainsi une coupe de l'échantillon (figure 5). Les échantillons sont ensuite polis et une attaque chimique est effectuée afin d'observer les différences de relief ou de coloration entre les différents constituants et entre les différentes orientations de cristaux d'une même phase. Des observations macroscopiques avec un grossissement maximum de $\times 1000$ sont suffisantes pour observer les zones fondues et l'état des surfaces.

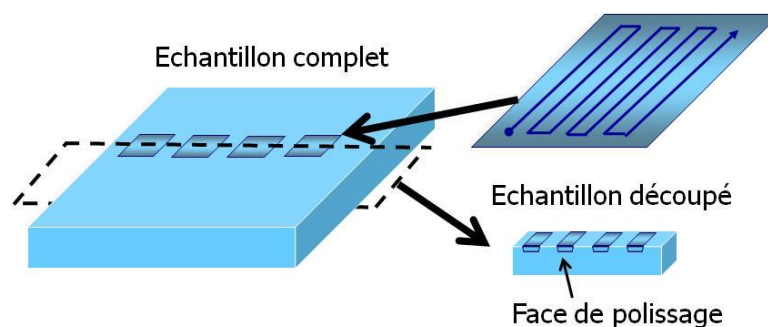


Figure 4 : Schéma de la découpe de l'échantillon avant le polissage

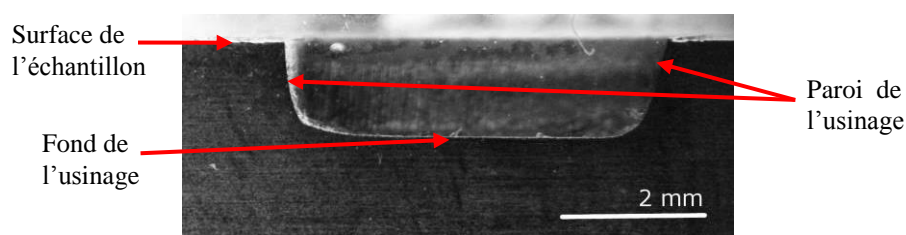


Figure 5 : Coupe de l'échantillon

Les différentes macrographies ont été réalisées sur des essais dont on a fait varier la distance entre les impacts laser et la distance entre chaque ligne. Ainsi, 4 fréquences ont été testées : 50, 65, 80 et 100 kHz. Les vitesses de déplacement du faisceau laser ont été choisies de telle sorte que la distance entre les impacts laser soit constante : 10, 20, 30 et 40 μm (tableau 1). Dans un premier temps, une puissance maximale de 50 W est utilisée c'est-à-dire que selon la fréquence, la densité de puissance reçue par l'échantillon est différente (tableau 2). Dans un second temps, une série d'essai a aussi été réalisée avec la même densité de puissance pour les fréquences respectives de 50, 65, 80 et 100 kHz. La densité de puissance est de 150 MW/cm². 40 essais, soit 40 macrographies, ont ainsi été analysés.

Fréquence (Hz)	50	50	50	50	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Distance entre 2 impacts laser (μm)	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
Vitesse de déplacement (mm/s)	500	1000	1500	2000	650	1300	1950	2600	800	1600	2400	3200	1000	2000	3000	4000

Tableau 1 : *Vitesse de déplacement du faisceau laser appliquée en fonction de la fréquence pour obtenir la distance souhaitée entre 2 impacts laser*

	1ère série: Puissance constante				2nd série: densité de puissance constante			
Fréquence (Hz)	50	65	80	100	50	65	80	100
Puissance (W)	50	50	50	50	21	28,5	37	50
Densité de puissance (MW/cm^2)	440	300	220	150	150	150	150	150

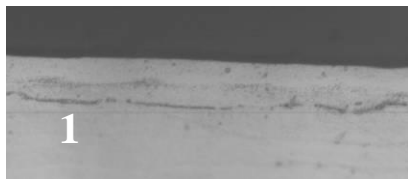
Tableau 2 : *Différents essais réalisés en fonction de la puissance et de l'énergie*

3. Observation des états de surface et des zones fondues

L'observation des surfaces usinées pourra nous aider à déterminer dans quel type de régime, on se situe : ablation ou percussion. En effet, le faisceau laser chauffe la matière à usiner. Une couche plus ou moins importante est ensuite liquéfiée puis vaporisée. L'enlèvement de matière est ainsi possible. Une épaisseur importante de matériau est fondue. Par conséquent, les variations de pression sur le liquide en fusion sont grandes et créent un effet de piston qui éjecte la matière fondue. Si les pressions sont très grandes, l'ensemble de la matière fondue est éjecté, on parle de régime de percussion. Sinon, on parle de régime d'ablation et une zone fondue reste apparente. Ainsi, les observations des différentes surfaces ont permis de mesurer des épaisseurs variables de zone fondue.

