



**HAL**  
open science

## Approche expérimentale et numérique de l'usinage assisté haute-pression

Cédric Courbon, Davor Kramar, Joël Rech, Janez Kopac

► **To cite this version:**

Cédric Courbon, Davor Kramar, Joël Rech, Janez Kopac. Approche expérimentale et numérique de l'usinage assisté haute-pression. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391197

**HAL Id: hal-03391197**

**<https://hal.science/hal-03391197>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Approche expérimentale et numérique de l'usinage assisté haute-pression

C. COURBON<sup>a,b</sup>, D. KRAMAR<sup>b</sup>, J. RECH<sup>a</sup> and J. KOPAC<sup>b</sup>

a. Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne, France

b. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Askerceva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

## Résumé :

*Cette étude vise à approfondir les effets de l'usinage assisté haute pression (UAHP) en tournage ébauche de l'Inconel 718. L'évaluation expérimentale a été conduite grâce à trois outils : le couple outil-matière, un plan d'expériences et les surfaces de réponse. Les résultats montrent l'influence du procédé en termes de fragmentation du copeau, efforts de coupe, longueur de contact outil-copeau, état de surface et température outil. Un modèle numérique de coupe orthogonale a été développé afin d'obtenir des informations complémentaires et confronter les tendances numériques et expérimentales*

## Abstract :

*This study aims at investigating the effects of high-pressure assisted machining (HPAM) in rough turning of Inconel 718. The experimental study has been conducted through the Tool-Material pair methodology, design of experiments and response surface methodology. Results demonstrate the influence of this process regarding chip fragmentation, cutting forces, tool-chip contact length, surface finish and cutting temperature. A numerical model of orthogonal cutting has been developed in order to reach additional data and combine experimental and numerical trends.*

**Mots clefs :** Usinage assisté, Inconel 718, haute pression, simulation numérique

## 1 Introduction

L'aéronautique et la production d'énergie sont deux des industries exprimant de manière récurrente leurs besoins en nouveaux alliages. Devant présenter le meilleur rapport poids/performance et ce dans les conditions les plus extrêmes, ils peuvent perturber de manière considérable la chaîne de fabrication.

Même si de nouveaux alliages de titane s'avèrent prometteurs, les alliages à base nickel sont encore les matériaux les plus utilisés dans la fabrication de composants de turboréacteurs (~45-50%) selon Ezugwu et al. [1]. Ils demeurent néanmoins connus pour leurs difficultés de mise en forme. Dudzinski et al. [2] expliquent ce fait par leur tendance à s'écrouir, à adhérer à la face de coupe et par leur faible conductivité thermique.

Bien que l'objectif à long terme soit de migrer vers l'usinage à sec, l'utilisation de l'assistance haute pression est une approche intéressante permettant de tirer partie des propriétés mécaniques et thermiques du fluide.

## 2 Contexte de l'étude

### 2.1 Etat de l'art

A travers la littérature, il est possible de constater deux formes d'application de l'UAHP : (i) l'emploi de pressions supérieures à 150 MPa et des débits inférieurs à 6 l/min en utilisant de petites buses d'injection [3] ou (ii) des pressions inférieures à 30 MPa et des débits pouvant atteindre les 50 l/min à l'aide de buses plus larges [4]. Du fait de leur meilleure flexibilité, les buses externes sont largement préférées aux canaux internes à l'outil. Le jet est de ce fait généralement dirigé à l'interface outil-copeau.

Ojmertz et Oskarson [3] ont été les premiers à étudier son application en usinage de l'Inconel 718. Avec des outils en céramique renforcée, ils ont constaté une réduction des bavures, une meilleure fragmentation du

copeau et une pénétration plus profonde du fluide à l'interface outil-copeau sur une plage de pression de 80 à 360 MPa et deux diamètres de buse (0,15 et 0,25 mm).

