



HAL
open science

Maîtrise de l'orientation des axes outils pour le parcours de trajectoires d'ébauche 5 axes

Baptiste Jousselin, Yann Quinsat, Christophe Tournier

► To cite this version:

Baptiste Jousselin, Yann Quinsat, Christophe Tournier. Maîtrise de l'orientation des axes outils pour le parcours de trajectoires d'ébauche 5 axes. Conférence Manufacturing'21, Jun 2021, Angers (en ligne), France. hal-03272582

HAL Id: hal-03272582

<https://hal.science/hal-03272582>

Submitted on 28 Jun 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.



Maîtrise de l'orientation des axes outils pour le parcours de trajectoires d'ébauche 5 axes

Baptiste JOUSSELIN^{(a)(b)}, Yann QUINSAT^{(a)*}, Christophe TOURNIER^(a)

(a) Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190, Gif-sur-Yvette, France.

(b) TopSolid, 7 rue du Bois Sauvage, 91055 Evry, France.

* Correspondant : yann.quinsat@ens-paris-saclay.fr

Résumé : l'accessibilité accrue de l'outil obtenue par l'utilisation d'opérations 5 axes en ébauche permet de réduire le temps d'usinage global des pièces complexes en supprimant les phases de reprise d'ébauche et de semi-finition. Cependant, les opérations 5 axes génèrent des variations d'orientation de l'outil importantes qui, conjuguées aux engagements élevés de l'outil dans la matière requis par les conditions d'ébauche, peuvent être pénalisantes. La maîtrise de ces variations est donc primordiale pour garantir la durée de vie de l'outil ainsi que la qualité de l'ébauche.

Une trajectoire peut être définie par deux courbes, l'une contraignant la position de l'outil et l'autre son orientation. L'axe outil est alors caractérisé par un point sur chacune de ces courbes guides. Une optimisation multi-objectifs est proposée pour définir les orientations successives de l'axe outil le long des courbes guides qui minimisent l'écart à la consigne angulaire ainsi que la variation angulaire entre les différents axes le long de la trajectoire, tout en respectant un intervalle angulaire de tolérance.

À partir de la définition des poids de chacune des fonctions objectif sur la minimisation, il est possible de trouver une solution d'orientations d'axes outil qui satisfait les contraintes données tout le long de la trajectoire. L'application sur une pièce test par simulation et usinage a permis de mettre en évidence les avantages de la maîtrise de l'évolution de l'orientation des axes outils en ébauche 5 axes.

Mots clés : Usinage 5 axes, Ébauche, Optimisation, Orientation d'axes outil.

1 Introduction

Les opérations de fraisage 5 axes présentent de nombreux avantages lors de l'usinage de cavités complexes, notamment l'amélioration de la productivité grâce à une accessibilité de l'outil augmentée par rapport aux opérations 3 axes. Il est ainsi possible de réduire les longueurs de trajectoires et les longueurs d'outil nécessaires (Davim, 2012). Majoritairement utilisées en finition, les opérations 5 axes peuvent aussi se révéler bénéfiques en ébauche grâce à une réduction du temps global d'usinage et une minimisation du volume de matière restant en fin d'ébauche.

Contrairement aux phases de finition, qui se concentrent sur le balayage de surfaces, l'ébauche s'applique au vidage de volumes. Les valeurs d'engagement de l'outil dans la matière sont alors plus conséquentes et peuvent présenter des risques pour la pièce comme pour l'outil si elles ne sont pas maîtrisées (Prat, 2012). Cette maîtrise est d'autant plus cruciale lors d'une ébauche multiaxiale pendant laquelle les variations d'orientation de l'outil peuvent être importantes. Cet article propose d'optimiser l'évolution des orientations de l'axe de l'outil lors d'une opération d'ébauche sur centre d'usinage 5 axes de manière à respecter un compromis entre la fluidité des mouvements des axes de la machine lors du parcours de la trajectoire et l'angle souhaité entre l'axe outil et la surface usinée en bout. L'objectif étant de développer cette optimisation dans un logiciel de FAO, la stratégie est appliquée dans l'espace des tâches et ne s'appuie pas sur un modèle d'effort de coupe particulier afin qu'elle reste indépendante au maximum du choix de la machine, de l'outil ou encore de la matière. Un modèle d'efforts de coupe permettrait toutefois de déterminer le compromis entre les objectifs d'optimisation pour un matériau et un outil définis.