3.1. Etats de surface des fonds d'usinage

Les premières observations macrographiques de la surface du fond des carrés (figure 5) permettent de constater que l'état de la surface est différent en fonction des paramètres opératoires. Les états de la surface du fond de l'usinage ont été classés de 1 à 4 : 1 étant une surface lisse et 4 une surface très irrégulière comme on peut le voir sur la figure 6. Pour une distance entre les lignes constante, l'état de surface se dégrade quand la distance entre les impacts augmente (figure 7). En effet, le dépôt d'énergie étant gaussien, quand on augmente l'espacement entre les impacts laser, on diminue la surface commune, l'état de la surface se dégrade donc. On constate aussi que plus la puissance et donc la densité d'énergie sont faibles, plus l'état de la surface est mauvais. Il faut donc un minimum de puissance ou de densité de puissance afin d'obtenir une surface lisse et que le recouvrement entre 2 impacts se fasse. L'étude de l'influence de la distance entre les lignes permet de faire la même remarque (figure 8).



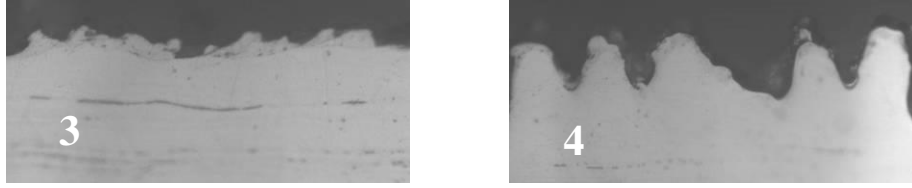


Figure 6 : Macrographies des fonds d'usinage, classement des états de surface :
1 – lisse, 2 - petite vague régulière, 3 - irrégulier, 4 - grande vague régulière

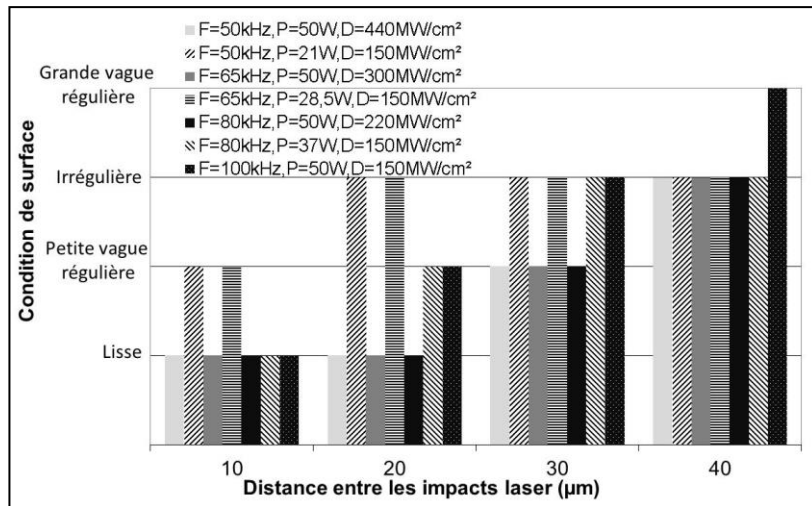


Figure 7 : Etat de surface en fonction de la distance entre les impacts, pour une distance entre les lignes constante de 20 μm

