



**HAL**  
open science

# MODELISATION GEOMETRIQUE DU FRAISAGE: APPLICATION AU FILETAGE A LA FRAISE

Guillaume Fromentin, Gérard Poulachon, Yann Paire, Anna Carla Araujo

► **To cite this version:**

Guillaume Fromentin, Gérard Poulachon, Yann Paire, Anna Carla Araujo. MODELISATION GEOMETRIQUE DU FRAISAGE: APPLICATION AU FILETAGE A LA FRAISE. Intercut 2010, 2010, Cluny, France. hal-03212852v1

**HAL Id: hal-03212852**

**<https://hal.science/hal-03212852v1>**

Submitted on 30 Apr 2021 (v1), last revised 17 Mar 2023 (v2)

**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.



## **MODELISATION GEOMETRIQUE DU FRAISAGE: APPLICATION AU FILETAGE A LA FRAISE**

**Guillaume FROMENTIN**

LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech, 71250 CLUNY, [guillaume.fromentin@ensam.eu](mailto:guillaume.fromentin@ensam.eu)

**Gérard POULACHON**

LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech, 71250 CLUNY, [gerard.poulachon@ensam.eu](mailto:gerard.poulachon@ensam.eu)

**Yann PAIRE**

LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech, 71250 CLUNY, [yann.paire@ensam.eu](mailto:yann.paire@ensam.eu)

**Anna Carla ARAUJO**

Université Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil, [anna@mecanica.ufri.br](mailto:anna@mecanica.ufri.br)

### **Résumé :**

*Les opérations de fraisage sont relativement complexes à mettre au point car il y a de nombreux paramètres de coupe et caractéristiques géométriques de l'outil, et que les efforts de coupe varient en usinage, du fait de la discontinuité de la coupe. La modélisation des efforts de coupe est un moyen efficace d'évaluer l'effet de ces paramètres et permet rapidement avec peu d'essais de dégager un domaine d'utilisation acceptable des paramètres. Toutefois pour bénéficier de cet apport, il faut disposer des modèles robustes et capables de reproduire l'effet de divers paramètres telle que la géométrie de l'outil.*

*Le filetage à la fraise est une technique qui permet de générer aussi bien des filets intérieurs et extérieurs par interpolation hélicoïdale avec un outil ayant le profil du filet. Cette technique possède plusieurs avantages, notamment par rapport au taraudage, et s'avère adapter au contexte de production de pièces à forte valeur ajoutée. D'un point de vue géométrique, le filetage à la fraise est une configuration 3D complexe, de part la trajectoire, la géométrie de coupe de l'outil et la section coupée.*

*L'étude proposée traite de la modélisation géométrique du filetage à la fraise qui est une étape préliminaire indispensable notamment à la modélisation des efforts de coupe. L'approche développée expose une formulation analytique complète de la géométrie de la fraise (arête de coupe, face de coupe, face en dépouille) et examine les spécificités de ce type d'outil en terme de variation d'angle d'outil. Par ailleurs, une formulation simplifiée de la section coupée est établie.*

**Mots clés :** Filetage à la fraise, géométrie de coupe, angle de coupe, épaisseur coupée

## 1 Introduction

Il existe une multitude de type de fraise, de technologies d'outil, de stratégie de fraisage. Le fraisage est une technique de coupe 3D où les conditions de coupe sont au nombre de quatre (vitesse de coupe, avance, et engagement axial et radial,). De plus, la section coupée est variable au cours du temps et souvent aussi le long de l'arête. Face à cette complexité, il est utile de disposer de modèles d'efforts de coupe permettant de prédéterminer l'effet de la géométrie d'outil et des conditions de coupe.

L'étude ci-dessous traite de la modélisation géométrique de la coupe lors d'une opération de filetage à la fraise, étape nécessaire pour ensuite simuler les efforts de coupe. Les outils de modélisation développés dans ce cas, présentent un intérêt direct pour cette technique et sont, de plus, applicables à d'autres situations de fraisage.

