

## Etude du comportement dynamique des outils toriques en usinage 5 axes

Yann Landon, Michel Mousseigne, Johanna Senatore & Walter Rubio

Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse  
Université Paul Sabatier – Toulouse III  
118 route de Narbonne  
31062 TOULOUSE cedex 4  
email : [landon@cict.fr](mailto:landon@cict.fr)

### Résumé :

*L'utilisation d'outils toriques plutôt que hémisphériques pour l'usinage de surfaces gauches présente plusieurs avantages. Le principal réside dans une plus faible variation de la vitesse de coupe effective lors de l'évolution de l'inclinaison de l'outil par rapport à la surface. Le problème de vitesse de coupe très faible (voire nulle) sur la partie centrale de l'outil est éliminé. Cependant, des problèmes dynamiques subsistent pendant la coupe, notamment lors d'usinages avec des outils dont le rapport diamètre sur longueur sortie est faible. En effet, il s'avère que le choix de la stratégie d'usinage en terme de trajectoire a une influence importante sur le comportement outil et donc sur le résultat obtenu sur la pièce des points de vue dimensionnel et d'état de surface. Notre étude a pour but de mieux comprendre le comportement d'outils toriques de faibles diamètres lors de l'usinage de surfaces gauches. Des approches théorique et expérimentale ont été couplées. L'étude théorique s'attache à déterminer la relation entre la stratégie utilisée en terme de trajectoires outil (plans parallèles, Z constant, ...) et le comportement dynamique de l'outil en usinage. La partie expérimentale a permis d'analyser le comportement vibratoire de l'outil lors de la coupe pour différentes stratégies d'usinage. Pour cela, des analyses acoustiques, ainsi que des mesures dimensionnelles et d'états de surface ont été menées. Cela nous permet de définir des règles de construction de parcours d'usinage de surfaces complexes avec ce type d'outils. En effet, certaines stratégies s'avèrent préjudiciables à la qualité d'usinage et à la durée de vie d'outil alors que d'autres apportent une réelle amélioration sur la qualité de la pièce usinée.*

### Abstract :

*The use of toroidal tools rather than ball-end tools for the machining of complex surfaces has several advantages. The main lies in a smaller variation of the effective cutting speed during the evolution of the lead angle of the tool compared to surface. The problem of very low (even null) cutting speed on the central part of the tool is eliminated. However, dynamic problems remain during the cutting process, in particular during machinings with tools whose ratio diameter over length is small. Indeed, the choice of the milling strategy has an important influence on the behavior of the tool and thus on the result obtained on the part from the dimensional and surface quality points of view. The purpose of our study is to better understand the behavior of low diameters toroidal tools during the machining of complex surfaces. Theoretical and experimental approaches were coupled. The theoretical study attempts to determine the relation between the strategy used and the dynamic behavior of the tool during machining. The aim of the experimental part was to analyze the dynamic behavior of the tool during machining for various milling strategies. For that, acoustic analyses, as well as dimensional and surface qualities measurements were carried out. That enables us to define rules for the choice of machining trajectories on complex surfaces with this type of tools. Indeed, some strategies are prejudicial for the machining quality and for tool life, whereas others offer a real improvement on the machined part quality.*

**Mots-clefs : Choix de trajectoire ; Mesures acoustiques ; Vibrations**

### 1 Introduction

Le phénomène de broutement des outils de coupe en fraisage est, de nos jours, une problématique forte. Ce phénomène vient du couplage entre les efforts de coupe et les caractéristiques dynamiques du système machine/outil/pièce - Tobias *et al.* (1958), Tlustý *et al.* (1963). De nombreux travaux se sont attachés à comprendre et à modéliser le comportement dynamique des outils en fraisage - Altintas *et al.* (1995), Peigne *et al.* (2004), ...

