
Faisabilité d'une mesure sans contact de la température d'un outil dans une opération d'usinage

T. El Kabir , E. Valdès, A. Fermy, T. Simon

Université de Toulouse ; UTM-IUT de Figeac ; LRP-mip (Laboratoire de recherche pluridisciplinaire du nord-est de Midi-Pyrénées) ; Avenue de Nayrac, F-46100, FIGEAC, France.

ERT 66, « moyens pour l'UGV du titane » CUFR Champollion– 81012 Albi Cedex 9

tarik@univ-tlse2.fr ; valdes@ univ-tlse2.fr; thierry.simon@univ-tlse2.fr.

Sections de rattachement : 60,61 et 63

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ.

L'utilisation des métaux durs, notamment du titane, dans l'aéronautique est en forte augmentation avec l'apparition des nouveaux avions en matériaux composites. Les pièces en titane servent d'interface dans les assemblages des pièces en composite. Il est donc nécessaire d'améliorer la productivité des pièces en métaux durs, l'Usinage à Haute Productivité (UHP) est une des solutions envisagées pour répondre à cette demande. L'augmentation de la productivité impose de non seulement surveiller la machine, mais aussi de surveiller l'usinage. L'échauffement de l'outil de coupe est un des moyens les plus pertinent pour la surveillance de l'outil de coupe . Pour ce faire, nous proposons de mesurer l'intensité du rayonnement émis par l'outil pour évaluer la dynamique temporelle de la température. Nous synthétisons dans cette communication les résultats de notre étude de faisabilité d'une mesure sans contact de la température d'un outil de coupe. Nous rappelons les éléments théoriques permettant de trouver la correspondance entre l'intensité et la température. Nous détaillons le dispositif électronique basé sur une fibre optique qui permet la transmission du rayonnement à un spectromètre assurant la mesure sensible dans la gamme infrarouge. Nous présentons un ensemble de résultats obtenus durant une opération de tournage en coupe interrompue et nous montrons leurs cohérences avec la théorie.

MOTS-CLÉS : Surveillance thermique, Usinage Haute Productivité, spectrométrie, instrumentation.

1. Introduction

Notre laboratoire LRPmip participant à l'Equipe de Recherche Technologique, ERT 66 «moyens pour l'usinage grande vitesse du titane» est situé au cœur d'une entité industrielle : La Mecanic Vallée. Association loi 1901 créée en 2000, elle est née de la volonté des industriels du secteur de la mécanique, de l'aéronautique et de la machine-outil des départements de l'Aveyron, du Lot et de la Corrèze de se regrouper afin de rechercher avec les partenaires locaux, des synergies pour faire face aux exigences et aux contraintes d'un marché de plus en plus concurrentiel. (Mecanic Vallée 2009).

Le développement des matériaux composites a pour corollaire une très forte demande de pièces en titane et en métaux durs en général. La mise en œuvre de moyens pour les matériaux composites entraîne donc le développement de ce qui est nommé : l'Usinage à Haute Productivité (UHP). L'UHP est essentiellement l'optimisation globale de l'ensemble des moyens de production : parc machines et parc outils. Pour cela, les bureaux des méthodes ont recours systématiquement à des outils scientifiques d'optimisation des conditions de coupe tels le Couple-Outil-Matière (COM), mais surtout à ce qui est nommé « l'approche globale », à l'image de l'introduction de la conception intégrée dans les bureaux d'études.

Dans le contexte global du développement des produits, l'augmentation des performances est systématiquement liée à l'introduction de mesures, de moyens de diagnostics et de corrections, soit donc à l'introduction de la mécatronique. Les moyens d'usinages des métaux durs ne font pas exception, pour garantir des usinages de hautes qualités à haute productivités, non seulement des moyens de surveillance des machines, comme pour l'Usinage Grande Vitesse (UGV) des métaux légers, doivent être développés, mais aussi des moyens de surveillance de l'usinage. C'est dans ce cadre que nous souhaitons contribuer à une instrumentation de l'usinage, et cela par la mise au point d'une mesure de la température, qui constitue une information stratégique pour la surveillance de l'usinage. Le suivi thermique d'une plaquette durant l'usinage constitue un moyen de surveillance de l'usinage attendu par la profession. La société Actarus utilise actuellement une instrumentation de systèmes de surveillance des outils permettant le contrôle direct et en continu de l'usure des outils de coupe par microsonde thermique incorporée dans l'outil. Cette instrumentation est coûteuse car elle est incorporée dans la plaquette. L'instrumentation ne peut ensuite être réutilisée, il est difficile de l'implanter systématiquement dans le cadre d'une production.