Le filetage à la fraise est une opération d'usinage avec une fraise de forme, ayant un profil semblable au filet qui doit être usiné. Il existe diverses technologies d'outil et l'étude proposée traite du cas de l'obtention de filet métrique avec des outils ayant un profil composé de plusieurs pas comme les fraises monoblocs. Un cycle de filetage intérieur en une passe à la fraise se déroule comme indiqué sur la figure 1. Après engagement de la fraise, l'outil a une trajectoire hélicoïdale sur un pas afin de générer le filet. Dans le cas d'un usinage en deux ou trois passes, le rayon de l'interpolation hélicoïdale augmente à chaque passe.

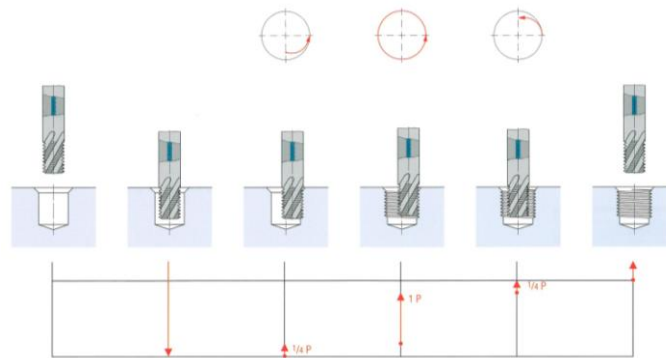


Fig. 1 : Cycle de filetage intérieur, en une passe et en avalant, à la fraise.

Le filetage à la fraise est une technique qui permet de réaliser divers profils de filet, et des filets intérieurs et extérieurs. Une même fraise peut usiner des filets à gauche et à droite, de différents diamètres mais de même pas, en avalant ou en opposition. Cette technique est donc plus flexible que le taraudage, et concurrence ce dernier. En cas de casse de la fraise, l'outil peut être retiré car il est d'un diamètre inférieur au filet. Cela permet de reprendre l'opération de fraisage sans rebuter la pièce. De plus, le fraisage permet d'avoir des vitesses de coupe adaptées alors qu'en taraudage, l'inversion de la broche est contraignante sur ce point. Enfin, le filetage à la fraise réduit, par rapport au taraudage, la longueur non filetée au fond des trous borgnes. Par ailleurs, le couple nécessaire lors d'une opération de filetage à la fraise est inférieur à celui en taraudage. Par contre, le temps de coupe est généralement bien plus court en taraudage. Pour ces raisons, la technique du filetage à la fraise est bien adaptée et utilisée pour la fabrication de pièces à forte valeur ajoutée, et à l'obtention de filet et de grand diamètre.

Les problématiques associées à la technique du filetage à la fraise sont diverses. Comme pour toutes les opérations d'usinage avec des outils de forme (fraisage ou rectification), il se pose la question des interférences géométriques et la précision des surfaces obtenues [1]. La seconde problématique est la modélisation des efforts de coupe. Il existe des approches sur ce thème [2] mais la complexité du filetage à la fraise fait qu'actuellement les approches utilisées sont simplifiées par l'absence de prise en compte de :

- la définition de l'arête de la fraise et l'angle de coupe
- du problème 3D pour le calcul de la section coupée : assimilation à une opération de fraise rectiligne [2]
- la géométrie locale de la coupe lors de la modélisation d'effort

Cette étude propose de formaliser une approche précise et simplifiée de la situation géométrique du filetage à la fraise.

Le cas traité dans cette étude portera sur la réalisation d'un filet métrique M16×2 à droite avec une fraise à fileter de diamètre 12 mm. Les notations utilisées pour le filet sont celles définies par la norme ISO 68-1 [3]. Le tableau récapitule toutes les données communes aux applications.

	Filet M16×2		Fraise à fileter
D	16 mm	$D_f$	12 mm
P	2 mm	P	2 mm
$D_1$	13.93 mm	$D_{2f}$	10.70 mm
$D_2$	14.70 mm	Z	5 dents

Tab. 1 : Données de l'étude.