Pour notre étude du comportement dynamique d'outils toriques lors d'usinages 5 axes, nous avons privilégié dans un premier temps les mesures acoustiques plutôt que l'utilisation de capteurs piézo-électrique/accéléromètres, afin de s'affranchir au maximum des vibrations de la machine. Nous recherchions en premier lieu les vibrations outils, la pièce étant très massive par rapport à l'outil. La mesure acoustique des phénomènes vibratoires est largement répandue - Gradisek *et al.* (2003) – notamment en surveillance d'usinage - Axinte *et al.* (2004), Guo *et al.* (2005), Lee *et al.* (2006).

Nous présentons ici quelques analyses théoriques couplées à des résultats expérimentaux qui permettent de mieux comprendre le comportement dynamique en usinage 5 axes des outils toriques. Différentes stratégies sont étudiées et comparées afin d'établir quelques règles de choix des trajectoires en usinage 5 axes avec des outils de faible rapport diamètre/longueur.

## 2 Analyse théorique du comportement outil

### 2.1 Analyse des profils de vitesse de coupe

Sur les outils toriques, la vitesse de coupe varie le long de l'arête. En fonction de l'inclinaison locale de l'outil par rapport à la normale à la surface, les profils de vitesse de coupe le long de l'arête diffèrent. Par exemple, si l'outil usine en tirant (inclinaison de l'outil vers l'avant), la portion d'arête de coupe en contact avec la matière se situe à proximité du diamètre nominal de l'outil. La vitesse de coupe est alors proche de la vitesse maximale. A l'inverse, si cet outil usine en poussant (inclinaison de l'outil vers l'arrière), c'est une portion plus éloignée du diamètre outil qui usine, donc avec une vitesse de coupe plus faible. Une étude de la variation de vitesse de coupe en fonction de la stratégie employée (FIG. 1) a donc été menée.

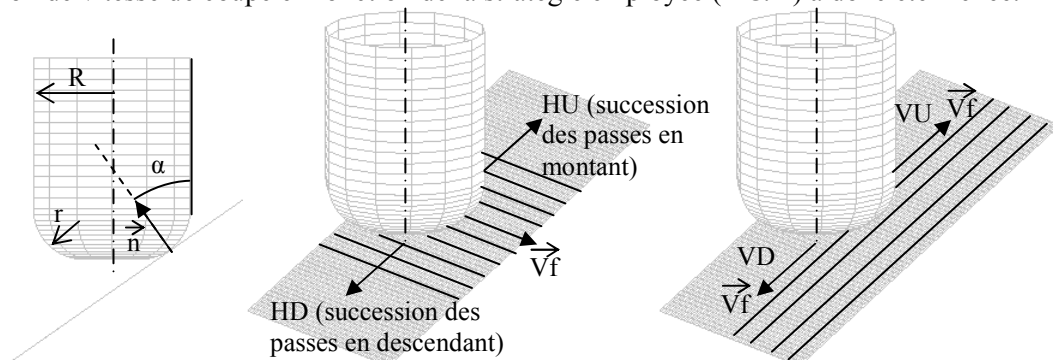


FIG. 1 – Définition des différentes stratégies.

Le point de contact outil-pièce a une vitesse de coupe indépendante de la stratégie. Elle dépend uniquement de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  et des dimensions de l'outil. Mais cette vitesse de coupe représente, soit la vitesse de coupe maximale le long de l'arête pour les stratégies en descente (HD et VD), soit la vitesse de coupe minimale le long de l'arête pour les stratégies en montée (HU et VU).

Dans le cas de l'outil étudié ici ( $\text{Ø}8\text{-}r2,5$ ) et pour une profondeur de passe  $a_p$  de 1mm, la variation de vitesse de coupe le long de l'arête (en pourcentage de la vitesse de coupe nominale) peut être tracée pour les stratégies en descente et celles en montée (FIG. 2). On s'aperçoit qu'à partir d'une inclinaison d'outil de  $10^\circ$ , la variation est beaucoup plus importante lorsque l'on usine en descendant. Ceci montre que des problèmes de coupe peuvent intervenir, notamment au niveau de la formation du copeau, et surtout la durée de vie de l'outil sera moins importante que pour une stratégie en montant. Cela est d'autant plus vrai pour de faibles angles d'inclinaison, pour lesquels la vitesse minimale en descente est proche de zéro. L'influence de la vitesse de rotation sur le comportement dynamique de l'outil fait également partie de l'étude expérimentale réalisée.

