



**HAL**  
open science

# Nouvelle méthode d'analyse de l'écoulement du copeau en tournage s'appuyant sur une technique de numérisation 3D

Dimitri Jacquin, Christophe Czarnota, Badis Haddag, Mohammed Nouari,  
Eric Steib

## ► To cite this version:

Dimitri Jacquin, Christophe Czarnota, Badis Haddag, Mohammed Nouari, Eric Steib. Nouvelle méthode d'analyse de l'écoulement du copeau en tournage s'appuyant sur une technique de numérisation 3D. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421167

**HAL Id: hal-03421167**

**<https://hal.science/hal-03421167>**

Submitted on 9 Nov 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.

# Nouvelle méthode d'analyse de l'écoulement du copeau en tournage s'appuyant sur une technique de numérisation 3D

Dimitri JACQUIN, Christophe CZARNOTA, Badis HADDAG, Mohammed NOUARI, Eric STEIB

Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, CNRS UMR 7563, Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception (GIP-InSIC), 27 rue d'Hellieule, 88100 Saint-Dié-des-Vosges.

## Résumé :

*Le tournage, procédé d'usinage courant, est habituellement analysé par une approche simplifiée de coupe orthogonale 2D. L'appréhension de ce procédé passe entre autres par l'expertise de la morphologie des copeaux, indicateur des conditions de chargement que subit la pièce usinée. Dans cette étude, nous proposons une analyse fine 3D des copeaux obtenus par tournage à l'aide d'un système de numérisation Breuckmann basée sur la technique de projection de franges structurées. La numérisation des copeaux couplée à une approche analytique permet d'identifier les paramètres influents de la coupe oblique.*

## Abstract :

*The common turning process is usually analyzed by a simplified 2D orthogonal cutting approach. The chips morphology can provide essential information about the understanding of this process, as loading conditions undergone by the machined part. In this study, we propose a 3D fine analysis of chips obtained by turning, by means of a Breuckmann digitalization system based on the structured fringes projection technique. The present work is based on the digitalization of chips coupled with an analytical approach allows identifying the influential parameters of the oblique cutting.*

**Mots clés :** numérisation, copeau, modèle géométrique, tournage, coupe oblique, angle de cisaillement, fréquence de segmentation, vitesse d'écoulement, angle d'écoulement.

## 1 Introduction

Dans le cadre d'une modélisation de la mise en forme des matériaux métalliques par enlèvement de matière, l'analyse du copeau (résiduel) fournit des informations essentielles à la compréhension du procédé. L'étude du copeau plutôt que de la pièce usinée, permet de s'affranchir des contraintes liées à des contrôles directs coûteux et parfois néfastes. Etant donné la grande complexité des phénomènes mis en jeu, les processus de coupe et de formation du copeau sont généralement modélisés en supposant que la coupe se déroule le long de l'arête droite de l'outil. La coupe est dite « orthogonale » si l'arête est perpendiculaire à la direction de coupe, et « oblique » dans les autres cas. Le modèle de Merchant [1] est habituellement utilisé pour décrire la coupe orthogonale voir Fig.1. Dans cette configuration la vitesse d'écoulement dans une section de copeau est constante (indépendante de la position dans le copeau). Ainsi, la conservation du volume de matière avant et après la phase du coupe entraîne la formation d'une bande de matière d'épaisseur constante sur toute la longueur de l'arête de coupe, le rayon de bec supposé dans le modèle de Merchant étant nul. L'angle de transition de la bande de matière avant/après la coupe est appelé : angle de cisaillement ( $\Phi$ ). En usinage l'angle de cisaillement est considéré comme un paramètre fondamental pour définir la déformation plastique, le contact entre l'outil et la matière, l'efficacité de l'enlèvement de matière, les efforts de coupe, ou l'écoulement du copeau. La valeur de l'angle de cisaillement est estimée soit à partir de la mesure de l'épaisseur du copeau et en comparant cette valeur à celle de la profondeur de passe, soit à l'aide de la méthode du quick stop (Chern [2]) qui consiste à arrêter brutalement l'outil afin d'observer le copeau en formation sur l'outil.