## 2 Modélisation géométrique de la fraise

### 2.1 Profil de la fraise

Le profil d'une fraise (PF) peut-être paramétré, cf. éq. (1), fonction de l'altitude  $a_z$  d'un point de la fraise dans le repère de l'outil. Le profil de fraise considéré, est composé de segments de droite comme le montre la figure 2, la fonction  $PF_r$  est donc une fonction linéaire continue par morceaux tel que définie dans [1].

$$\mathbf{PF}(a_z) = [\mathbf{PF}_r(a_z), a_z]^T \quad (1)$$

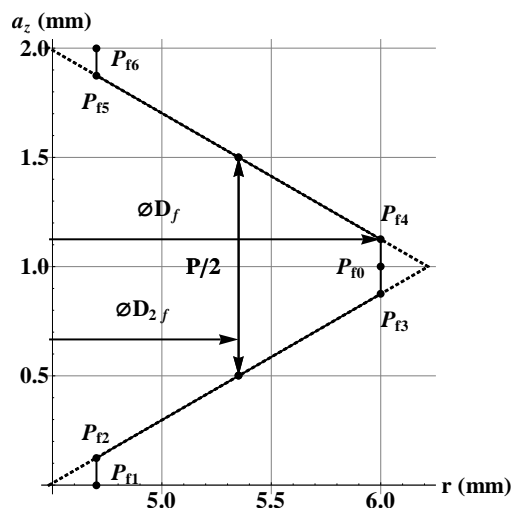


Fig. 2 : Profil de la fraise à fileter.

### 2.2 Arête de coupe sans définition de la face de coupe : cas 1

Dans le cas d'une fraise cylindrique, l'arête de coupe est généralement définie par une hélice circulaire. Si cette approche est appliquée à la fraise à fileter alors la position angulaire d'un point de l'arête de coupe est lié à l'altitude  $a_z$ , à l'angle d'hélice des goujures  $\lambda_{sf}$ , et au rayon de la fraise  $PF_r$ , par l'équation (2).

$$\theta_{ac1} = a_z \cdot \tan(\lambda_{sf}) / PF_r(a_z) \quad (2)$$

En conséquence, l'arête de coupe  $\mathbf{AC}_1$  peut-être paramétrée fonction du profil de la fraise  $\mathbf{PF}_r$ , par l'équation (3). Cette formulation est rapide et simple, toutefois elle ne prend pas en compte que la face de coupe de l'outil est aussi inclinée dans la direction radiale du fait de l'angle de coupe orthogonal.

$$\mathbf{AC}_1(a_z) = \mathbf{PF}_r(a_z) \cdot \cos(\theta_{ac1}), \mathbf{PF}_r(a_z) \cdot \sin(\theta_{ac1}), a_z^T \quad (3)$$

### 2.3 Arête de coupe avec définition de la face de coupe : cas 2

La seconde approche pour définir l'arête de coupe  $\mathbf{AC}_2$ , considère l'angle d'hélice de la goujure  $\lambda_{sf}$  ainsi que l'angle de coupe orthogonal  $\gamma_{of}$ . Cette approche nécessite de définir formellement la face de coupe  $\mathbf{FC}$ , et l'hypothèse retenue est d'associer à la forme de la goujure à un hélicoïde. La démarche adoptée dans cette étude est celle explicitée dans [4]. L'hélicoïde est une courbe réglée dont la courbe guide est une hélice circulaire diamètre égale à celui de la fraise et d'angle hélice celui de la goujure  $\lambda_{sf}$ . La règle est inclinée de l'angle de coupe orthogonal  $\gamma_{of}$  par rapport à la direction radiale.

Dès lors l'arête de coupe  $\mathbf{AC}_2$  est définie comme étant la courbe qui se situe sur la face de coupe  $\mathbf{FC}(a_z, r)$  et qui respecte le profil de la fraise  $\mathbf{PF}$ . Mathématiquement, l'arête de coupe  $\mathbf{AC}_2$  est obtenue par la convolution des deux fonctions, cf. éq. (4). L'arête ainsi définie, la position angulaire d'un point se calcule par l'équation (5).

$$\mathbf{AC}_2(a_z) = \mathbf{FC}(a_z, \mathbf{PF}_r(a_z)) \quad (4)$$

$$\theta_{ac2} = \arctan(\mathbf{AC}_2(a_z) \cdot \mathbf{e}_1, \mathbf{AC}_2(a_z) \cdot \mathbf{e}_2) \quad (5)$$

La figure 3 présente la comparaison des deux arêtes de coupe obtenues ainsi que le profil de la fraise. Le long de l'arête de coupe frontale, les deux formulations sont identiques, puisque dans cette zone l'arête de coupe est bien une hélice circulaire. C'est sur l'arête du flanc bas, qu'il existe un écart maximal entre les deux formulations, dans ce cas, qui se caractérise par un écart angulaire d'environ  $4^\circ$ .