Ezugwu et al. [4] ont quant à eux choisi la seconde approche en optant pour des pressions limitées à 20MPa mais des débits très élevés (20-50 l/min). Une augmentation de la durée de vie de 740% fut observée pour les vitesses de coupe les plus agressives avec des outils en carbure revêtus, de même qu'une réduction des efforts de coupe et une meilleure fragmentation.

## 2.2 Objectif de l'étude

Même si l'influence des paramètres du jet a déjà été examinée, aucune étude n'a jusqu'ici présenté de modèles descriptifs des effets des paramètres de l'UAHP et de leurs interactions sur les performances du procédé. L'usinage de l'Inconel 718 avec des outils carbure revêtus sur la plage de pression 50-130 MPa et des débits inférieurs à 3 l/min n'a d'ailleurs pas été investigué. A ce jour, une seule étude a été recensée comme traitant d'une modélisation numérique de cette méthode d'assistance [5].

Cet article vise donc à fournir une description plus complète de l'UAHP appliqué aux superalliages et permettre ainsi une meilleure compréhension et utilisation du procédé.

## 3 Etude expérimentale

Tous les essais ont été réalisés en tournage longitudinal avec une profondeur de passe fixée à 2 mm. Une pompe utilisée pour la découpe au jet d'eau couplée à un porte-buse a permis l'injection d'une émulsion grâce à trois buses de diamètres 0,25 0,3 et 0,4 mm. Le jet fut dirigé à l'interface outil-copeau avec un angle d'environ  $6^\circ$  par rapport à la face de coupe et normal à l'arête de coupe (Figure 1).

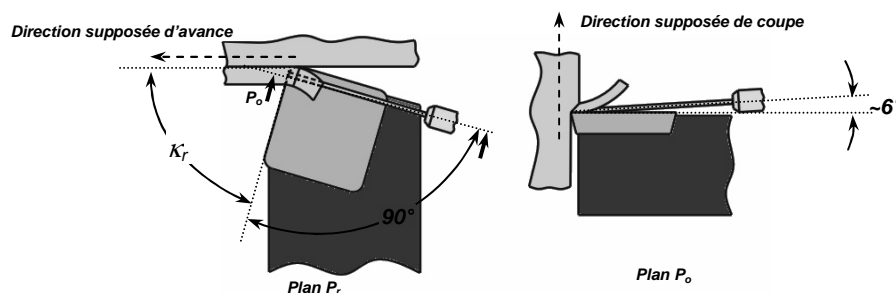


FIG. 1 – Illustration du système d'injection utilisé lors des essais.

La dureté de l'Inconel 718 utilisé a été estimée à 36-38HRc. Chaque barre ( $\phi 145 \times 300$  mm) a été préalablement usinée afin de s'affranchir des défauts de surface de production.

Un outil carbure SNMG 12 04 08-23 revêtu TiAlN, monté sur un porte outil PSBNR 2020K 12, a été choisi pour cette étude ( $\kappa_r = 75^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$  et  $\gamma = +7^\circ$ ). Afin d'évaluer la quantité de chaleur transmise à l'outil, deux plaquettes ont été instrumentées par un thermocouple type K de diamètre 0,5 mm disposé à 0,4 mm de la face de coupe. Le plan d'essais a été entièrement répété avec ces deux inserts pour les mesures de températures.

### 3.1 Couple Outil-Matière (COM)

La première étape consistait à définir les conditions limites du plan d'expériences en vitesse de coupe/avance par tour par la méthode COM. Cette dernière a été appliquée pour les quatre cas extrêmes (pression de 50 MPa et 130 MPa et deux diamètres de buses 0,25 mm et 0,4 mm) ainsi qu'en lubrification conventionnelle. Les domaines de fonctionnement sont présentés en Figure 2 avec pour chaque cas l'effort de poussée du jet et le débit correspondant.