La plupart des processus de coupe ne remplissent pas les hypothèses nécessaires au formalisme de Merchant. C'est le cas pour l'opération de chariotage, au cours de laquelle l'écoulement du copeau ne s'opère pas exclusivement dans le plan de la coupe orthogonale. En effet les copeaux ne se présentent pas sous la forme

d'une bande d'épaisseur constante. La variation de la vitesse d'écoulement d'un bord à l'autre de la section du copeau entraîne une variation de l'épaisseur du copeau, ce dernier présente alors un enroulement conique (voir figure 1).

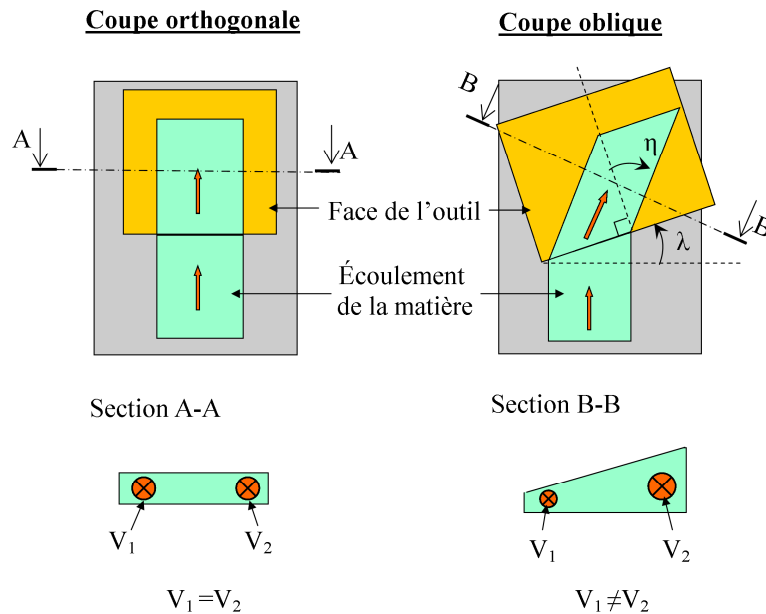


Fig.1-Schématisation de la coupe orthogonale et de la coupe oblique.

Dans ce travail, les auteurs se sont attachés à décrire les phénomènes mis en jeu pendant l'opération de chariotage. Dans ce sens, une nouvelle méthode expérimentale d'expertise de la morphologie des copeaux est proposée. Pour exploiter plus précisément cette nouvelle méthodologie, un modèle analytique est présenté. Ce modèle permet d'estimer l'orientation que prendra le copeau en fonction des conditions de coupe. Le travail aboutit sur une identification et une analyse des paramètres influents de la coupe oblique, en fonction des conditions de coupe d'une part, et de la position dans le copeau d'autre part.

## 2 Technique de numérisation 3D

### 2.1 Protocole expérimental

L'acquisition 3D de la morphologie du copeau s'effectue à l'aide d'un système de numérisation Breuckmann. Le principe de fonctionnement repose sur la projection de franges de lumières, c'est à dire des raies claires et sombres alternées (voir Fig. 2). Grâce à une caméra dont la direction d'observation fait un angle non nul avec la direction de projection, l'image du réseau déformé par le relief de l'objet est enregistrée. La distance séparant les points mesurés des caméras CCD est mathématiquement estimée en analysant l'intensité et le contraste des franges projetées. Ce système de mesure sans contact permet d'atteindre une résolution de 2  $\mu\text{m}$ .