Après une étude bibliographique sur l'optimisation des orientations d'axes outil en usinage 5 axes, le calcul des courbes guides utilisées pour l'optimisation de l'orientation des axes outil est exposé en partie 3. La détermination des orientations d'axes outil est présentée en partie 4, puis leur optimisation est décrite en partie 5. L'application de la stratégie à l'ébauche d'une poche est réalisée en partie 6 avant de conclure sur les bénéfices de cette méthode dans une dernière partie.

2 Gestion des orientations de l'axe de l'outil

Les principaux travaux sur la gestion des orientations concernent le lissage de ces dernières. Un lissage global des orientations successives de l'axe outil par une optimisation dans l'espace articulaire a été proposée afin d'améliorer les performances cinématiques des axes de la MOCN (Sun, 2013). Cependant, le lissage dans l'espace articulaire rend complexe le contrôle du positionnement de l'outil par rapport à la pièce.

Le lien entre l'espace des tâches et l'espace articulaire peut être établi par définition d'un domaine d'orientations admissibles à partir de contraintes cinématiques des axes de la machine (Castagnetti, 2008). La dépendance de ces méthodes à la machine utilisée est toutefois un inconvénient pour le développement d'une solution FAO. L'optimisation de l'orientation des axes outil dans le repère associé à la pièce est donc préférable.

Un lissage des orientations de l'outil en usinage par le flanc a été étudié pour le passage de coins 5 axes en guidant l'outil par deux courbes B-Spline (Beudaert, 2013).

Cette stratégie locale dans l'espace articulaire ne considère pas la trajectoire complète et ne prend pas en compte l'usinage simultané en bout et en flanc de l'outil.

Des stratégies de lissage global dans l'espace des tâches permettent de limiter les variations brusques d'orientation de l'outil lors du parcours d'une trajectoire par minimisation des variations angulaires de l'axe outil (Chen, 2015). Ces méthodes améliorent les performances cinématiques des axes de la machine, mais n'optimisent pas l'orientation de l'outil par rapport à la pièce à ébaucher. L'orientation de l'outil par rapport à la pièce doit donc être prise en compte lors du lissage.

Le guidage de l'outil par deux courbes permet de trouver un compromis entre la fluidité de l'évolution des orientations de l'axe outil et les écarts géométriques entre le flanc de l'outil et la surface à usiner (Pechard, 2009). Ce lissage global des orientations effectué dans l'espace des tâches prend bien en compte l'orientation de l'outil usinant par son flanc, mais pas l'orientation par rapport à la surface usinée en bout. Lors d'un usinage en bout d'outil, la maîtrise de l'orientation de l'outil par rapport à la pièce permet la gestion des collisions locales comme globales (Jun, 2003) et influe directement sur les efforts de coupe (Gilles, 2007) et la qualité de la surface usinée (López De Lacalle, 2007). Pour l'ébauche d'une cavité, l'optimisation de l'inclinaison doit être menée en considérant à la fois l'orientation de l'outil par rapport aux flancs et au fond afin d'assurer le respect des géométries de la pièce.

Appliquée dans l'espace des tâches, la stratégie proposée dans cet article vise le contrôle du positionnement de l'outil par rapport aux géométries de la pièce lors d'un usinage simultané en flanc et en bout, sur la totalité de la trajectoire d'ébauche. Les limites cinématiques de la MOCN ne sont pas prises en compte en vue de garder l'indépendance vis-à-vis de la machine utilisée. Les performances cinématiques sont toutefois étudiées dans le but de réduire les temps d'usinage.

3 Contrainte de l'orientation de l'outil en usinage par le flanc

La plupart des stratégies proposées pour l'ébauche 5 axes utilise le fraisage avec 5 axes simultanés uniquement dans les zones non réalisables en 3 axes. L'ajout local de trajets de reprise 5 axes peut pourtant mener à des variations brusques de l'engagement radial de l'outil dans la matière : une partie de l'outil peut évoluer dans une zone où la matière a déjà été retirée pendant qu'une autre subit une charge locale élevée due à un engagement important (Figure 1a). L'anticipation de l'orientation de l'outil nécessaire lors de la dernière passe sur le flanc permet d'atténuer ces variations d'engagement entre passes radiales successives et ainsi répartir plus régulièrement la charge appliquée à l'outil le long de l'arête de coupe (Figure 1b).