Il apparaît clairement que l'UAHP permet d'étendre la zone de fonctionnement suivant la combinaison pression/buse choisie. Pour une pression fixée, l'augmentation du diamètre de buse permet d'atteindre des avances et vitesses de coupe plus élevées. Si le diamètre de buse est en revanche figé, l'augmentation de la pression étend le domaine vers les basses avances et vitesses de coupe.

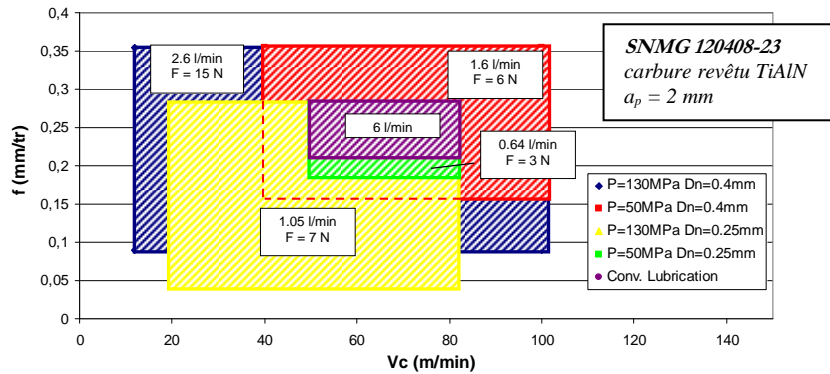


FIG.2 – Domaines de fonctionnement pour différents cas de lubrification

La vitesse de coupe minimum étant le paramètre révélateur de l'apparition d'une arête rapportée (forte adhésion), ces observations montrent que le jet peut avoir une interaction tribologique à l'interface outil-copeau. Une meilleure pénétration du jet à haute pression peut être envisagée induisant ainsi une meilleure lubrification et une limitation des phénomènes d'adhésion à basse vitesse de coupe.

### 3.2 Plan d'expériences

Le plan d'expériences a été appliqué sur la zone commune des domaines de fonctionnement et les résultats analysés par surface de réponse. 27 expériences basées sur une table  $L_{27}$  de Taguchi ont été conduites sur 3 paramètres relatifs au jet (pression  $P$ , diamètre de buse  $D_n$ , éloignement du point d'impact du jet de l'arête de coupe  $d$ ) ainsi que 2 paramètres de coupe (vitesse de coupe  $V_c$  et l'avance par tour  $f$ ). Chaque paramètre a été modulé sur trois niveaux.

L'étude s'est portée sur les sorties suivantes : les efforts de coupe  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$ , la rugosité arithmétique  $R_a$ , la longueur de contact outil-copeau  $LC$ , la taille des copeaux  $C_L$  et la température mesurée par le thermocouple  $T$ . Une arête de coupe neuve a été utilisée pour chaque essai et la longueur usinée limitée à 20 mm.

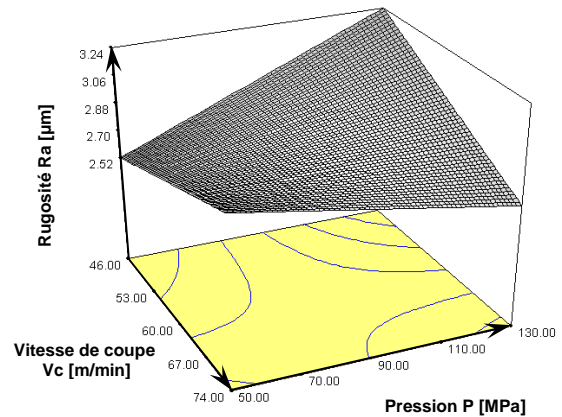


FIG. 3 – Influence de la pression du jet sur l'état de surface

Après analyse, il est apparu qu'une augmentation de la pression permet une réduction de l'effort de coupe  $F_c$ , et à moindre échelle, de l'effort d'avance  $F_f$ . Ce dernier ainsi que l'effort de pénétration  $F_p$ , se trouvent également influencés par le diamètre de buse.