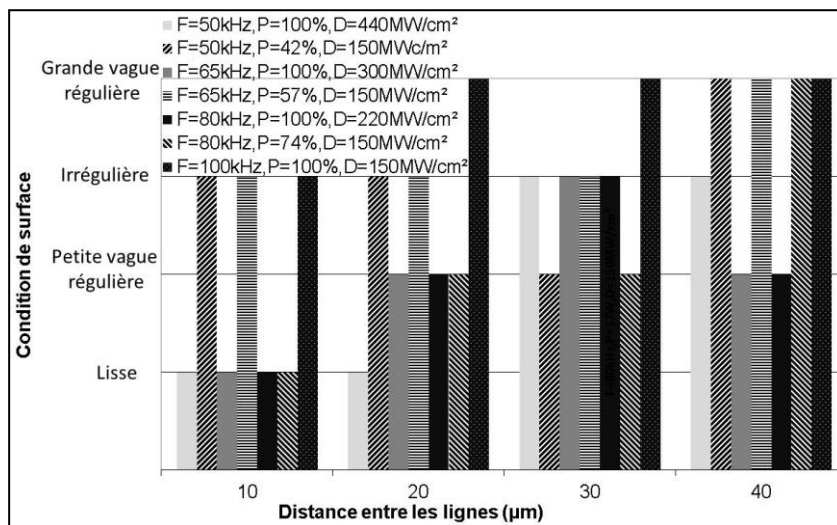


Figure 8 : Etat de surface en fonction de la distance entre les lignes, pour une distance entre les impacts constante de 30 μm

3.2. Mesures des zones fondues

A l'aide de macrographies adaptées, on peut mesurer l'épaisseur de la zone fondue sur la surface du fond et sur les parois de l'échantillon usiné (figure 9 et 10). L'influence de la distance entre les impacts et de la distance entre les lignes sur la zone de fusion sur les parois et dans le fond de l'usinage a ainsi été étudié avec une puissance constante de 50 W (figure 11, figure 12). Les zones fondues dans les fonds d'usinage et sur les parois varient de 0 à environ 25 μm. Les zones fondues sont minimales (en moyenne 2,5 μm) pour une distance

entre les impacts de 20 à 30 μm et pour une distance entre les lignes de 10 à 20 μm . Pour certains essais avec fréquence de 100 kHz, on observe que les zones fondues sont plus importantes. En effet, les zones fondues sont mélangées avec des particules de matière qui n'ont pas été éjectées (figure 10-2, 10-3). On peut supposer que les impacts laser étant temporellement rapprochés, la matière n'a pas le temps de s'évacuer avant l'impact suivant et reste piégée dans la zone fondue créée lors du précédent impact. Dans ce cas, les cinétiques sont tellement rapides que la zone fondue n'a pas le temps de se solidifier. Dans certaines conditions comme par exemple pour une fréquence de 50 kHz, une puissance de 50W et une distance entre les impacts et une distance entre les lignes de 20 μm , on n'observe aucune zone fondue : dans ce cas, les phénomènes physiques en jeu sont ceux du régime de percussion. Néanmoins, pour la plupart des paramètres opératoires, on se situerait plutôt dans un régime d'ablation.

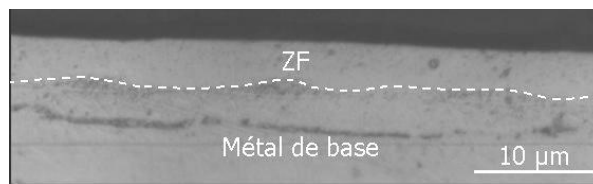


Figure 9 : Macrographie d'un fond d'usinage : observation de la zone fondue dans le fond de l'usinage

