

# Étude du comportement vibratoire d'une paroi mince en alliage léger lors d'une opération de fraisage latéral

J-F Chatelain<sup>1</sup>, S. St-Martin<sup>2</sup>, R. Mayer<sup>2</sup>, H. Paris<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec, École de technologie supérieure

<sup>2</sup>Centre technologique en aérospatiale

<sup>2</sup>École Polytechnique de Montréal

<sup>3</sup> Laboratoire G-SCOP, Université de Grenoble, France

**Mots-clés:** Parois minces, fraisage latéral, écart de forme, simulation, vibrations, usinage grande vitesse

## 1. Introduction

Cet article présente un modèle de simulation de l'usinage de finition de parois minces. Durant l'usinage, les parois minces subissent de grandes déflexions dues à leur faible rigidité [1-5]. Il en résulte un excédant de matière sur les parois. Ce surplus se traduit par un écart de forme non négligeable. Le modèle proposé consiste en la simulation dans le domaine temporel du procédé d'usinage afin d'en déduire l'écart de forme résultant. Le modèle est basé sur la théorie du comportement vibratoire des plaques minces. Le modèle intègre un algorithme avancé qui analyse à chaque incrément de temps la position relative de la paroi par rapport à l'outil de coupe. Il en résulte une génération précise de la surface usinée. Cette information permet d'enrichir le processus de planification de la fabrication par une compensation des trajectoires d'outil.

## 2. Méthodologie

Un modèle d'analyse avancée et un prototype de résolution ont été conçus pour la simulation de l'usinage de finition de parois minces. Durant la simulation, les forces de coupe sont évaluées en fonction de l'immersion angulaire de chaque arête impliquée lorsqu'il y a contact. Ces forces modifient dans le temps la forme et la position relative de la paroi mince, ce qui modifie à leur tour l'immersion radiale. L'algorithme de résolution intégré au prototype de simulation a été développé dans le but de faire l'analyse du procédé de fabrication sur une base temporelle. L'algorithme comporte 3 modèles principaux.

### a) Modèle de force de coupe

L'usinage de finition est une condition d'usinage particulière car la pièce usinée est en contact avec l'outil pendant une faible proportion d'une rotation complète de l'outil. Ceci introduit des phénomènes non linéaires qui demandent un modèle de force adapté et contenant des coefficients de pression de coupe non constants. Les composantes du vecteur de force sont calculées en

fonction de la géométrie du copeau instantané tel que représenté aux Équations 1 et 2 :

$$F_t = K_{ic}bh + K_{ie}b \quad (1)$$

$$F_r = K_{rc}bh + K_{re}b \quad (2)$$

où  $F_t$  et  $F_r$  sont respectivement les composantes tangentielle et radiale de la force générée,  $K_{ic}$  et  $K_{ie}$  sont respectivement les coefficients non constants de pression de coupe et d'arête,  $h$  est l'épaisseur du copeau instantané et  $b$  sa largeur.

### b) Modèle de comportement de la paroi mince

Les parois minces qui séparent les poches d'évidement des pièces ont un comportement similaire à une plaque mince rectangulaire de configuration bridé-bridé-bridé-libre (BBBL), tel qu'illustré à la Figure 1.

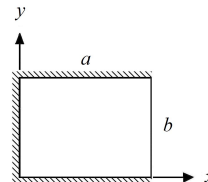


Figure 1: Schéma d'une plaque BBBL

Selon les conditions limites appliquées à chaque extrémité de la plaque mince, on peut déterminer la solution par série de Fourier qui exprime la déflexion de la plaque en fonction d'un moment ou d'une fonction de force transversale appliqué à une extrémité de la plaque.

La superposition stratégique des solutions associées à chaque extrémité de la plaque représente le comportement global de celle-ci[6]. La solution globale obtenue respecte parfaitement les Équations 3 et 4 qui expriment la déflexion des plaques minces sujettes à une fonction de force transversale.

$$D \left[ \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right] + \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = F_{(x,y,t)} \quad (3)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

où  $D$  est la rigidité en flexion de la plaque,  $W$  est sa déflexion latérale,  $\rho$  est la masse par unité de surface de la plaque,  $F$  est la composante en  $z$  de la force locale appliquée,  $E$  est le module de rigidité,  $h$  est l'épaisseur de la plaque et  $\nu$  est son coefficient de Poisson.