Le défi que pose le développement d'un capteur sans contact de surveillance thermique et de son instrumentation, pour les usineurs, consiste à connaître et détecter rapidement et exactement les évolutions thermiques au niveau de la zone de coupe [L. Puigegur et al.]. Pour estimer la température d'entrée et de sortie de la dent dans la matière il est nécessaire d'avoir plusieurs informations par cycle. Aucune mesure réalisée jusqu'à aujourd'hui ne permet d'avoir la mesure exacte de la température de l'arête de coupe. Des informations sur la température ou le flux de chaleur à ces temps, apporteront non seulement une connaissance de la coupe, mais devront permettre

d'optimiser les conditions de coupe des métaux durs en phase industrielle [J.Denape et al.].

Dans un premier temps nous ferons des rappels théoriques sur la théorie de rayonnement de Planck, la deuxième partie de cette étude présente l'instrumentation développée autour du spectromètre NIR infrarouge nous amenant à confronter les résultats expérimentaux à un modèle simplifié de simulation thermique de la coupe.

2. Rappel théorique

La fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de copeaux génère évidemment un frottement entre l'outil et la matière. Ce frottement produit un échauffement augmentant la température de l'outil. Cette augmentation de température provoquera un rayonnement électromagnétique décrit par la loi de Planck et donné par l'équation [1]. La loi de Planck pour un corps noir est la base de la mesure de température par analyse du rayonnement.

$$L_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} , \quad [1]$$

où C_1 et C_2 sont des constantes qui valent respectivement, $C_1 = 1,191 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^2.\text{sr}^{-1}$ et $C_2 = hc/k = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$. Avec T la température absolue en degré Kelvin, λ longueur d'onde en m, h la constante de Planck et k la constante de Boltzmann.

Ce rayonnement à une répartition spectrale, qui dépend du matériau, son intensité ou sa luminance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) peut être mesurée et son analyse permet de retrouver la température. Le flux total comporte plusieurs composantes qui peuvent perturber la mesure : l'émission thermique propre (ϵ) de l'objet visé, fonction de sa température et de son émissivité; le flux émis par l'environnement (R) et réfléchi par la surface de l'objet visé en direction du capteur; et le flux émis par l'atmosphère ambiante (τ) séparant l'objet du capteur. La contribution (τ) est négligeable car l'espace entre le capteur et la surface émettrice est petit (environ 10 mm) et l'ensemble pièce-capteur est enfermé dans une enceinte opaque. De même la contribution (R) est négligeable compte tenu du choix de la longueur d'onde, nous permettant de ne pas tenir compte de l'éclairage ambiant. L'émissivité correspond au rapport entre l'énergie rayonnée par le matériau à la température T et l'énergie rayonnée par un corps noir à la même température. Un corps noir est un corps qui absorbe tout rayonnement incident et ce à n'importe quelle longueur d'onde. Son émissivité est égale à 1.

$$\epsilon = L_{\text{obj}}/L_{\text{cn}} , \quad [2]$$

avec L_{obj} = luminance de l'objet mesuré et L_{cn} = luminance du corps noir.

L'émissivité est une propriété des surfaces, varie entre 0 et 1, dépend de la nature du matériau, de son état de surface, de la longueur d'onde et de l'angle d'observation. Sa connaissance est indispensable pour calculer la température absolue à partir du signal des flux lumineux. Dans le cas des matériaux non métalliques opaques aux infrarouges, elle s'approche le plus souvent 0,9. En revanche, pour les matériaux métalliques, elle est souvent faible ($< 0,5$). Dans ce cas, le facteur de réflexion est élevé, ce qui perturbe la mesure par des flux issus de l'environnement (effet miroir de renvoi). À noter que l'oxydation ou la rugosité des surfaces augmentent l'émissivité. Dans notre cas, nous nous intéressons pas à une mesure de température absolue mais une variation de rayonnement, nous permettant ainsi de contourner les difficultés liées à l'émissivité.