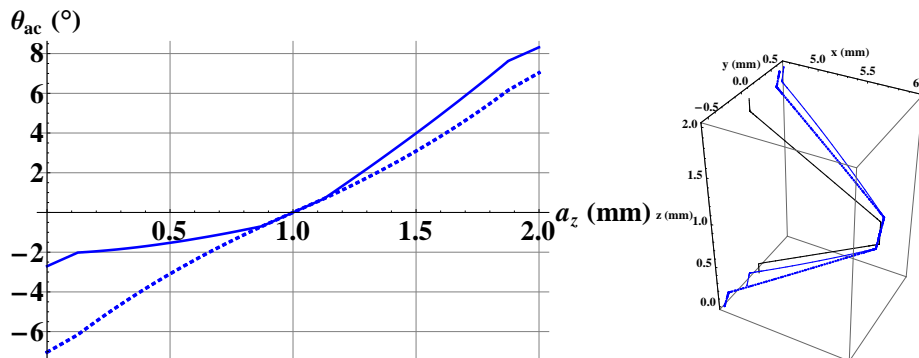


Fig. 3 : Comparaison des deux définitions de l'arête de coupe pour  $\gamma_{of} = 10^\circ$  et  $\lambda_{sf} = 30^\circ$ .

### 2.4 Face de dépouille

Les méthodes d'affûtage des faces en dépouille d'une fraise se caractérisent en générale par un angle de dépouille qui est constant dans la direction radiale de l'outil. La forme de cette surface de dépouille peut varier, toutefois ce qui est important c'est sa tangente à l'arête de coupe, ce qui définit l'angle de dépouille. L'hypothèse retenue, pour la modélisation de la face en dépouille est que dans chaque section radiale la face de dépouille est un cercle de rayon  $R_{FD}$ . Ainsi le centre de la section  $\mathbf{CFD}$  est ensuite calculé par l'équation (6) fonction de l'angle dépouille orthogonal souhaité. La face en dépouille peut ainsi être paramétrée par l'équation (7).

$$\mathbf{CFD}(a_z) = \mathbf{AC}(a_z) + R_{FD} \cdot \cos(\alpha_{of}) \cdot \mathbf{VR}(a_z) + R_{FD} \cdot \sin(\alpha_{of}) \cdot \mathbf{VNR}(a_z) \quad (6)$$

$$\mathbf{FD}(a_z, \theta) = \mathbf{CFD}(a_z) + R_{FD} \cos(\theta + \alpha_{of} + \theta_{ac}), \sin(\theta + \alpha_{of} + \theta_{ac}), 0^T \quad (7)$$

La figure 5 montre la modélisation géométrique de l'arête de coupe ( $\mathbf{AC}_2$ ), de la face de coupe ( $\mathbf{FC}$ ) et de la face en dépouille ( $\mathbf{FD}$ ) d'une fraise à fileter.

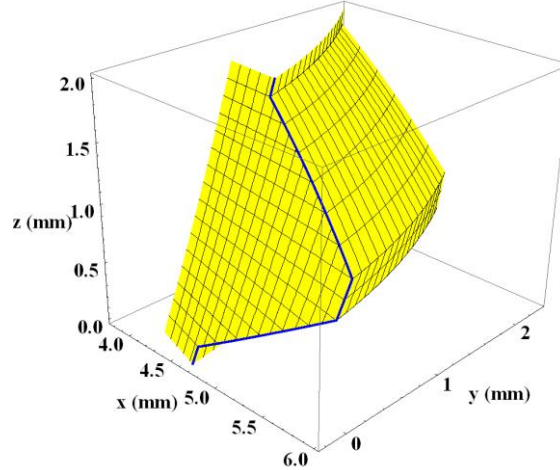


Fig. 4 : Modélisation géométrique d'une fraise à fileter ( $\gamma_{of} = 10^\circ$ ,  $\lambda_{sf} = 30^\circ$ ,  $\alpha_{of} = 10^\circ$ ).