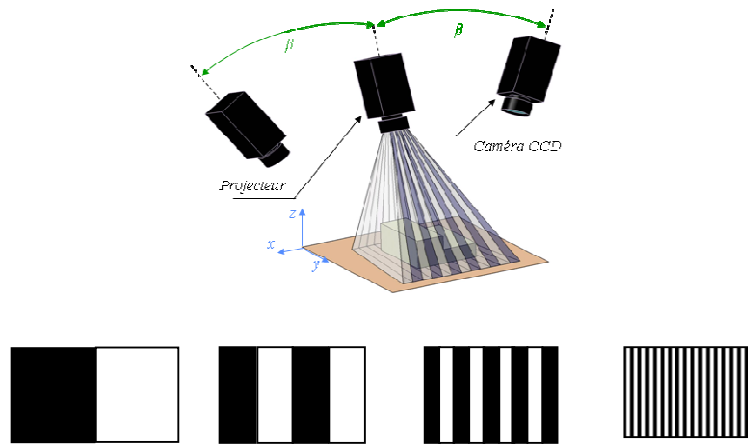


Fig.2-Schéma du principe d'acquisition 3D, et exemple de séquence de motifs projetés successivement.

## 2.2 Exploitation de la mesure

La numérisation fine des copeaux permet par exemple d'observer les traces laissées par le brise copeau, les évolutions et la profondeur des ondulations dans le copeau, l'épaisseur finale du copeau. Dans le cadre de ce travail, plusieurs sections de copeau sont extraites de l'objet numérisé et la trace du copeau dans chaque section est alors analysée (Fig 3 (d)).

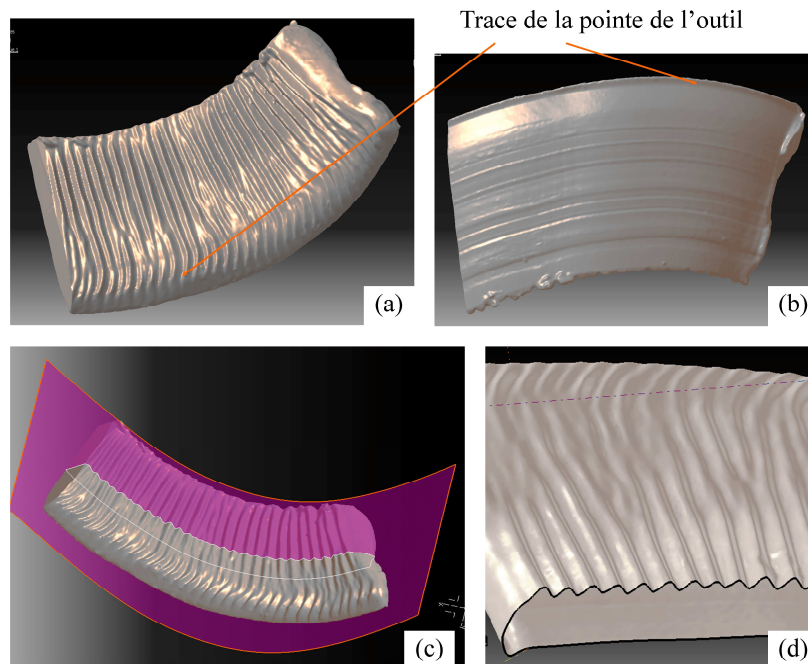


Fig.3-Numérisation d'un copeau : (a) vue d'ensemble, (b) détail des empreintes laissées par le brise-copeau, (c) Représentation d'une surface de coupe, (d) profil issu de la projection sur la surface de coupe

Cette technique permet une analyse fine et plus précise que celle se basant sur l'utilisation de modes de préparation (découpage, polissage) et d'observation traditionnels (microscopie optique). En effet, les mesures obtenues par des techniques plus « traditionnelles » sont fortement dépendantes de la qualité de la préparation. De plus si le copeau se présente sous la forme d'un cône, c'est-à-dire si le rayon de courbure

évolue d'un bord à l'autre du copeau, la technique du polissage ne permet plus d'obtenir des mesures fiables étant donné que les plans mesurés n'épousent pas la forme du copeau.