La longueur de contact outil-copeau décroît jusqu'à 25% avec une augmentation de la pression du jet  $P$  et du diamètre de buse  $D_n$ . Cet effet s'atténue lorsque l'on approche le point d'impact du jet de l'arête.

L'état de surface a été évalué par la rugosité arithmétique  $R_a$ . La surface de réponse exposée en Figure 3 démontre que l'état de surface peut être amélioré à haute vitesse de coupe en augmentant la pression du jet. De manière générale, l'utilisation d'une buse plus large permet d'améliorer l'état de surface d'environ 15%.

La quantité de chaleur transmise à l'outil était un paramètre important de l'étude. La pression du jet  $P$  n'a pas été répertoriée comme influente. En revanche, l'effet du diamètre de buse  $D_n$  s'est révélé lié à la distance d'impact du jet  $d$ . Lorsque le jet est dirigé sur l'arête de coupe, l'emploi d'une buse plus large permet un gain thermique supplémentaire en limitant la quantité de chaleur d'environ 15%.

Même si les copeaux étaient parfaitement fragmentés pour chaque essai, leur taille s'est avérée décroître avec l'élévation de la pression. Cette dernière permet de réduire leur rayon de courbure et d'initier de ce fait leur rupture plus rapidement (Figure 4).

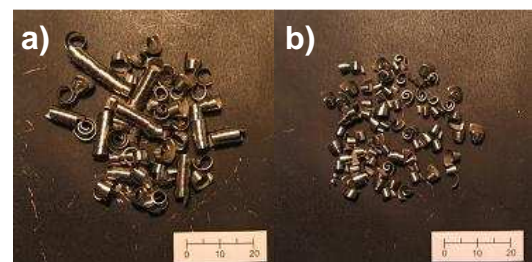


FIG. 4 – Copeaux obtenus en UAHP à 50 MPa a) et 130 MPa b)

$V_c = 81 \text{ m/min}$  -  $f = 0,2 \text{ mm/rev}$  -  $a_p = 2 \text{ mm}$  -  $D_n = 0,25 \text{ mm}$

## 4 Etude numérique

### 4.1 Description du modèle

Le modèle 2D développé sous ABAQUS/Explicit® a eu pour but de comprendre le procédé en se reportant à l'étude d'un cas simple de coupe orthogonale (hypothèse de déformation plane).

Les conditions de coupe ont donc été figées pour toutes les simulations :  $V_c = 50$  m/min,  $f = 0,2$  mm/tr,  $a_p = 2$  mm,  $\gamma = +7^\circ$  et rayon d'arête  $50 \mu\text{m}$ .

Le comportement du matériau a été retranscrit par une loi thermo-élasto-visco-plastique de type Johnson Cook. Les paramètres utilisés sont ceux issus des travaux d'Uhlmann [6] pour un Inconel 718 à l'état recuit. Les propriétés élastiques ont été renseignées thermodépendantes (module d'Young – 208GPa à 20°C, coefficient de poisson – 0,26). L'outil en carbure de tungstène a par ailleurs été considéré comme déformable (module d'Young – 630GPa à 20°C, coefficient de poisson – 0,3).

$$\sigma_{eq} = \left( A + B \varepsilon_p^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right) \quad (1)$$

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$\dot{\varepsilon}_{p0}$ (s <sup>-1</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>0</sub> (°C)
450	1700	0,017	0,65	1,3	0,001	1297	27

TABLEAU 1 – Paramètres de la loi de Johnson-Cook pour l'Inconel 718 [6]

Un objectif important du modèle a été de pouvoir obtenir une forme stable de copeau afin d'y appliquer une modélisation simplifiée du jet. Une approche ALE, de plus en plus prisée dans la littérature [7], a été choisie afin d'étudier le procédé dans sa phase stationnaire. Les géométries du modèle ainsi que les conditions limites sont décrites en Figure 5.