### 3 Angles de la fraise à fileter

Les définitions utilisées sont celles de la norme ISO 3002-1 [5]. Sur la base des surfaces de coupe et de dépouille paramétrée précédemment, il est possible de définir les normales à ces surfaces et les intersections avec les plans de coupe tel que le plan de coupe normal  $P_n$ . Les calculs vectoriels sont conduits comme dans l'étude [4]. Cela permet ensuite de déterminer les angles réels le long de l'arête sachant que la définition des surfaces repose :

- pour la face de coupe sur l'angle d'hélice ( $\lambda_{sf}$ ) et l'angle de coupe orthogonal ( $\gamma_{of}$ ) sur l'arête frontale
- pour la face en dépouille sur un angle de dépouille orthogonal ( $\alpha_{of}$ ) constant.

#### 3.1 Angle de coupe

Il est choisi d'analyser l'angle de coupe normal, car il est pris dans le plan de coupe normal qui est le plus proche du plan d'écoulement du copeau sur la face de coupe. Les angles de coupe pris dans le plan d'avance  $P_f$  ou le plan orthogonal  $P_o$  ne sont absolument pas significatifs de ce que la matière voit pendant la coupe.

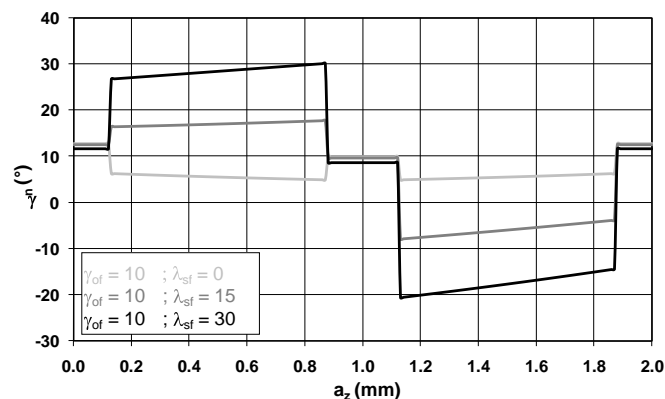


Fig. 5 : Variation de l'angle de coupe normal le long de l'arête de coupe.

La figure 5 montre que l'angle de coupe normal ( $\gamma_n$ ) varie considérablement le long de l'arête. L'augmentation de l'angle d'hélice de goujure ( $\lambda_{sf}$ ), tend à introduire de la coupe fortement négative sur le flanc supérieur et l'inverse sur le flanc inférieur. Cela a pour conséquence d'induire localement sur l'arête des efforts de coupe très différents.

### 3.2 Angle de dépouille

De la même manière que pour l'angle de coupe normal, l'angle de dépouille normal ( $\alpha_n$ ), varie le long de l'arête de coupe. Sur les arêtes de coupe des flancs, cet angle a des valeurs environ deux fois inférieures à celles sur l'arête frontale. De fait, les efforts liés au frottement de la face en dépouille de la fraise seront affectés par cette propriété géométrique.

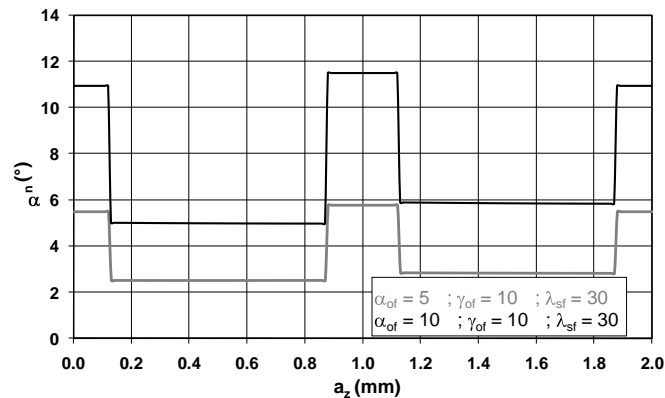


Fig. 6 : Variation de l'angle de dépouille normal le long de l'arête de coupe.

## 4 Calcul de la section coupée

Le calcul des sections coupées en fraisage est indispensable pour la modélisation des efforts et la compréhension de la technique d'usinage. Pour une fraise cylindrique, il existe principalement trois approches pour mener ce calcul :

- Considérer directement que l'épaisseur coupée  $h$  varie suivant la loi  $h = f_z \sin \theta$ , où  $\theta$  est la position angulaire de la fraise
- Assimiler les trajectoires des dents de la fraise à des cercles et calculer la distance normale entre eux.
- Définir réellement la trajectoire des dents par des cycloïdes et calculer la distance normale entre elles.