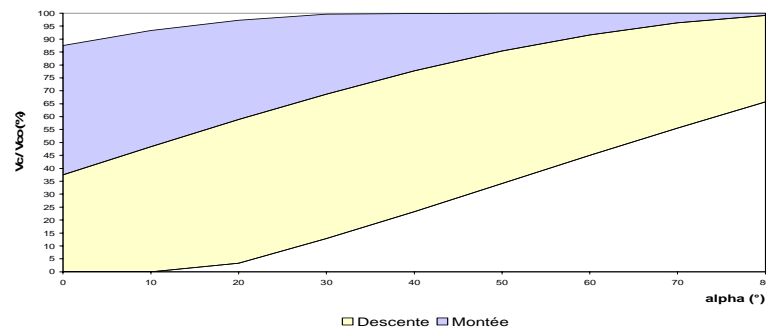


FIG. 2 – Variation de la vitesse de coupe le long de l'arête (en % de la vitesse de coupe nominale) pour  $a_p=1\text{mm}$  avec l'outil étudié.

## 2.2 Analyse de la direction des efforts de coupe

Il est également intéressant d'étudier la direction des efforts de coupe pour chacune des stratégies. Pour cela, une étude géométrique de la coupe est effectuée afin de déterminer l'engagement matière. La figure 4 représente les angles limites de la zone de coupe dans un plan contenant l'axe outil et la direction d'avance par rapport à l'axe outil en fonction de l'angle d'inclinaison d'outil (pour une profondeur de passe  $a_p$  de 1mm et une hauteur de crête de 0,1mm).

On s'aperçoit que la différence entre l'engagement matière en descente et celui en montée s'accroît au fur et à mesure que l'angle d'inclinaison augmente. Il en résulte une importante différence dans la direction des efforts de coupe (FIG. 3). Pour les stratégies en montée, l'outil est sollicité suivant une direction radiale, ce qui peut induire une flexion et des vibrations d'outil. En revanche, pour les stratégies en descente, l'outil est sollicité essentiellement en compression, ce qui procure une meilleure stabilité dynamique. On évite alors d'avantage les problèmes de flexion et de vibrations.

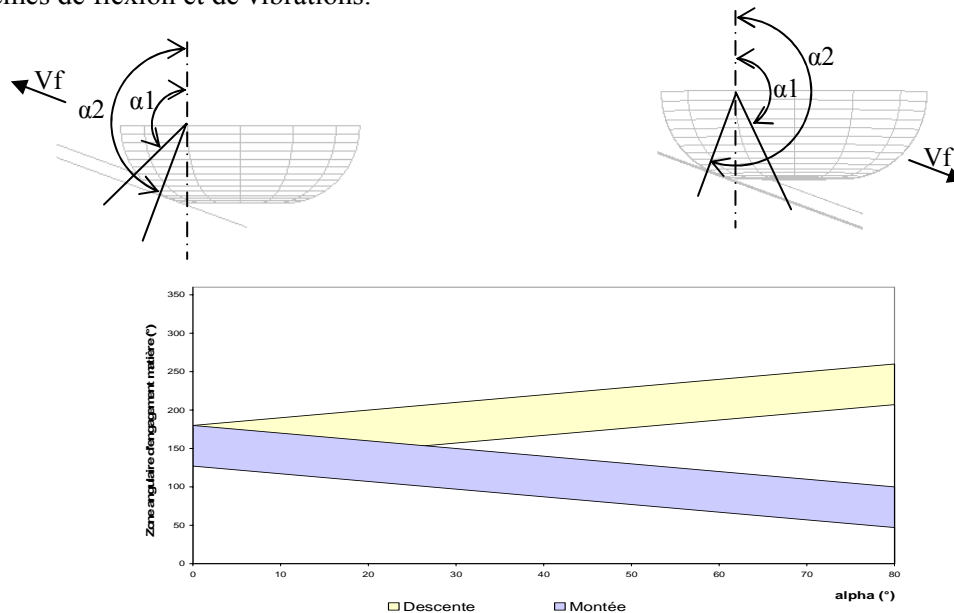


FIG. 3 – Angles d'engagement matière en fonction de la stratégie employée.