### 3 Modélisation géométrique

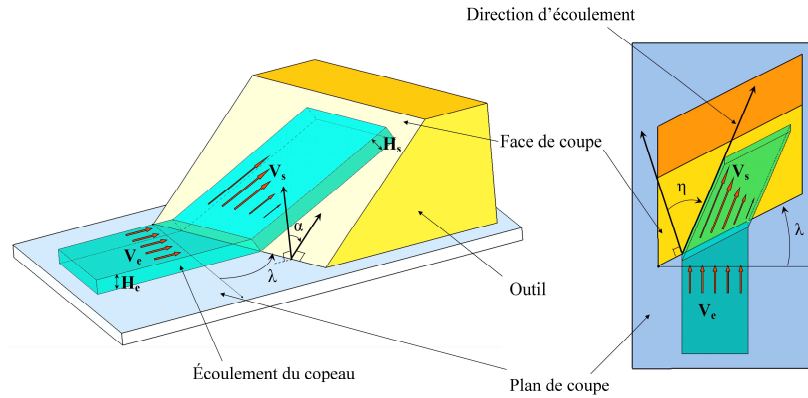


Fig.4-Configuration de coupe.

Afin d'exploiter au mieux les résultats de mesures fournis par la numérisation, le développement d'un modèle est nécessaire. Pour appréhender les phénomènes mis en jeu pendant la phase de coupe, une décomposition simple sous forme de lignes d'écoulement issues de la compréhension du procédé est alors proposée selon une méthode similaire développée par Jacquin et al. [3]. La configuration de coupe est décrite en Fig. 4. Les angles  $\alpha$  et  $\lambda$ , désignant l'angle d'inclinaison de la plaquette et l'angle d'obliquité sont des paramètres de coupe. L'angle  $\eta$  représente l'angle d'écoulement du copeau ( $\eta=0^\circ$  en coupe orthogonale, voir Fig. 1 et 4), et est dépendant des conditions d'usinage. Cet angle, très important dans le contrôle de la formation du copeau n'est pas clairement décrit par l'observation directe du copeau. Brown et Russel. [4] ont démontré que l'angle  $\alpha$  avait une influence significative sur l'angle  $\eta$ . Stabler [5] suppose que  $\lambda$  et  $\eta$  sont égaux. Luk[6] et Shaw[7] relient l'angle de l'écoulement du copeau aux conditions de déformation du métal et au coefficient de frottement à l'interface outil - matière. Moufki [8] montre que l'angle  $\eta$  devient indépendant de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe si les conditions de frottement sont constantes. Dans l'approche proposée, l'angle  $\eta$  est supposé décrit par la relation :

$$\tan(\eta) = \frac{\tan(\lambda)}{\sin(\alpha)} \quad (1)$$

La condition  $\alpha = \pi/2$  permet de retrouver la relation de Stabler ( $\lambda = \eta$ ). En se plaçant dans le plan contenant une ligne d'écoulement, la vitesse locale d'écoulement  $V_s$  du copeau et l'angle de cisaillement  $\phi$  peuvent être déduits d'une approche basée sur le modèle de Merchant [1] :

$$V_s = \frac{V_c f \cos(\lambda)}{H_s \cos(\eta)} \quad (2); \quad \tan(\phi) = \frac{V_s \cos(\alpha_2)}{V_c \left(1 - \frac{V_s}{V_c} \sin(\alpha_2)\right)} \quad (3)$$

où  $V_c$  représente la vitesse de coupe et  $H_s$  désigne l'épaisseur locale du copeau en sortie,  $f$  l'avance par tour,  $\alpha_2$  est l'angle d'inclinaison de la plaquette dans le plan de la ligne d'écoulement donné par :

$$\tan(\alpha_2) = \frac{\cos(\alpha) \sin(\alpha)}{\cos(\lambda) (\tan(\lambda)^2 + \sin(\alpha)^2)} \quad (4)$$