Cette dernière est a priori la solution exacte et a déjà été mise en œuvre dans le cas de la fraise à fileter [6]. Elle s'avère lourde en temps de calcul, car elle repose sur la détermination des distances normales entre les surfaces 3D balayées par les dents de la fraise. Il est donc développé ci-dessous la méthode reposant sur des cercles, tout en ne simplifiant pas le problème à un cas plan.

### 4.1 Trajectoire d'une fraise à filetée

Lors d'une opération de filetage à la fraise, la trajectoire du centre fraise (**TCF**) est une hélice circulaire, et la vitesse d'avance programmée est appliquée par la commande numérique dans l'espace le long de cette courbe. Elle peut être paramétrée, cf. [1], par les équations (8-9) où  $R_{tcf}$ ,  $p$ ,  $\omega$ ,  $\Omega$  représentent respectivement, le rayon de l'interpolation hélicoïdale, le pas en radian, la vitesse angulaire de la fraise et la vitesse angulaire de l'axe de la fraise.

$$\Omega = .Z.f_z.\omega / 2\pi.\sqrt{p^2 + R_{tcf}^2} \quad (8)$$

$$\mathbf{TCF}(t) = [R_{\text{tcf}} \cdot \cos(\Omega t), R_{\text{tcf}} \cdot \sin(\Omega t), p \cdot \Omega t]^T \quad (9)$$

La projection dans le plan de l'avance  $f_z$ , est donnée par l'équation (10) et la composante verticale de l'avance est donc obtenue par la relation (11).

$$f_{z12} = f_z \left( 1 + \left( \frac{p}{R_{\text{tcf}}} \right)^2 \right)^{-1} \quad (10)$$

$$f_{z3} = \sqrt{f_z^2 - f_{z12}^2} \quad (11)$$

#### 4.2 Calcul de la section coupée : méthode des cercles

La figure 7 représente les hypothèses pour le calcul de l'épaisseur coupée  $h$ . La trajectoire des dents est approximée par des cercles de rayon défini par le profil de la fraise (**PF**). La distance suivant un arc de cercle entre les centres des deux cercles, représentant la trajectoire de deux dents consécutives, est égale à l'avance projetée dans le plan  $f_{z12}$ . Afin de prendre en compte le mouvement vertical de la fraise dans la détermination de la section coupée, le rayon des deux cercles retenu considère sur le profil de la fraise **PF** un point d'altitude  $a_z$  donné et un point d'altitude  $a_z - f_{z3}$ .

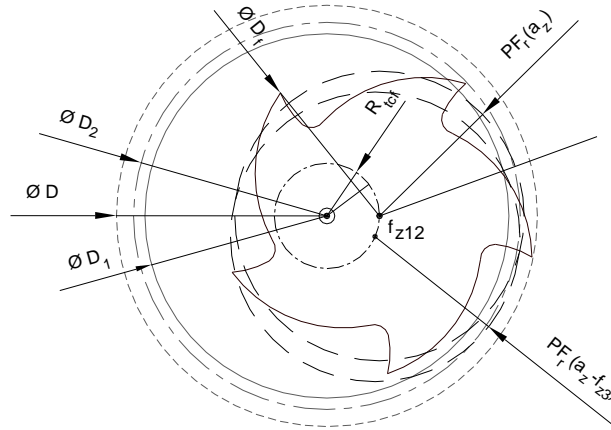


Fig. 7 : Configuration pour le calcul de l'épaisseur coupée  $h$ .

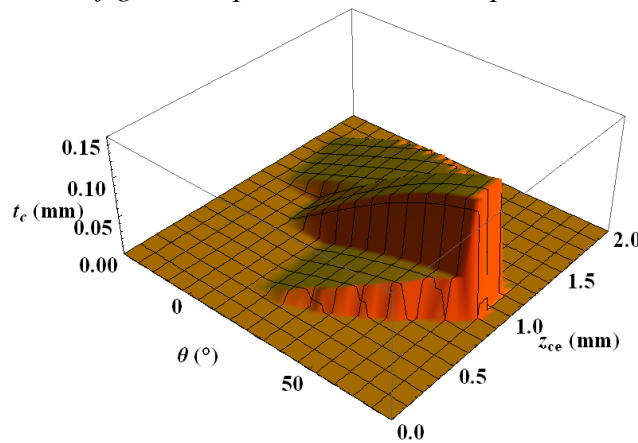


Fig. 8 : Epaisseur coupée  $h$  le long de l'arête ( $\gamma_{of} = 10^\circ$ ,  $\lambda_{sf} = 30^\circ$ ,  $f_z = 0.15 \text{ mm./tr/dt}$ ).