## 2.3 Analyse du taux d'enlèvement de matière

Enfin, il est intéressant de comparer le taux d'enlèvement de matière pour les différentes stratégies. Pour ce critère, ce sont les stratégies horizontales et verticales qui sont opposées. Pour simplifier l'analyse, nous avons comparé les pas transversaux de chaque type de stratégie

pour une profondeur de passe  $a_p$  donnée (1mm), une hauteur de crête imposée de 0,1mm et pour différents angles d'inclinaison outil (FIG. 4). Cela met en évidence l'avantage des stratégies verticales par rapport aux stratégies horizontales. En effet, le pas transversal est bien plus important, ce qui se traduit par un taux d'enlèvement de matière plus élevé pour une même avance. De ce point de vue, les stratégies verticales sont donc à préférer.

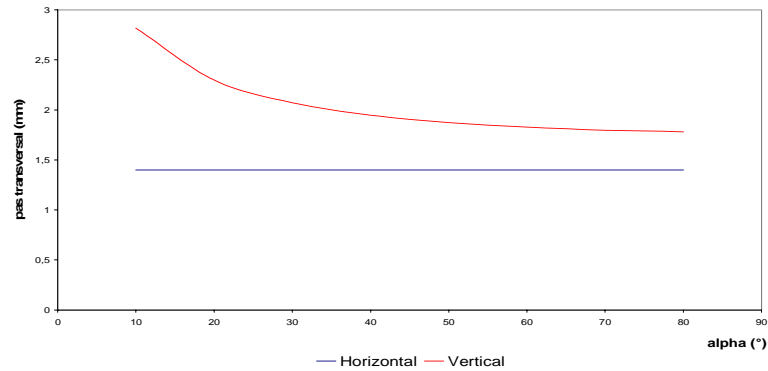


FIG. 4 – Pas transversaux pour les stratégies horizontales et verticales.

### 3 Etude expérimentale du comportement outil

Afin de valider les analyses et modélisations théoriques et dans le but de mettre en évidence les facteurs influents sur l'apparition des phénomènes de broutement en usinage, une étude expérimentale a été menée.

#### 3.1 Détail de la procédure expérimentale

L'étude présentée ici concerne l'usinage de plans avec un outil torique à plaquette ( $\varnothing 8-r2,5$ ), pour des profondeurs de passe de 0,5 ; 1 et 1,5 mm, une hauteur de crête spécifiée de 0,1mm et une avance de 0,1mm/dent. Ces plans ont été usinés suivant les différentes stratégies présentées (HD, HU, VD, VU) pour des angles d'inclinaison variant de 10° à 80° par pas de 10°. Les premiers essais ont été effectués à une vitesse de rotation constante, quelque soit l'angle d'inclinaison. D'autres essais ont été réalisés avec une vitesse de rotation calculée au point de contact outil/pièce, ou encore avec une vitesse de rotation variant de 1000 à 18000tr/min. Une mesure acoustique de l'usinage a été effectuée. Le dispositif de mesure comprenait notamment un micro dynamique Shure SM58 à directivité cardioïde placé au plus près de la zone d'usinage et un micro statique Stagg à large membrane à directivité cardioïde polarisé par une alimentation phantom. L'intérêt de ce type de micro est sa grande dynamique, sa grande sensibilité et sa réponse large et plate en fréquence.

Les signaux analogiques issus des deux micros transitaient par un préamplificateur/limiteur stéréo avant d'être numérisés. La chaîne de numérisation (Direct to Disc) était constituée d'une interface USB2 4 voies Tascam et d'un PC portable équipé d'un logiciel d'acquisition audio spécifique. Tous les signaux acquis étant dans le domaine audible, l'échantillonnage a été effectué à une fréquence de 48 kHz et avec une résolution de 24 bits.