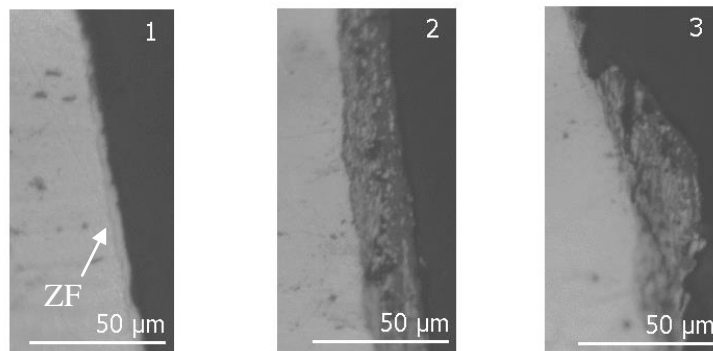
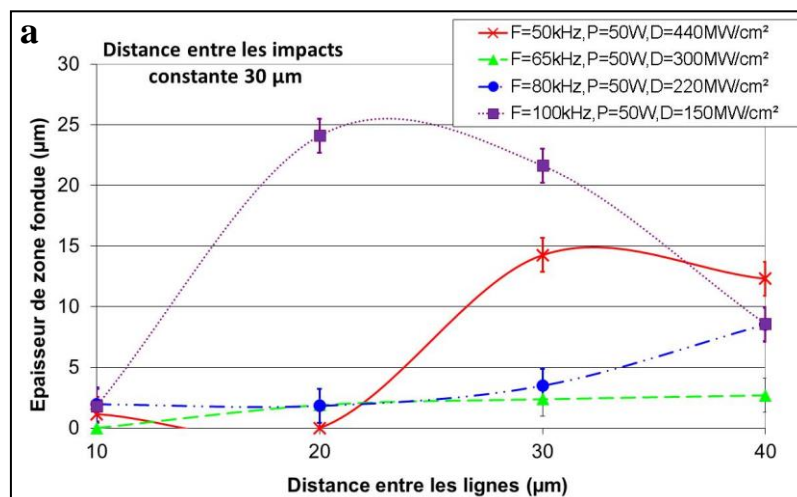


Figure 10 : Macrographie de parois d'usinage

1 : Zone fondue habituelle

2 : Zone fondue régulière mélangée avec des particules de matières non éjectées

3 : Zone fondue irrégulière mélangée avec des particules de matières non éjectées



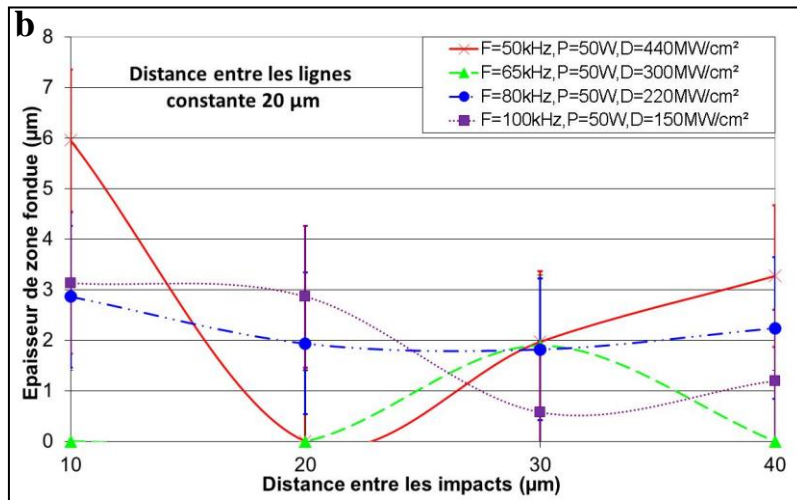


Figure 11, a et b: Mesures des zones fondues sur les parois usinées à puissance constante de 50 W