Les nœuds aux surfaces « Entrée Euler. » et « Sortie Euler. 3 » sont contraints suivant 1. Les sorties « Sortie Euler. 1 » et « Sortie Euler. 2 » sont alternativement contraintes suivant 2 pour permettre la formation du copeau et son verrouillage lorsqu'il atteint la dimension adéquate.

Contrairement aux travaux antérieurs [5], le coefficient de frottement n'a pas été considéré constant mais dépendant de la vitesse de glissement relative entre l'outil et la pièce. La loi de frottement est extraite des travaux de Zemzemi [8] pour un revêtement TiAlN.

$$\mu = -0,0046.V_g + 0,4313 \quad (2)$$

Cette loi a en revanche été validée en usinage à sec uniquement. Compte tenu du manque de données, la conductance de l'interface a été assimilée à la conductivité du revêtement à l'ambiante soit  $50 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Le flux de chaleur généré à l'interface a été réparti à hauteur de 85% vers la pièce et 15% vers l'outil suite aux constatations du même auteur [8].

### 4.2 Modélisation du jet

Seul l'effet mécanique du jet a été dans un premier temps modélisé par une distribution de pression uniforme et normale à la surface du copeau (Figures 6 b-c). Quatre niveaux de pression ont été étudiés : 30 – 50 – 70 – 100 MPa. Les figures 6 a) et 6 b) montrent deux états du modèle après formation du copeau à sec puis après application du jet à l'interface.

L'impact thermique du jet a été ensuite retranscrit par un coefficient de transfert thermique. Un coefficient de convection locale  $h$  a été calculé en fonction de nombre de Nusselt  $Nu$  pour un cas de convection forcée d'un fluide turbulent parallèle à une plaque plane. Il a été recalculé pour chaque niveau de pression en considérant un diamètre de buse fixe de 0,3 mm et a enfin été appliqué sur la surface du copeau et de l'outil concernée.

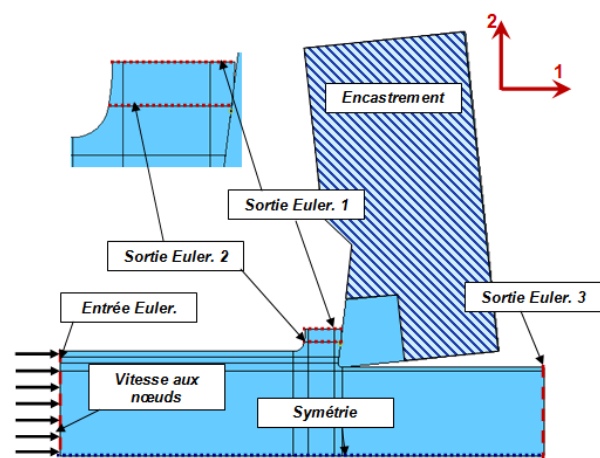


FIG. 5 – Conditions limites du modèle ALE

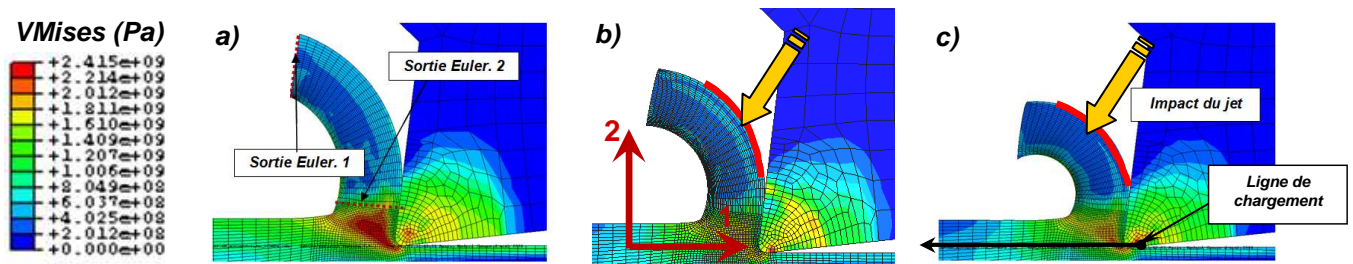


FIG. 6 – Phase de formation du copeau - a) à sec, - b) application du jet à 30 MPa, - c) application du jet à 100 MPa

## 4.3 Résultats et discussion

### 4.3.1 Effet mécanique

Il apparaît clairement (Figure 6) qu'une élévation de pression provoque une réduction du rayon de courbure. Celle-ci permet d'atteindre plus rapidement la limite à rupture du matériau, favorisant dès lors la fragmentation du copeau.