Les surfaces obtenues ont ensuite été mesurées vis-à-vis des critères d'état de surface, du respect de la profondeur de passe et de la hauteur de crête. Pour cela, un rugosimètre à contact Talyrond-Hobson et un projecteur de profil numérique Tésa ont été utilisés.

#### 3.2 Analyses des mesures expérimentales à vitesse de rotation constante

Nous ne présentons ici qu'un exemple de relevé de mesure acoustique (FIG. 5). Il s'agit d'un usinage avec une stratégie horizontale en montée (HU) avec un angle d'inclinaison outil de 60°. La vitesse de rotation était alors de 5200 tr/min.

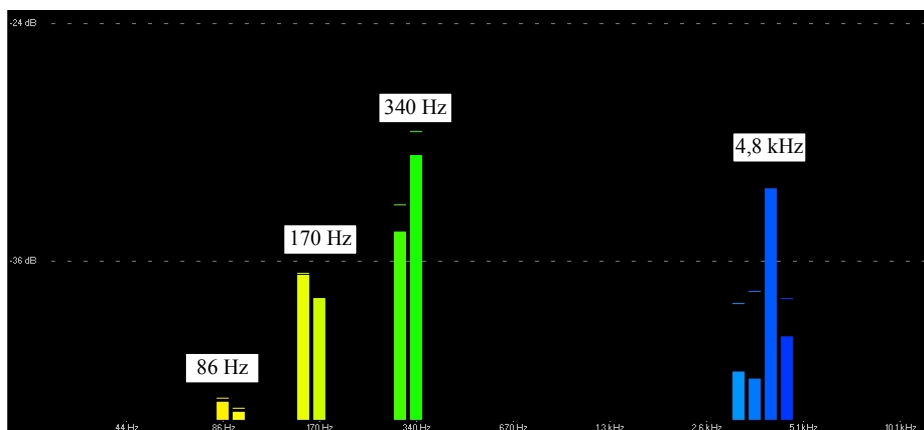


FIG. 5 – Exemple de relevé de mesure acoustique.

Cet exemple fait clairement apparaître les fréquences excitées pendant l'usinage. Les trois premières correspondent à la fréquence de passage des dents (87Hz) et ses deux premières harmoniques. Il apparaît également une amplitude acoustique importante à la fréquence propre de l'outil (environ 4,8kHz). Cela traduit l'apparition du broutement de l'outil pendant la coupe.

De façon générale, sur l'ensemble des essais effectués, on observe une amplitude acoustique (donc une amplitude vibratoire) plus importante en montant qu'en descendant. Cela confirme l'analyse théorique effectuée précédemment. Ainsi, pour des outils de faible rapport diamètre/longueur, l'usinage en descendant est conseillé. De plus, les mesures d'état de surface corroborent parfaitement les conclusions issues de l'analyse acoustique.

Plus particulièrement, la stratégie verticale en montée VU donne, dans notre cas d'étude, un état de surface très vibré dès 20° d'inclinaison. De plus, au-delà de cette valeur d'inclinaison outil, la profondeur de passe n'est plus respectée (plus de 5% d'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs programmées). Seule la hauteur de crête reste acceptable ( $\pm 5\%$ ) jusqu'à 50° d'inclinaison.

Les deux stratégies horizontales donnent des résultats à peu près équivalents, même si il reste préférable de descendre que de monter. La rugosité augmente avec l'angle d'inclinaison. L'état de surface est nettement vibré à partir de 40° en HU et de 50° en HD. Les constatations sont les mêmes pour la profondeur de passe : elle n'est plus respectée ( $\pm 5\%$ ) dès 40° en HU et 50° en HD. Par contre, la hauteur de crête est toujours respectée, sauf pour les forts angles d'inclinaison en montant (70 et 80°).

Enfin, la stratégie verticale en descente VD s'avère être la meilleure. L'état de surface reste à peu près constant ( $R_a=2\mu\text{m}$ ) quelque soit l'angle d'inclinaison. Il en est de même pour la hauteur de crête. Par contre, la profondeur de passe n'est plus respectée à partir 50°.