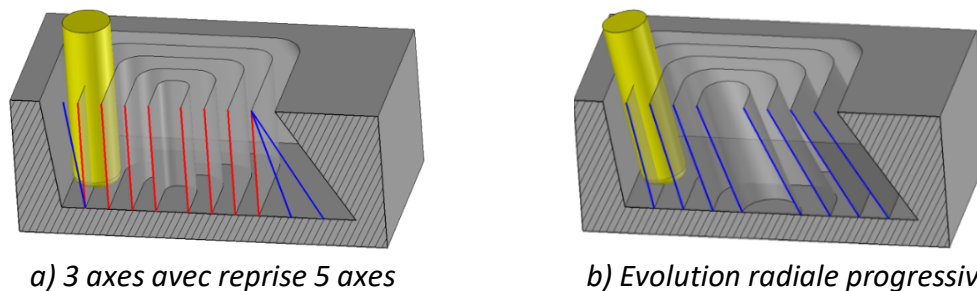


Figure 1 : Evolution de l'engagement radial de l'outil entre passes successives

Afin de contrôler l'orientation de l'axe outil et s'assurer qu'elle évolue de manière continue comme sur la Figure 1b, l'outil est guidé par 2 courbes (Figure 2). La courbe de trajet est le lieu des points de l'axe outil sur la surface usinée en bout. La courbe de dépinçage est le lieu d'un autre point appartenant à l'axe outil pour l'orienter. Ces courbes sont construites à partir de la géométrie de la poche (fond et flancs) de manière à épouser au mieux la géométrie des surfaces de flanc lors de la dernière passe radiale, et enlever ainsi un maximum de matière pendant la phase d'ébauche avec une évolution continue de la prise de passe radiale (Jousselin, 2019).

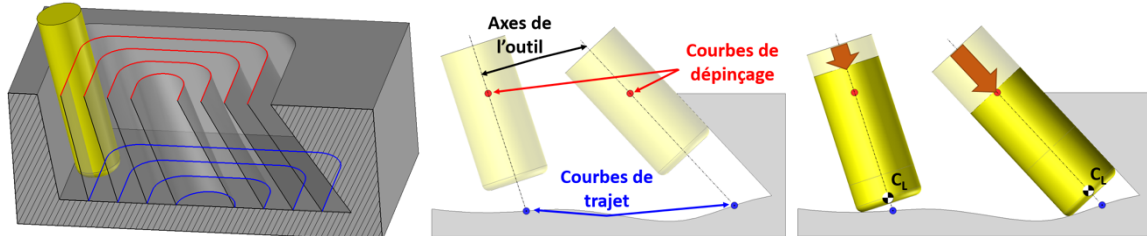


Figure 2 : Guidage de l'axe outil sur 2 courbes

Les courbes d'appui ainsi définies permettent de contraindre l'orientation de l'outil dans le plan orthogonal à la direction d'avance. Un degré de liberté reste cependant à fixer dans le plan d'avance pour contraindre totalement l'orientation de l'outil.

L'outil est ensuite déplacé, dans la direction de l'axe obtenu, jusqu'au contact avec la surface usinée en bout pour en déduire la position du centre outil C_L (Figure 2). Toute la partie de calcul de l'orientation de l'axe outil est donc réalisée sans connaissance exacte de la position du point de contact de l'outil avec la surface usinée en bout.

4 Orientation des axes outil par synchronisation de courbes guides

La courbe de trajet, C_T d'abscisse curviligne $s_T \in [0,1]$, ainsi que la courbe de dépinçage, C_D d'abscisse curviligne $s_D \in [0,1]$, sont orientées avec un point de départ de l'outil fixé sur C_T en s_{T0} (Figure 3).

L'orientation \mathbf{u} de l'outil par rapport à la surface usinée en bout est paramétrée par les angles de lacet (θ_n), roulis (θ_f), et tangage (θ_t), définis dans le repère $(C_C, \mathbf{f}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$. C_C est le point de contact entre l'outil et la surface usinée en bout, \mathbf{f} la direction d'avance de l'outil par rapport à la surface, \mathbf{n} la normale à la surface au point C_C , et \mathbf{t} le produit vectoriel entre \mathbf{f} et \mathbf{n} (Figure 3). Une approximation sur l'évaluation de la normale de contact est alors réalisée dans le but de simplifier les calculs. Comme l'illustre la Figure 3, la base $(\mathbf{f}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$ est calculée au point $P_{T(s_T)}$ de la courbe de trajet et non au point de contact réel C_C , dont la position est encore inconnue. Cette approximation revient à considérer que l'orientation de la normale à la surface varie peu dans une zone définie à un rayon d'outil près.