La longueur de contact et l'épaisseur du copeau décroissent dès l'application du jet mais restent insensibles à la pression (Figure 7). Ces résultats semblent cohérents avec les observations expérimentales précédentes pour un point d'impact du jet fixé sur l'arête ( $d = 0$  mm).

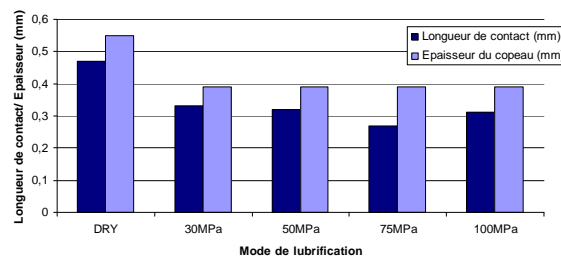


FIG. 7 – Influence de la pression du jet sur la longueur contact outil-copeau et son épaisseur

Le point intéressant est l'influence de l'UAHP sur le chargement en zone de cisaillement primaire. La Figure 8 montre l'évolution de la contrainte normale suivant la direction 2. La ligne de chargement considérée est représentée en Figure 6 c).

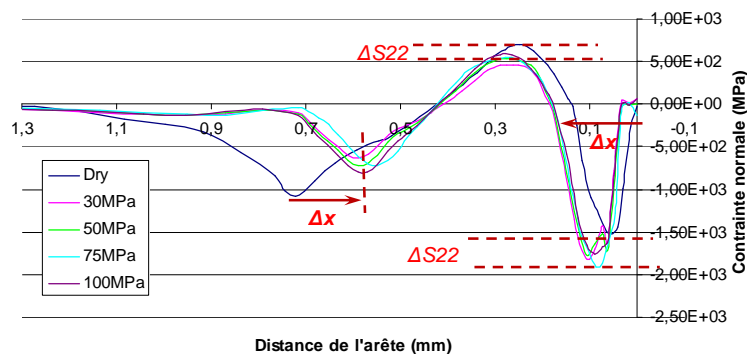


FIG. 8 – Influence de la pression du jet sur la contrainte normale suivant 2 en zone de cisaillement primaire

L'application du jet provoque une augmentation de la contrainte de compression, une réduction de la contrainte de traction ainsi qu'un décalage du chargement en  $x$ . Le niveau de pression n'est de nouveau pas un facteur influent.

L'étude du chargement mécanique côté outil révèle quant à lui que la pression de contact est réellement affectée par le jet (Figure 9). Celui-ci favorise le décollement du copeau de la face de coupe et réduit progressivement la pression s'y exerçant. Par extrapolation, il semblerait que le moment induit par le chargement sur le copeau ait tendance à comprimer d'avantage la pointe de l'outil et d'élever de ce fait la pression de contact (comparaison à l'usinage à sec).