#### 4 Résultats et discussions

A partir de la technique de numérisation décrite en (1), l'influence de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe sur la vitesse d'écoulement du copeau a été étudiée. 5 sections situées à 2, 4, 6, 8 et 10 mm de la pointe de l'outil ont été extraites des copeaux numérisés. Il est observé sur la Fig. 5-a que la vitesse d'écoulement dans les sections augmente lorsque la vitesse de coupe augmente. De plus, la vitesse d'écoulement du copeau est plus importante au voisinage de la pointe de l'outil. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'épaisseur du copeau est plus importante près de la pointe de l'outil (voir Eq.(2)). La figure 5 (b) présente l'évolution de l'angle de cisaillement  $\Phi$  en fonction de la vitesse de coupe  $V_c$  (voir Eq. 3). Il y est mis en évidence une grande variation de l'angle de cisaillement dans l'épaisseur du copeau en passant d'une section à une autre. Par exemple, pour une vitesse de coupe de 80 m/min,  $\Phi \approx 45^\circ$  à 2 mm de la pointe de l'outil et  $\Phi \approx 37^\circ$  à 10 mm de la pointe de l'outil. Ce constat souligne l'importance de prendre en compte le caractère tridimensionnel du procédé de tournage pour définir un angle de cisaillement primaire significatif. L'approche habituelle de coupe orthogonale 2D n'étant que peu représentative. Il apparaît, à partir de la figure 5 (b), que pour une section donnée, l'angle de cisaillement est peu influencé par la vitesse de coupe.

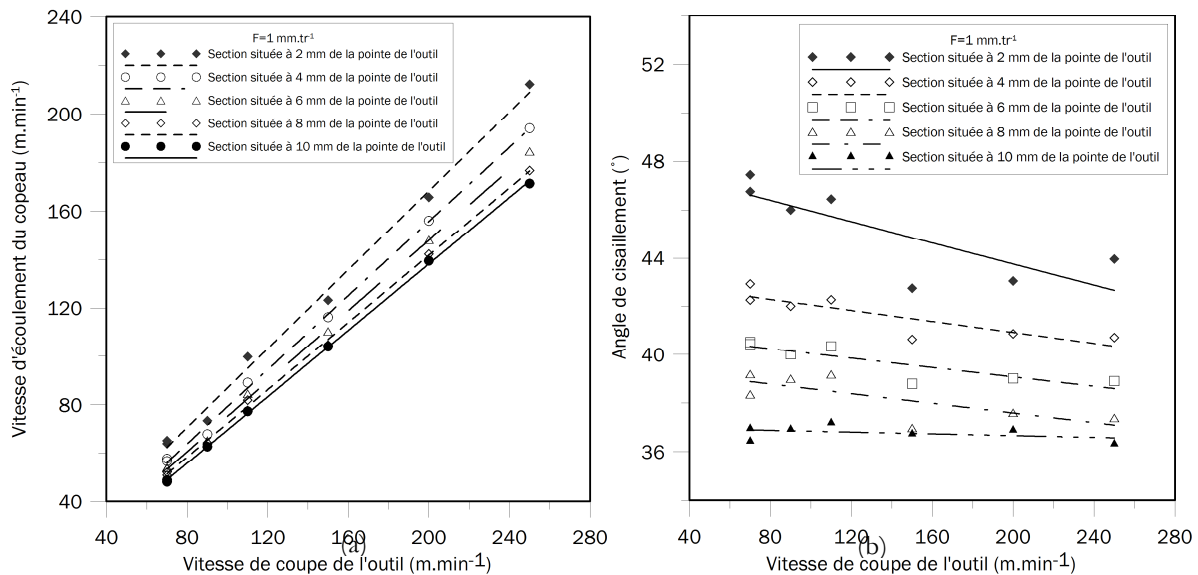


Fig.5-Estimation de l'angle d'écoulement du copeau  $\eta$  en fonction de (a) l'inclinaison de la face de coupe  $\alpha$ , (b) l'oblicité  $\lambda$ .