θ_f étant déjà contraint par le fait que l'axe outil possède un point sur C_T et un point sur C_D , il suffit de fixer θ_t pour contraindre l'orientation de l'outil. Le problème consiste donc à trouver les valeurs d'abscisses curvilignes s_T et s_D qui permettent d'obtenir l'orientation souhaitée (Equ.1). La synchronisation des courbes représente cette étape de corrélation entre abscisses curvilignes de C_T et C_D pour générer les axes

outil successifs sur toute la trajectoire. La synchronisation paramétrique uniforme consiste à faire évoluer s_T et s_D selon un même et unique paramètre $s \in [0,1]$.

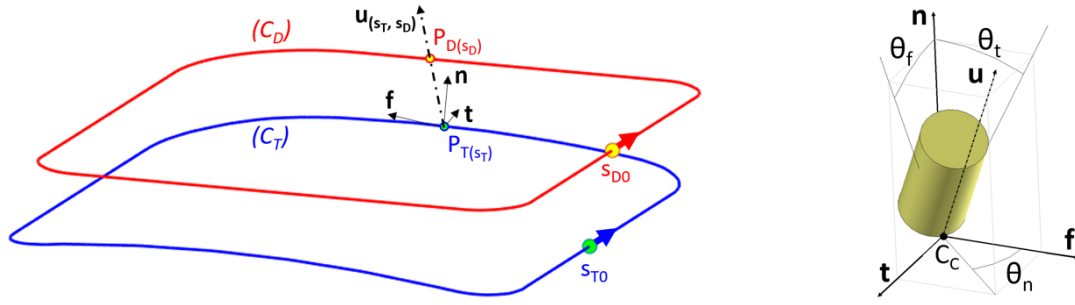


Figure 3 : Paramétrage de l'orientation de l'axe outil

$$\theta_t = \frac{\mathbf{u}_{(s_T, s_D)} \cdot \mathbf{f}}{|\mathbf{u}_{(s_T, s_D)} \cdot \mathbf{f}|} \cdot \arccos \left(\frac{[\mathbf{u}_{(s_T, s_D)} - (\mathbf{u}_{(s_T, s_D)} \cdot \mathbf{t}) \cdot \mathbf{t}] \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{u}_{(s_T, s_D)} - (\mathbf{u}_{(s_T, s_D)} \cdot \mathbf{t}) \cdot \mathbf{t}\|} \right) \quad (1)$$

5 Optimisation de la synchronisation des courbes guides

L'évolution linéaire des abscisses curvilignes proposée par la synchronisation paramétrique uniforme n'est pas suffisante pour contrôler l'évolution de l'orientation de l'outil. Un modèle plus fin doit donc être utilisé pour contrôler plus précisément l'évolution des paramètres curvilignes s_T et s_D . Cette évolution est caractérisée par les fonctions de répartition g_T et g_D (Equ.2). Ces fonctions sont choisies cubiques car la possibilité de présence d'un point d'inflexion permet de limiter l'évolution sur l'une des courbes par rapport à l'autre pour ajuster l'orientation. Aussi, tous les couples (s_T, s_D) qui permettent de calculer l'orientation de l'outil peuvent être obtenus par la seule détermination de 8 paramètres : 4 coefficients $c_{T,i}$ et 4 coefficients $c_{D,i}$ ($i \in \llbracket 0,3 \rrbracket$).

$$\forall s \in [0,1], \begin{cases} s_T = g_T(s) = \sum_{i=0}^{n_T=3} c_{T,i} \cdot s^i \\ s_D = g_D(s) = \sum_{i=0}^{n_D=3} c_{D,i} \cdot s^i \end{cases} \quad (2)$$

Le premier objectif considéré dans la recherche de ces 8 coefficients est le maintien de l'orientation de l'outil dans une plage angulaire $[\theta_{tmin}, \theta_{tmax}]$ définie en fonction des conditions d'usinage souhaitées (Figure 4a). Par exemple, un usinage à θ_t strictement négatif ou strictement positif évite les transitions entre usinage en poussant et en tirant le long de la trajectoire. La longueur parcourue par l'outil hors limites L_{HL} est exprimée en Equ.3, où H prend la valeur 1 quand l'orientation de l'outil est hors limites, ou 0 dans le cas contraire (Equ.4). Le respect d'une plage angulaire aurait pu être considéré comme une contrainte, mais sa formulation en tant qu'objectif permet de garder la possibilité de trouver un compromis, au risque de sortir localement de l'intervalle pour garantir la convergence de la solution d'optimisation.