3. Instrumentation

Notre choix d'instrumentation s'est porté sur un spectromètre proche infrarouge afin d'évaluer la température d'un corps par la mesure de son rayonnement dans une bande spectrale de 0,9 à 2,5 μm . La sélection de cette bande spectrale s'explique par les propriétés de rayonnement des matériaux que nous allons usiner et portés à une température T , souvent assimilé au *corps noir* de référence. L'intérêt de la mesure par rayonnement est d'être sans contact. L'instrumentation du système de mesure avec spectromètre permet son utilisation en temps réel et en continu lors de l'usinage de matériaux métalliques. L'utilisation de ce genre capteurs optiques sans contact permet une variété de fonction de contrôle et d'inspection en cours d'usinage : mesures de température par capteurs, détection de défauts superficiels de l'arête de coupe; caractérisation de flux rayonné par la zone de coupe. Le système doit être capable d'échantillonner à des cadences de l'ordre de 10 ms avec temps d'intégration court (quelques millisecondes) pour ne pas être perturbé par des conditions de coupe. Nous proposons un spectromètre NIR256-2.5 modèle de la société Ocean Optics sensible dans l'intervalle [900nm-2500nm]. La figure 1 présente le spectre d'émission pour des températures de 500 K et 1000 K, températures que nous rencontrons dans l'usinage des métaux durs. Nous constatons que le spectre reste dans la bande passante du spectromètre utilisé. Une fibre optique servant de filtre dans la même bande passante que le spectromètre d'une longueur d'un mètre permet d'acheminer l'information à mesurer vers celui-ci. La fibre optique se monte directement sur l'outil, près de la plaquette afin que la zone de mesure de rayonnement soit proche et située exactement là où peut se produire le contact plaquette à usiner et matériau usiné (voir figure 2). Nous utilisons des outils comportant plusieurs arêtes de coupe et des vitesses de rotation élevées. La fibre optique sera placée près d'une arête et prendra la mesure à un instant donné du cycle afin qu'il donne un renseignement sur l'usure de la plaquette. Nous assurons ainsi plusieurs mesures par tour d'outil. L'usure de l'outil provoquant une augmentation de température et en conséquence une augmentation du flux magnétique sera détecté par l'analyse de l'évolution temporelle des mesures.

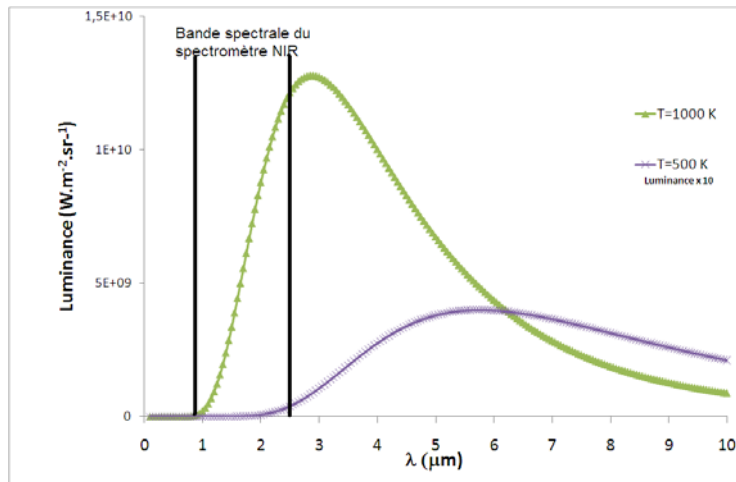


Figure 1 . Courbes $L(\lambda,T)$ luminance en fonction de la longueur d'onde à $T= 500 K$ et $T= 1000K$, montrant que la bande passante du spectromètre contient une partie non négligeable de la luminance pour $500 K \leq T \leq 1000 K$. L'intensité de la courbe $T=500K$ a été multipliée par un facteur 10, pour être bien visible sur le graphe $L(\lambda,T)$.

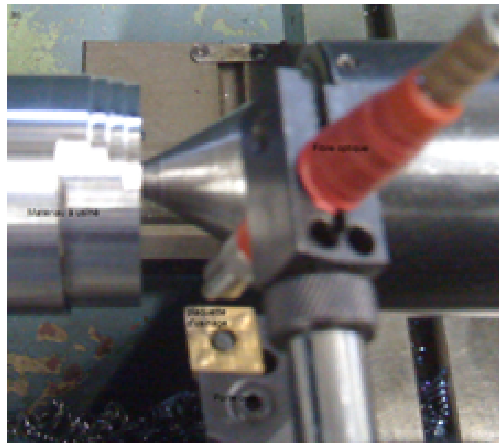


Figure 2 . Dispositif expérimental : la fibre optique est placée à 2mm de la plaquette à usiner, permettant de détecter le flux de chaleur émanant de l'interface pièce-outil et/ou copeau-outils en cours d'usinage.

