

---

# **Modélisation 3D des efforts de coupe et de la surface en UGV à partir d'un modèle numérique 2D**

## **Extension à l'étude de l'influence de l'usinage sur la durée de vie en fatigue de pièces aéronautiques**

**J. Limido, C. Espinosa, M. Salaün**

*Département de Génie Mécanique, ENSICA  
1, Place Emile Blouin  
31056 TOULOUSE Cedex 5 France  
Email: jlimido@ensica.fr*

---

*RÉSUMÉ. Cette étude introduit une approche globale de la modélisation du procédé de fraisage, ceci dans le cadre de la création de liens entre paramètres d'usinage et durée de vie en fatigue. Un modèle de fraisage permettant le calcul des efforts de coupe ainsi que la surface générée est présenté. Il se base sur le couplage de plusieurs modèles : modèle d'intersection outil/pièce, modèle numérique 2D, modèle mécanistique 3D. La démarche proposée présente l'intérêt de s'affranchir d'essais d'usinage : ceux-ci sont remplacés par des essais numériques 2D à l'aide d'un modèle SPH. Ce modèle de fraisage est complété par une phase de prédiction de durée de vie basée sur le calcul de concentration de contraintes locales. L'approche présentée a été confrontée à l'expérience. Une erreur maximale de 15% a été obtenue sur les cas de fraisage UGV étudiés en terme de durée de vie.*

*ABSTRACT. This study introduces a global solution for milling process modelling in the framework machining parameters influence on fatigue life. A model of milling allowing the calculation of the cutting forces as well as generated surface is presented. It is based on the coupling of several models: tool/part intersection model, 2D numerical model, 3D mechanistic model. The interest of the suggested approach is to be freed from machining tests: Those are replaced by 2D numerical tests using a SPH model. This milling model is supplemented by a phase of fatigue life prediction based on the calculation of local stress concentration. The approach presented was confronted with the experiment. A maximum error of 15% in terms of fatigue life was obtained in the HSM milling cases studied.*

*MOTS-CLÉS : UGV, modélisation 2D-3D, surface usinée, efforts de coupe, durée de vie en fatigue.*

*KEYWORDS: HSM, 2D-3D modelling, machined surface, cutting forces, fatigue life.*

---

## 1. Introduction

L'usinage par enlèvement de matière est le procédé le plus utilisé dans la production de composants pour l'industrie mécanique. Les caractéristiques finales de l'état de surface des pièces usinées sont un élément prépondérant de leur l'intégrité : en effet, les études récentes réalisées par (Suraratchai, 2006) montrent que, dans le cadre du fraisage d'un alliage d'aluminium, le paramètre caractéristique de la durée de vie en fatigue est le facteur de concentration de contraintes local associé à la surface usinée. Comme ces caractéristiques sont fortement liées au procédé de fabrication, il devient nécessaire d'optimiser les paramètres d'usinage pour améliorer la qualité de production. Pour cela, la modélisation numérique de l'usinage devient un outil de plus en plus incontournable. C'est dans ce cadre qu'est présenté ici un modèle de fraisage permettant la représentation de la surface usinée, le calcul des efforts générés lors de la coupe ainsi que de la durée de vie associée de la pièce.

Le développement de modèles de coupe a reçu une attention considérable tant de la part des chercheurs que de l'industrie. La plupart de ces études se sont concentrées sur la coupe orthogonale (arête de l'outil perpendiculaire à l'écoulement du copeau) (Shaw, 2004). En effet, ce cadre permet une modélisation 2D en déformation plane et une meilleure compréhension des mécanismes de base de la formation du copeau. Depuis quinze ans, de nombreux modèles de calcul par éléments finis ont été développés à cette fin, mais leur extension aux cas industriels 3D (fraisage par exemple) reste très complexe et très coûteuse en terme de temps de calcul (Shaw, 2004).