$$L_{HL} = \int_s \left| \theta_{t(s)} - \frac{\theta_{tmax} + \theta_{tmin}}{2} \right| \cdot H(s) ds \quad (3)$$

$$H(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } \left| \theta_{t(s)} - \frac{\theta_{tmax} + \theta_{tmin}}{2} \right| \geq \frac{\theta_{tmax} - \theta_{tmin}}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4)$$

Le respect strict d'une plage angulaire de fonctionnement peut mener à des variations angulaires risquant d'altérer les performances cinématiques des axes de la machine lors du parcours de la trajectoire. La somme quadratique des variations angulaires le long de l'abscisse curviligne (Figure 4b) est alors utilisée pour quantifier l'erreur de fluidité E_f (Equ.5).

$$E_f = \int_s \left| \frac{\partial \theta_t}{\partial s}(s) \right|^2 ds \quad (5)$$

Bien qu'une plage angulaire soit spécifiée, un contrôle plus précis de l'angle de tangage le long de la trajectoire peut être souhaité (Figure 4c). La somme quadratique des écarts à un angle objectif θ_{tobj} est exprimée comme erreur de tangage E_t (Equ.6).

$$E_t = \int_s |\theta_{tobj} - \theta_{t(s)}|^2 ds \quad (6)$$

La fonction objectif globale F_{obj} du problème d'optimisation est finalement la somme pondérée par les poids de bornes β , fluidité φ , et tangage τ qui permettent de privilégier ou non les objectifs présentés (Equ.7).

$$F_{obj} = \beta \cdot L_{HL} + \varphi \cdot E_f + \tau \cdot E_t \quad (7)$$

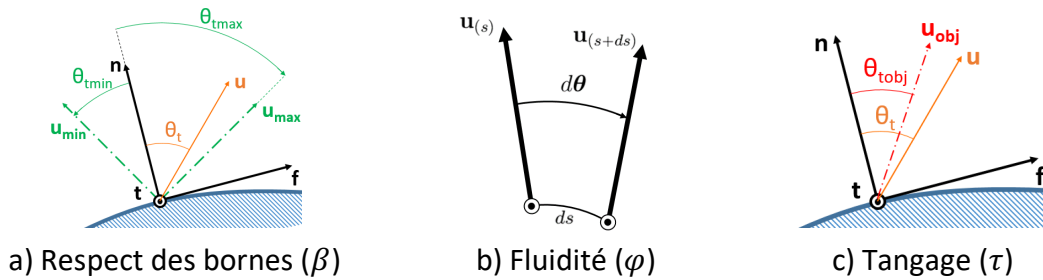


Figure 4 : Objectifs d'optimisation

La synchronisation est donc définie par les 8 coefficients $c_{T,i}$ et $c_{D,i}$ ($i \in \llbracket 0,3 \rrbracket$) qui minimisent la fonction objectif sous des contraintes géométriques qui assurent le parcours de la trajectoire totale. En effet l'évolution des abscisses curvilignes sur chaque courbe doit être croissante, et ne jamais être constante simultanément sur les 2 courbes, pour assurer que l'outil avance toujours sur la trajectoire (Equ.8). Il est aussi important que la plage d'abscisses obtenue permette de parcourir au minimum la totalité des courbes guides depuis le point d'entrée en matière fixé (Equ.9).

$$\forall s \in [0,1], \left\{ \begin{array}{l} g_T'(s) \geq 0 \\ g_D'(s) \geq 0 \\ g_T'(s) + g_D'(s) > 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} g_T(1) - g_T(0) \geq 1 \\ g_T(1) - g_T(0) \geq 1 \\ g_T(0) = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

L'exemple d'optimisation présenté en Figure 5 illustre une optimisation sur 3 objectifs ($\beta = 15$, $\varphi = 1.2$, $\tau = 1$) avec prédominance du respect de la plage de fonctionnement $[0^\circ, 30^\circ]$. Les coefficients trouvés donnent une nouvelle répartition des abscisses curvilignes s_T et s_D qui permet de rester dans la plage angulaire choisie.