### c) Modèle d'enlèvement de matière

À chaque incrément de temps de la simulation, la position de la paroi mince par rapport aux lèvres coupantes de l'outil est calculée. L'immersion radiale instantanée des arêtes dans la pièce déterminera la topologie résultante de la surface usinée. Lorsqu'il y a contact entre l'outil et la paroi mince, une routine d'optimisation par itération cherche le bon équilibre entre les forces de coupe générées et la déflexion de la paroi. Une fois que l'équilibre est obtenu, on procède à la mise à jour de la géométrie de la surface. Lorsqu'il n'y a pas de contact entre les deux éléments, la paroi vibre librement, tel qu'illustré à la Figure 2.

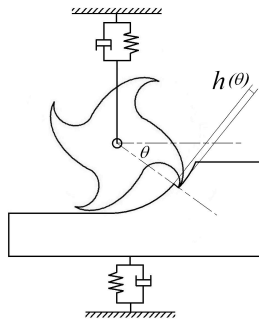


Figure 2: Modèle dynamique de l'usinage

### 3. Résultats de simulation

Une pièce test intégrant une paroi mince de configuration BBBL a été conçue et usinée pour la validation du modèle proposé. La déflexion de la paroi, lors de l'usinage de finition, a été mesurée à l'aide de capteurs de proximité vis-à-vis la surface opposée. La surface finale usinée a ensuite été mesurée afin de la comparer aux résultats de simulation, tel qu'illustré à la Figure 3. Les résultats de simulation sont donc très près de ceux mesurés en laboratoire.

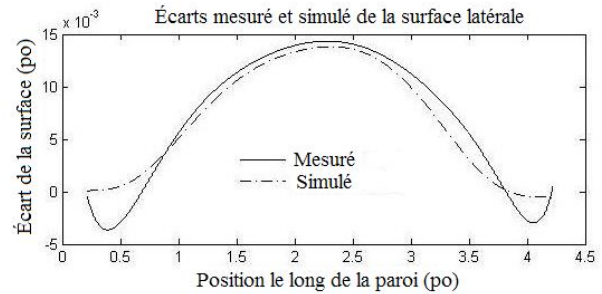


Figure 3: Évolution de l'écart de forme mesuré et simulé de la paroi

### 4. Conclusion

Le modèle proposé simule l'usinage de finition de parois minces afin d'en déduire l'écart de forme résultant. La simulation est basée sur le comportement statique et dynamique des plaques minces. À l'aide d'un algorithme avancé de résolution, la déflexion globale de la plaque mince est calculée à chaque incrément de temps de la simulation afin d'obtenir le comportement précis de la paroi par rapport à celui de l'outil de coupe et d'en déduire la surface réelle usinée.

Des tests d'impact ont été réalisés afin de comparer les fréquences propres expérimentales de la paroi mince avec celles générées analytiquement par l'algorithme de résolution. Les résultats calculés étaient conformes aux tests expérimentaux et permettent de valider le modèle proposé. L'étape suivante du processus d'enrichissement des données de FAO consiste en l'utilisation des écarts de forme simulés pour la compensation des trajectoires d'outils. Le modèle présenté fait partie d'un projet d'optimisation de l'usinage de haute performance des composantes aéronautique en alliage léger.

### Références

1. Campomanes, M.L. and Y. Altintas, *An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2003. **125**(3): p. 416-422.
2. Bayly, P.V., et al. *Effects of radial immersion and cutting direction on chatter instability in end-milling*. in *2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov 17-22 2002*. 2002. New Orleans, LA, United States: American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016-5990, United States.
3. Davies, M.A., et al., *Stability prediction for low radial immersion milling*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2002. **124**(2): p. 217-225.
4. Govekar, E., et al., *On stability and dynamics of milling at small radial immersion*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005. **54**(1): p. 357-362.
5. Peigne, G., et al., *Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(11): p. 1133-1142.
6. Gorman, D.J., *Vibration Analysis of Plates by the Superposition Method*. Series on Stability, Vibration and Control of Systems, Series A Vol. 3. 1999, Singapore: World Scientific Publisher. 384.