Pour pallier ce problème, l'approche que nous proposons ici est basée sur un modèle mécanistique 3D développé par (Altintas et al, 1995). De manière simplifiée, ce modèle relie une épaisseur de copeau à un effort de coupe via des coefficients de coupe qui sont déterminés expérimentalement par une série de tests de coupe orthogonale. Dans notre approche, les coefficients de coupe sont déterminés par un modèle de coupe numérique 2D. De plus, l'épaisseur locale de copeau non déformé est calculée à partir d'un algorithme d'intersection outil/matière de type Z-Map (Takeuch et al, 1989) qui permet la modélisation de cas de fraisages complexes (fraisage hémisphérique 5 axes par exemple) ainsi que la reconstruction de la surface usinée. On peut noter que le modèle n'introduit pas d'interaction entre le calcul des efforts et la construction de la surface, donc pas de prise en compte de la flexion de l'outil due aux efforts de coupe. Or, la flexion de l'outil est un paramètre influant de manière importante sur la texture de la surface finale. On peut noter que la prise en compte de celle-ci est facilement intégrable dans l'approche développée. C'est un travail en cours.

## 2. Construction du modèle 3D à partir du modèle 2D

Le modèle mécanistique de (Altintas et al, 1995) propose de discrétiser l'arête de coupe en une série d'arêtes élémentaires. L'effort de coupe global est alors la somme de tous les efforts de coupe de ces arêtes élémentaires, efforts obtenus en multipliant l'épaisseur élémentaire de copeau par des coefficients de coupe que nous déterminons à partir de résultats de simulations numériques SPH 2D.

**Modèle numérique SPH 2D.** Les simulations numériques ont été menées à l'aide du code hydrodynamique de calcul non linéaire LS-DYNA (LSTC, 2006) en utilisant la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) dans le cadre de la coupe orthogonale 2D. Rappelons que c'est une méthode lagrangienne sans maillage, qui propose une nouvelle discrétisation spatiale : les points ou particules se voient affecter une masse et une sphère d'influence dans laquelle leurs interactions sont pondérées par des fonctions d'interpolation. L'utilisation de cette méthode pour la modélisation de la coupe offre de nombreux avantages : les grandes déformations sont facilement représentées (pas de remaillage nécessaire) ; la séparation copeau / pièce est modélisée de manière naturelle et le frottement est pris en compte par l'interaction entre les particules. On n'introduit donc pas de paramètre numérique de recalage des efforts de coupe dans ce modèle. La validation de cette approche a été effectuée par comparaison avec des résultats expérimentaux en terme d'efforts de coupe et de morphologie de copeaux (voir (Limido et al, 2006)).

**Détermination des coefficients de coupe.** Afin de déterminer les coefficients de coupe nécessaires au modèle mécanistique, l'influence de l'avance sur les efforts de coupe ( $F_c$ ) et d'avance ( $F_f$ ) est étudiée à l'aide du modèle SPH développé. La Figure I illustre un cas d'application sur un alliage de Titane Ti6Al4V. Les quatre coefficients de coupe orthogonale sont alors déduits de ces courbes (deux pentes + deux ordonnées à l'origine). Notons que, dans le cas du fraisage, lorsque l'on se place sur l'arête de coupe, les conditions de coupe ne sont pas orthogonales mais obliques. Une transformation empirique classique (Shaw, 2004) transforme les 4 coefficients de coupe orthogonale en 6 coefficients de coupe oblique. Ils sont fonction de l'angle entre la vitesse de l'outil et l'arête de l'outil et permettent alors de calculer des efforts en fonction des conditions locales 3D de coupe.