### 3.2 Analyses des mesures expérimentales à vitesse de rotation variable

Des essais ont également été effectués avec une vitesse de rotation calculée au point de contact outil/pièce. Les conclusions précédentes ne sont alors plus valables. Si la stratégie verticale en descente VD reste la meilleure, l'état de surface ne se dégrade plus avec l'augmentation de l'inclinaison. Il reste au contraire sensiblement constant. La vitesse de rotation a donc un effet important sur le comportement dynamique de l'outil.

Afin d'étudier cela plus précisément, des essais à inclinaison constante avec une vitesse de rotation variant de 1000 à 18000tr/min ont été menés. Il apparaît clairement que l'amplitude vibratoire (et l'état de surface) ne varie pas de façon monotone avec la fréquence de rotation de broche. Par exemple, pour le cas d'usinages avec une inclinaison de 40°, nous pouvons observer un comportement vibratoire important et un état de surface très dégradé pour des fréquences de rotation autour de 9000tr/min. L'amplitude de la plage de vitesse à éviter varie en fonction de la

profondeur de passe. Mais de façon générale, les meilleures conditions pour notre cas d'étude semblent être pour des vitesses de rotation en deçà de 4000 tr/min, ou au-dessus de 15000tr/min. Sans oublier que cela a une influence importante sur la durée de vie d'outil.

#### 4 Conclusions

Cette étude montre la difficulté du choix judicieux d'une stratégie d'usinage adaptée et des conditions de coupe associées. Nous avons vu notamment l'interaction entre l'inclinaison de l'outil, la fréquence de rotation et la profondeur de passe du point de vue du comportement dynamique de l'outil. L'étude présentée montre qu'une stratégie verticale en descente reste un choix particulièrement bon pour les cas d'outils de faibles rapports diamètre/longueur.

Par ailleurs, notre étude montre que l'acquisition acoustique reste un moyen rapide de mise en oeuvre d'une observation vibratoire de l'outil. Elle permet d'analyser le comportement vibratoire lors de l'usinage mais aussi de comparer les états vibratoires lors d'essais successifs. Son domaine fréquentiel d'observation est assez large, jusqu'à 20 kHz. Nous n'accédons par contre pas directement aux amplitudes des déplacements. Pour cela nous envisageons d'équiper la broche de capteurs sans contact de mesure des déplacements dans un plan normal à l'axe de broche afin de corrélérer les mesures effectuées.

Enfin, il apparaît intéressant d'approfondir l'étude afin d'aboutir à un outil de prédiction du comportement dynamique de l'outil torique en usinage 5 axes.

Cette étude est réalisée dans le cadre du groupe de travail "Manufacturing 21" qui réunit 11 laboratoires français. Les thématiques abordées par ce groupe sont la modélisation des processus de fabrication, la simulation d'usinage et les méthodes émergentes de fabrication.

#### Références

- Tobias, S.A. Fishwick, W. 1958. A theory of regenerative chatter. *The Engineer*. London.
- Thusty, J. Polacek, M. 1963. The stability of machine tools against self excited vibrations in machining. *Proceedings of the ASME Production Engineering Research Conference*. Pittsburgh.
- Altintas, Y. Budak, E. 1995. Analytical prediction of stability lobes in milling. *Annals of the CIRP*. **44**, 357-362
- Peigne, G. Paris, H. Brissaud D. & Gousskov, A. 2004. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness. *I.J. Machine Tools and Manufacture*. **44**, 1133-1142
- Gradisek, J. Baus, A. Govekar, E. Klocke F. & Grabec, I. 2003. Automatic chatter detection in grinding. *I.J. Machine Tools and Manufacture*. **43**, 1397-1403
- Axinte, D.A., Gindy, N., Fox, K. & Unanue, I. 2004. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining. *I.J. Machine Tools and Manufacture*. **44**, 1091-1108
- Guo, Y.B. & Ammala, S.C. 2005. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. *I.J. Machine Tools and Manufacture*. **46**, 1622-1627
- Lee, D.E. Hwang, I. Valente, C.M.O. Oliveira, J.F.G. & Dornfeld, D.A. 2006. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *I.J. Machine Tools and Manufacture*. **45**, 176-188