La figure 6 montre l'évolution de l'angle d'écoulement du copeau  $\eta$  en fonction de l'angle d'oblicité  $\lambda$  et de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  de la face de coupe (angle de coupe). Il apparaît que le modèle est borné, et lorsque  $\lambda=0$ , les conditions de coupe orthogonale sont retrouvées.

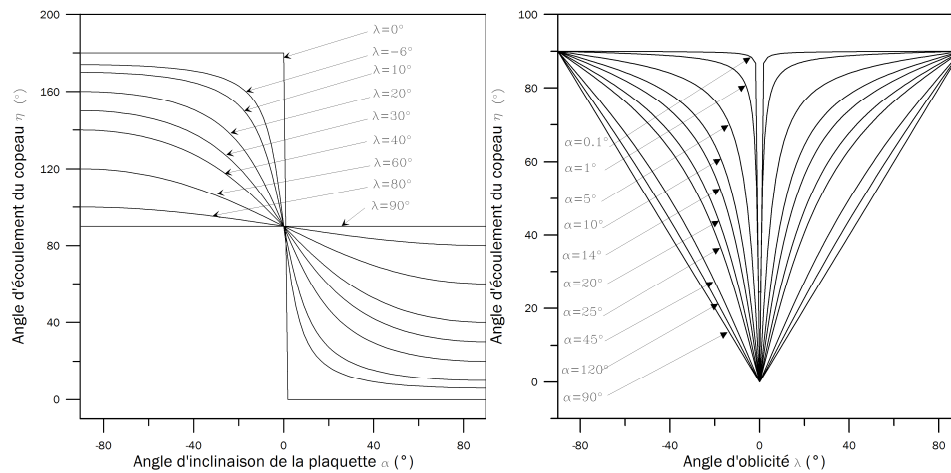


Fig.6-Estimation de l'angle d'écoulement  $\eta$  en fonction de l'inclinaison de la face de coupe  $\alpha$ , et de l'oblicité  $\lambda$ .

## 5 Conclusions

L'approche proposée permet à partir de la numérisation Breukmann 3D des copeaux, d'extraire les épaisseurs locales du copeau le long de sections parallèles à l'écoulement du copeau, puis de déterminer la valeur de l'angle d'écoulement à partir d'une approche analytique simplifiée. Le modèle permet également d'estimer la vitesse d'écoulement dans le copeau et d'en déduire l'angle de cisaillement local ainsi que la fréquence de segmentation du copeau. L'avantage de cette méthode repose sur sa précision et sa simplicité de mise en œuvre par rapport à une technique classique basée sur une analyse par microscopie optique ou MEB. À terme, cette méthode sera mise en œuvre afin d'identifier et de quantifier les déformations plastiques dans le copeau en comparant l'état initial (bande de matière plane) à l'état final (forme du copeau), complétée d'une analyse inverse.

## References

- [1] M.E. Merchant, Basic mechanics of the metal cutting process, ASME Journal of Applied Mechanics 11 (1944) 168-175.
- [2] Chern G. L., « development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation », International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, (2005), pp. 789-794.
- [3] D. Jacquin, B. de Meester, A. Simar, D. Deloison, F. Montheillet, C. Desrayaud. A simple Eulerian thermomechanical modeling of friction stir welding Journal of Materials Processing Technology, Volume 211, (2011). Pages 57-65.
- [4] Russell JK, Brown RH. The measurement of chip flow direction. International Journal of Machine Tool Design Research 1966;6:129-38.
- [5] Stabler GV. The fundamental geometry of cutting tools. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers 1951;165:14-21.
- [6] Luk WK. The direction of chip flow in oblique cutting. International Journal of Process Research 1972;10(1):67-76.
- [7] Shaw MC. Metal Cutting Principles. Oxford :Oxford Science Publications, 1984.
- [8] A. Moufki, D. Dudzinski, A. Molinari, M. Rausch. Thermoviscoplastic modelling of oblique cutting: forces and chip flow predictions. Int Journal of Mechanical Sciences 42 (2000) 1205-1232..