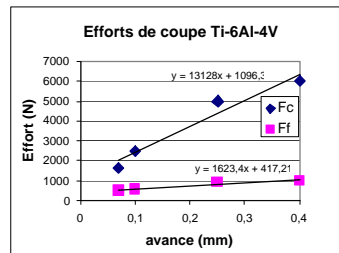
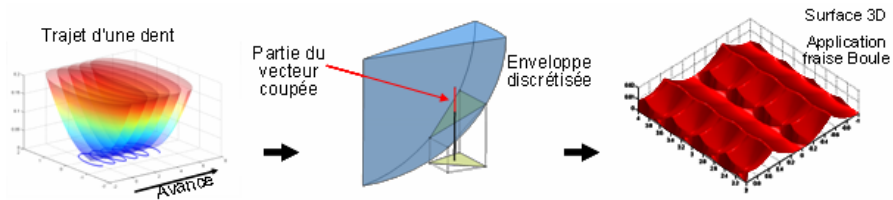


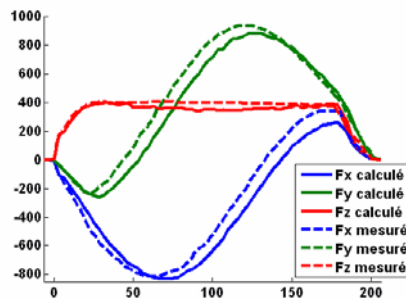
Figure I. Résultats SPH : Influence de l'avance sur les efforts de coupe

**Modèle d'intersection outil/pièce.** La donnée essentielle qu'il reste à déterminer afin d'utiliser le modèle mécanistique est l'épaisseur locale du copeau non déformé. Des modèles analytiques existent mais restent limités à des cas d'usinage simples. Une approche de type Z-Map a été choisie car elle s'applique à une grande variété de types de fraisage. Cette méthode est basée sur une représentation vectorielle de la pièce : le passage de l'arête coupe un certain nombre de vecteurs à une certaine hauteur et ce, à chaque pas de rotation. Cela permet donc de déterminer la texture 3D de la surface usinée ainsi que les conditions de coupe locales. La figure II illustre le principe de la modélisation sur un cas de fraisage hémisphérique. Le trajet de l'arête de coupe est discrétisé pour chaque pas de rotation. Un algorithme d'intersection permet de déterminer la quantité de matière enlevée. Cette phase est illustrée par l'intersection d'un incrément de rotation avec un vecteur de la Z-map. On en déduit la texture 3D de la pièce.



**Figure II.** Principe de modélisation de la surface

**Efforts de coupe.** Les coefficients de coupe nécessaires à l'évaluation des efforts 3D de coupe sont obtenus à partir du modèle SPH 2D. L'épaisseur locale du copeau non déformé déterminée par le modèle d'intersection outil/pièce ainsi que les coefficients de coupe obtenus à partir du modèle SPH 2D sont intégrés dans le modèle mécanistique. Les résultats du modèle développé sont comparés à des données expérimentales issues de la littérature (Shaw, 2004). La Figure III montre que ce modèle permet de reproduire des efforts de coupe pour des applications 3D comme le fraisage hémisphérique avec une très bonne précision.