4. Résultats expérimentaux

4.1. Description du banc d'essais pour la faisabilité de l'instrumentation

Pour réaliser la validation de notre instrumentation, nous devons être capable de générer un copeau discontinu, que ce copeau transmette à la plaquette suffisamment de chaleur afin de détecter les périodes froides et les périodes chaudes et que les durées de chauffe et de refroidissement soit suffisantes pour être dans une bande passante acceptable du point de vue de la mesure. Pour répondre à ces trois critères, nous avons choisi de générer le copeau discontinu par un tournage excentré (qui supprime la réalisation d'une instrumentation tournante), avec une vitesse de coupe suffisamment faible, pour être dans de mauvaises condition de coupe (en dessous de la vitesse de coupe minimale), ainsi, nous générerons un échauffement important et nous disposons de beaucoup de points de mesures lors de la génération du copeau et de la période de refroidissement.

Nous observons la luminance de la plaquette et non celle du matériau usiné, le choix de la matière à usiner est donc juste conditionné par la nécessité d'obtenir un échauffement suffisant de la plaquette afin de pouvoir mesurer les variations de température de celle-ci. Le barreau pour l'expérimentation est en acier 30NCD16, il est de diamètre 32 mm. Nous avons utilisé un outil de chariotage classique avec une plaquette non revêtue de marque CERATIZIT. Afin d'être en dessous de la vitesse minimale, nous avons choisi une vitesse de coupe inférieure à 35 m/min. Dans la gamme de vitesse du tour conventionnel disponible, nous avons choisi une rotation de broche de 315 tr/min. Soit un tour en 190 ms. L'excentration de 3 mm ainsi que l'avance par tour de 0.2mm ont été choisies pour produire une section de copeau capable de générer un échauffement suffisant.

4.2. Description des résultats

La variation de la luminance à longueur d'onde fixe sur plusieurs prises de copeaux discontinus est décrite par la figure 3. L'instrumentation est capable de distinguer les périodes de chauffe, les pics, des périodes de refroidissement, les « vallées ». Etant donné que la luminance a été mesurée à moins de 2 mm de l'arrête de coupe, les pics de luminance ne sont pas significatifs de la température de la plaquette mais de celle de la coupe. Par contre, la mesure de la luminance dans les « vallées » correspond exactement à celle de l'arête de coupe de la plaquette, elle donne donc accès à la mesure de la température de l'arête de coupe pendant le refroidissement. Il est remarqué sur la figure 3, que la luminance des périodes de refroidissement est globalement constante, ce qui n'est pas le cas pour les période de chauffe qui sont plus soumises aux aléas du déroulement du copeau sur la face de coupe.

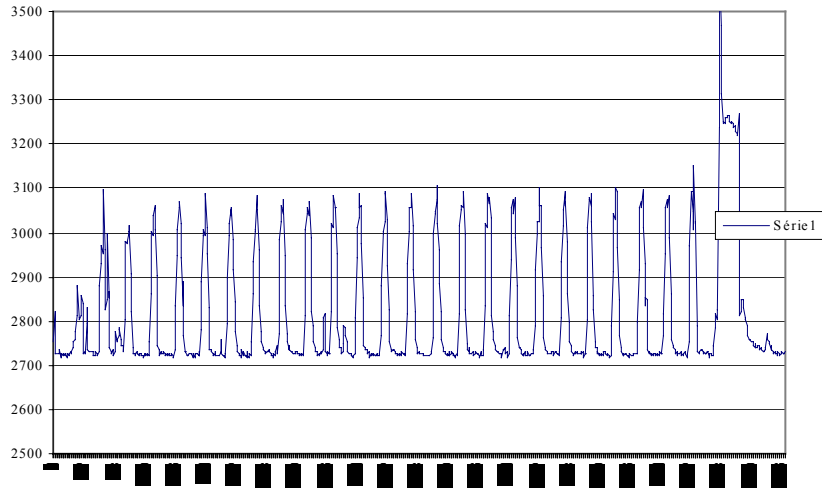


Figure 3 : Mesure de luminance à une longueur d'onde fixe de la plaquette en fonction du temps. Obtenues en cours d'usinage à l'aide d'un spectromètre NIR infrarouge.