La figure 8 présente le résultat d'un calcul de section coupée dans un cas déjà étudié avec la méthode exacte [6]. Les résultats de la nouvelle méthode montre que l'épaisseur coupée  $h$  diminue fonction du temps (usinage en avalant), que l'arête frontale coupe une épaisseur plus grande que celles des flancs. Dans l'application présentée, il s'agit d'un usinage en avalant et le fraisage d'un filet avec un pas à droite, la composante verticale de la vitesse est donc



ascendante. Il en résulte que l'épaisseur coupée par l'arête du flanc supérieur est plus importante que celle coupée par le flanc inférieur. Cette nouvelle approche nécessite peu de ressource de calcul et permet de bien reproduire le problème 3D.

## 5 Analyse et conclusion

Ces travaux montrent des particularités importantes des opérations de filetage à la fraise. La modélisation géométrique proposée porte sur les points suivants :

- Modélisation géométrique de l'outil et détermination des angles d'outil
- Définition de la trajectoire du centre outil et calcul de la section coupée

Les angles de coupe et de dépouille varient considérablement le long de l'arête de coupe. L'angle de coupe normal peut devenir négatif sur le flanc supérieur du fait de l'angle d'hélice de la goujure. Quant à l'angle de dépouille normal, il est simplement divisé par deux sur les arêtes des plans et cela du fait de l'orientation de l'arête de coupe, donc du profil du filet à usiner.

L'épaisseur de la section coupée est variable le long de l'arête, et lors d'un usinage en avalant le flanc du haut est plus chargé que le flanc du bas. Or il se trouve que l'angle de coupe normal est négatif sur le flanc du haut, ce qui est donc défavorable. Dans le cas d'usinage en opposition c'est le flanc du bas qui serait le plus chargé ce qui paraît donc plus profitable.

L'angle d'hélice de la goujure introduit de la coupe négative ce qui augmente les efforts de coupe. Toutefois, cet angle à l'intérêt de repartir dans le temps la section coupée, ce qui diminue les piques des efforts de coupe. De cette analyse qualitative, il faut déduire qu'il devrait donc exister une valeur optimale de l'angle de goujure en terme de variation et de pique d'efforts de coupe. Cette optimisation doit être possible avec un modèle adapté de la pression de coupe.

En conclusion, une modélisation mécanique des efforts de coupe, pour une opération de filetage à la fraise, doit prendre en compte les paramètres locaux de la géométrie de l'arête ainsi que ces conditions de chargement. Cela nécessite notamment d'établir que l'énergie spécifique de coupe considérée n'est pas seulement fonction de l'épaisseur coupée mais aussi fonction de la géométrie de coupe locale.

## Références

- [1] G. FROMENTIN, G. POULACHON, 2010, Modeling of interferences during thread milling operation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, N° 49-1, p. 41-51.
- [2] A.C. ARAUJO, J.L. SILVEIRA, M.B.G. JUN, S.G. KAPOOR, R. DEVOR, 2006, A model for thread milling cutting forces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, N°46, p. 2057-2065.
- [3] ISO 68-1:1998 standard, ISO general purpose screw threads - Basic profile - Part 1: Metric screw threads.
- [4] G. FROMENTIN, G. POULACHON, 2010, Geometrical analysis of thread milling – Part 1: Evaluation of tool angles, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, N° 49-1, p. 73-80.
- [5] ISO 3002-1 standard, Basic quantities in cutting and grinding. Part 1: Geometry of the active part of cutting tools - General terms, reference systems, tool and working angles.
- [6] G. FROMENTIN, G. POULACHON, 2010, Geometrical analysis of thread milling – Part 2: Calculation of uncut chip thickness, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, N° 49-1, p. 81-87.