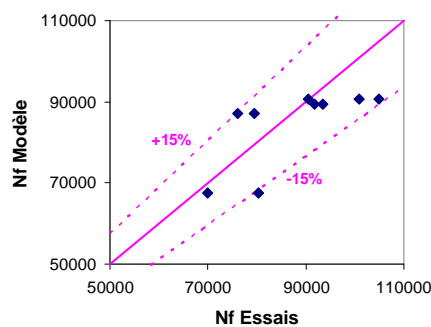


**Figure III.** Comparaison entre les efforts de coupe calculés et mesurés

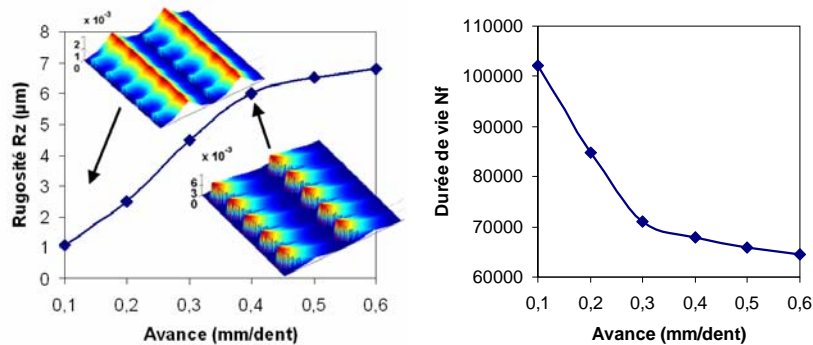
### 3. Détermination de la durée de vie en fatigue

Le modèle 3D décrit dans le chapitre précédent permet de déterminer la surface 3D usinée à partir des paramètres d'usinage. Ce modèle prend donc en compte les défauts axiaux, radiaux, d'excentricité des fraises et potentiellement la flexion de l'outil car les efforts de coupe sont aussi calculés. Les paramètres généralement retenus pour caractériser la surface en relation avec les propriétés en fatigue sont la rugosité, les contraintes résiduelles et la microstructure. Or les études récentes de (Suraratchai, 2006) ont permis l'identification du facteur de concentration de contraintes local comme paramètre caractéristique de la durée de vie en fatigue pour l'alliage d'aluminium 7010. La mise en œuvre de notre modèle reliant les paramètres d'usinage à la surface générée couplé à l'approche  $K_t \rightarrow N_f$  permet donc d'envisager une approche prédictive de la relation paramètres d'usinage - durée de vie. L'approche  $K_t \rightarrow N_f$  nécessite comme donnée d'entrée un profil de rugosité. Nous proposons ici d'utiliser le profil de rugosité théorique déterminé par le modèle de surface développé, afin de s'affranchir de toute une phase expérimentale assez lourde et coûteuse. L'objectif ici est de dégager des tendances sur l'influence des paramètres d'usinage sur la durée de vie en fatigue.

Cette approche a été validée sur des cas tests d'éprouvettes de flexion 4 points réalisés en fraisage grande vitesse utilisant des fraises toriques. La figure IV compare les durées de vie calculées par l'approche proposée et celles issues des essais. L'erreur maximale est d'environ 15% sur 9 cas de fraisages étudiés. On constate une forte concentration de durées de vie prédites autour 90000 cycles. Cela est dû aux faibles variations des paramètres d'usinage pour ces différents cas. Néanmoins, le modèle montre qu'une grande variation des paramètres d'usinage permet de mettre en évidence une évolution marquée de la durée de vie comme l'illustre la figure V pour des cas de fraisage hémisphérique. La génération d'éprouvettes de fatigue dans les conditions d'usinage correspondantes permettrait une comparaison modèle/essai en durée de vie. Ce travail est en cours de réalisation.



**Figure IV.** Comparaison Modèle/Essais sur éprouvettes flexion 4 points UGV



**Figure V.** Influence de l'avance à la dent sur Nf : cas d'application fraise hémisphérique

#### Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un programme de recherche commun avec AIRBUS France.

#### 4. Bibliographie

- Altintas Y., Lee P., « Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data », *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 36, n° 9, 1995, pp. 1059-1072
- J. Limido, C. Espinosa, M. Salaün, J.L. Lacomme, « SPH method applied to high speed cutting modelling », *International Journal of Mechanical Sciences*, à paraître, 2007, Disponible en ligne
- Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA theory manual*, ISBN 0-9788540-0-0, 2006
- Shaw M.C., *Metal cutting principles*, Oxford university press, 2004
- Suraratchai M., Influence de l'état de surface sur la tenue en fatigue de l'alliage d'aluminium 7010, Thèse de doctorat, ENSICA UPS, 2006
- Takeuch Y., Sakamoto M., Abe Y., Orita R., "Development of personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques". *Annals of the CIRP*, vol. 38, 1995, pp. 429-432.