Le choix de la mesure d'un seul point plutôt qu'une cartographie avec une caméra, nous donne accès grâce à la large bonne passante du spectromètre, 6 ms entre chaque mesure, au comportement thermique transitoire de l'arête de coupe, voir Figure 5. Ce comportement transitoire qui est riche en informations sur le comportement thermique de la plaquette, est conforme à ce qui est attendu par simulation : un temps de montée ou de descente en température identique (24 ms). Ce comportement correspond à un premier ordre. La constante de temps est une caractéristique du matériau.

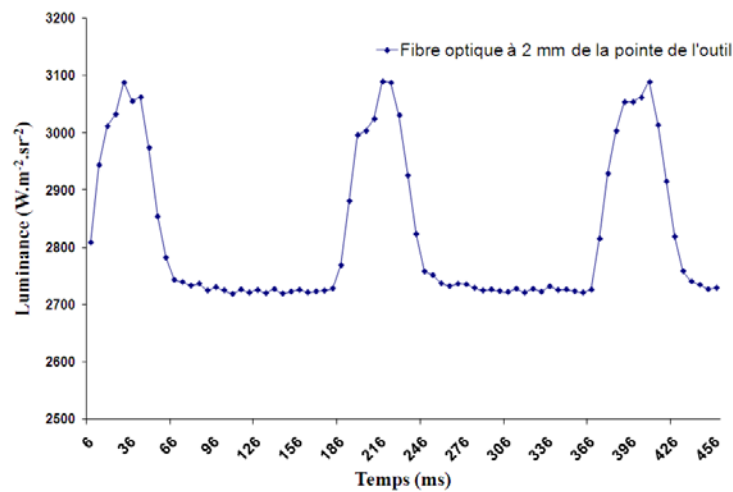


Figure 4 . Détail de la mesure de luminance sur trois périodes de coupe

4.3. Réflexions sur les développements d'une telle instrumentation

Nous validons avec cette instrumentation, qu'une mesure en un seul point du comportement thermique d'une arête de coupe est relativement aisée avec une fibre optique. Nous pouvons suivant le traitement derrière la fibre optique obtenir des informations plus ou moins intéressantes et d'un coût plus ou moins onéreux, car c'est ce traitement qui détermine la plus grande partie du coût de l'instrumentation. Parmi les informations accessibles, nous pouvons avoir accès à un passage de seuil d'une moyenne avec un traitement très primaire, ou à la mesure de la moyenne avec un traitement un peu plus sophistiqué. Afin, sur la base de notre instrumentation, nous pouvons déterminer la bande passante des longueurs d'ondes de la luminance pour une matière usinée et un outil de coupe, pour proposer ensuite une instrumentation avec le traitement derrière la fibre juste nécessaire. Dans le cadre de la surveillance et de l'observation des variations de luminance, la corrélation entre les intensité et la température n'est pas nécessaire. Par contre, si la température est une information souhaitée, une calibrage de l'instrumentation devra être effectué.

5. Conclusion

Nous avons montré dans cette étude la faisabilité et l'intérêt d'une mesure ponctuelle sans contact de la luminance d'une arête de coupe durant l'usinage. La prolongation naturelle de cette faisabilité est bien sûr d'une part, l'étude systématique et métrologique du placement de la fibre par rapport à l'arête, et d'autre part, la mise au point d'une récupération sans contact du signal tournant issu de la fibre implanté dans le porte outil de fraisage.

Bibliographie

Battaglia J.L., Batsale J.C., Estimation of heat flux and temperature in a tool during turning. *Inverse Problems in Engineering*, **8**, 2000, p. 435-456.

J. Denape, N. Laraqi. Aspect thermique du frottement : mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation. *Mécanique et Industrie* 6, Elsevier, 2000, p. 563-579.

Le Calvez C. – Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone – Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris (1995).

Mecanic Vallée 2009, <http://www.mecanicvallee.com/accueil.php>

Puigsegur L., Cois O., Battaglia J.L. , Oustaloup A. , Conditions thermiques de coupe en tournage: métrologie, identification et estimation. Congrès C2I. Editions Hermès. 2001 Vol. 1.

Rech J., Battaglia J.L. , Moisan, A., 16 ème Congrès Français de Mécanique, Nice 2003.

Saoubi R.M^o, Lebrun J.L., Changeux B., A new method for cutting tool temperature measurement using CCD infrared technique : influence of tool and coating, *Machining Science and Technology*, n°2, 1998, p. 369-382.