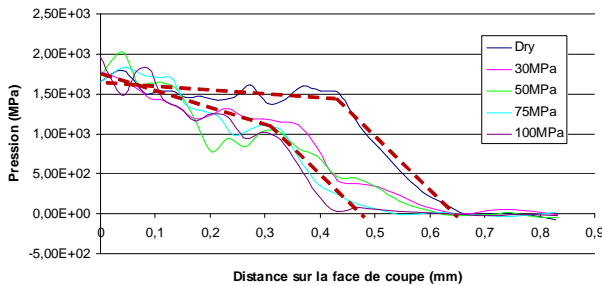


FIG. 9 – Influence de la pression du jet sur la pression de contact le long de la face de coupe

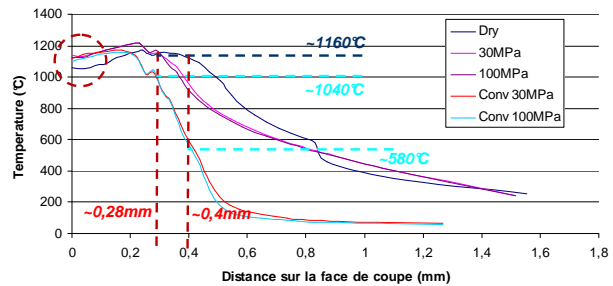


FIG. 10 – Influence de la pression du jet sur la température le long de la face de coupe

### 4.3.2 Effet thermique

La modélisation de la convection thermique s'est montrée très peu influente sur les constats émis précédemment. En revanche, l'impact est réellement visible sur la température relevée le long de la face de coupe (Figure 10). A 0,28 mm de la pointe de l'outil (fin de la zone de contact outil-copeau avec assistance de la haute pression), la température est réduite d'environ 10% comparé à l'usinage à sec et à l'assistance sans convection. L'effet s'amplifie alors que l'on s'éloigne de la zone de contact pour atteindre quasiment 50% à 0,4 mm.

Une légère réduction thermique est envisageable dès l'application du jet sans convection. Ceci peut être expliqué par une pression de contact globalement plus faible ainsi qu'une vitesse de défilement du copeau plus élevée (épaisseur du copeau plus faible). Cette dernière permettrait de limiter « artificiellement » les phénomènes de frottement (voir Equation 2) et de ce fait la génération de chaleur à l'interface.

## 5 Conclusion

L'étude a montré que l'UAHP est une technologie alternative permettant une meilleure fragmentation, une réduction des efforts de coupe, de l'arête rapportée et une influence bénéfique sur les phénomènes tribologiques et thermiques à l'interface outil-copeau. Les modèles obtenus permettent d'évaluer le triplet « buse-pression-distance d'impact » en fonction de l'objectif à atteindre et des conditions de coupe.

Le modèle de coupe numérique développé a abouti à des conclusions intéressantes dans les zones influentes du procédé d'usinage. L'impact mécanique de l'UAHP d'une part puis thermomécanique d'autre part a mis en évidence des tendances venant compléter les faits observés expérimentalement. Ceux-ci ont encore permis de vérifier la cohérence du modèle numérique bien que développé dans un cas de coupe orthogonale.

## Références

- [1] Ezugwu E. , Wang Z. M. , Machado A. R. , The machinability of nickel-based alloys: a review, *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1-3), 1-16, 1998.
- [2] Dudzinski D. , Devillez A. , Moufki A. , Larrouquère D. , Zerrouki V. , Vigneau J. , A review of developments towards dry and high speed machining of inconel 718 alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(4), 439-456, 2004.
- [3] Ojmertz K. M. C. , Oskarson H. B. , Wear on sic-whiskers reinforced ceramic inserts when cutting inconel with waterjet assistance, *Tribology Transactions*, 43, 471-478, 1999.
- [4] Ezugwu E. , Bonney J. , Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, inconel 718, alloy with coated carbide tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 1045-1050, 2004.
- [5] Shet C. , Deng X. , Bayoumi A. E. , Finite element simulation of high-pressure water-jet assisted metal cutting, *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(6-7), 1201-1228, 2003.
- [6] Uhlmann E. , von der Schulenburg M. G. , Zettier R. , Finite element modeling and cutting simulation of inconel 718, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 61-64, 2007.
- [7] Arrazola P. , Özel T. , Numerical modelling of 3D hard turning using Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element method, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 3, 238-249, 2008.
- [8] Zemzemi F. , Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718, Thèse de doctorat, EC de Lyon, 2007.