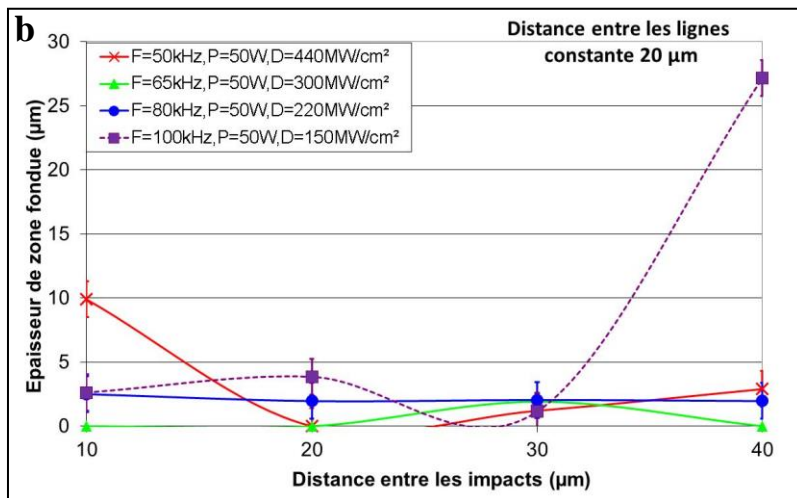
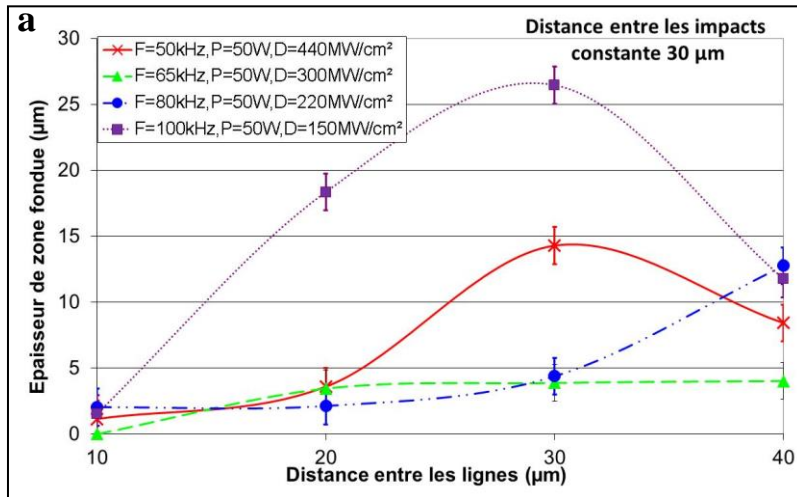


Figure 12, a et b: Mesures des zones fondues au fond de l'usinage à puissance constante de 50 W

4. Conclusion

Cette étude a permis d'avoir une première approche concernant l'état résiduel d'un matériau usiné par usinage laser impulsif nanoseconde. A l'aide des observations de l'état de surface et des zones fondues, on constate qu'il faut un minimum de puissance pour que l'état de surface soit convenable. Les distances entre les impacts et entre les lignes doivent être d'environ 20 μm , il faut donc un minimum de recouvrement entre les impacts laser sur la surface de l'échantillon. Ces paramètres opératoires ne correspondent pas exactement aux paramètres opératoires optimaux en terme de rendement d'enlèvement de matière. Néanmoins, on a constaté que le procédé d'usinage par laser impulsif nanoseconde se situe vraiment à la frontière entre les régimes d'ablation et de percussion. Dans les conditions opératoires optimaux, les zones fondues sont faibles, néanmoins, l'impact sur les propriétés mécaniques de surface du matériau n'est peut-être pas négligeable. Pour compléter cette étude, des mesures de contraintes résiduelles sont en cours de réalisation afin de véritablement caractériser l'impact mécanique dans cette gamme de paramètres opératoires.

Références

- [1] Le Guen E., Berthe L., Guenad L., Jardin N., *Preliminary study of laser deep machining*, 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, ICALEO 2012, 23-27 October 2012, Anaheim, California, Etats-Unis, Paper 143.
- [2] Meijer J., Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities, *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 2–17.
- [3] Tuersley I.P., Hoult T.P. and Pashby I.R., Nd-YAG laser machining of SiC fibre/borosilicate glass composites. Part I. Optimisation of laser pulse parameters, *Composites Part A* 29A (1998) 947–954; Part II. The effect of process variables, *Composites Part A* 29A (1998) 955–964.
- [4] Lallemand G., Jacrot G., Cicala G., Grevey D.F., Grooving by Nd:YAG laser treatment, *Journal of Materials Processing Technology* 99 (2000) 32–37.
- [5] Jackson M.J., O'Neill W., Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers, *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) 517–525.
- [6] Knowles M. R. H., Rutterford G., Karnakis D., Ferguson A., Micro-machining of metals, ceramics and polymers using nanosecond lasers, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2007) 33:95–102.
- [7] Wang X.D., Michalowski A., Walter D., Sommer S., Kraus M., Liu J.S., Dausinger F., Laser drilling of stainless steel with nanosecond double-pulse, *Optics & Laser Technology* 41 (2009) 148–153.
- [8] Cicala E., Soveja A., Sallamand P., Grevey D., Jouvard J.M., The application of the random balance method in laser machining of metals, *Journal of Materials Processing Technology* 196 (2008) 393–401.