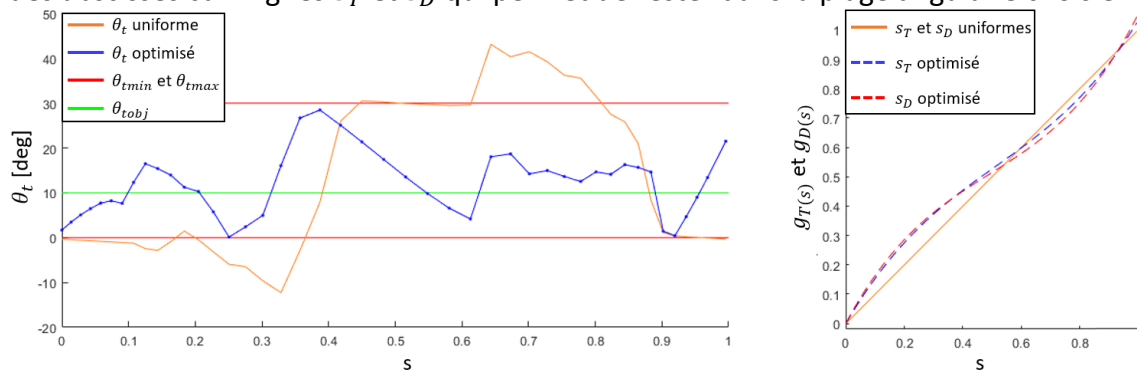


Figure 5 : Exemple d'optimisation multi objectifs

6 Application à l'ébauche d'une poche

La stratégie d'optimisation des orientations d'axes outil a été appliquée sur les trajectoires d'un niveau axial complet d'ébauche d'une poche présentant de larges zones en contre dépouille (Figure 6) avec différentes pondérations :

- $\beta = 0$, $\varphi = 0$: pas d'optimisation, synchronisation paramétrique uniforme ;
- $\beta = 0$, $\varphi = 1$: optimisation de la fluidité des axes de la machine ;
- $\beta = 1$, $\varphi = 0$: respect de la plage $[-30^\circ, 0^\circ]$;
- $\beta = 10$, $\varphi = 5$: respect de la plage $[-45^\circ, 0^\circ]$ avec optimisation de fluidité.

Les plages angulaires des 2 derniers essais assurent un angle négatif afin de limiter la flexion de l'outil (Gilles, 2007), et donc les vibrations de l'ensemble composé de l'outil, du porte-outil, et de la broche. L'optimisation de l'angle de tangage n'est pas présentée ici car l'angle optimal de tangage n'est pas connu pour l'outil et le matériau utilisés.

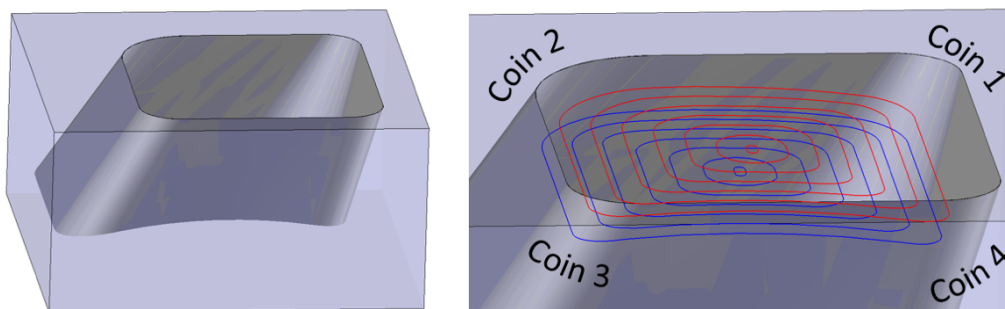


Figure 6 : Poche test et courbes guides sur un niveau axial

La minimisation est opérée en utilisant l'*Optimization Toolbox™* de *Matlab®*, qui propose, entre autres, une minimisation par algorithme SQP (*Sequential Quadratic Programming*). Cet algorithme permet de résoudre des optimisations sous contraintes non linéaires et se montre particulièrement efficace dans les calculs d'optimisation de trajectoires (Gill, 2005). Itérant par descente locale, le résultat montre une dépendance forte au choix de la solution initiale. Dans cette application, la solution initiale choisie correspond à la synchronisation paramétrique uniforme où tous les coefficients sont nuls exceptés ceux d'ordre 1 qui sont fixés à 1 ($g_{t(s)} = g_{D(s)} = s$).

A partir des orientations obtenues pour chaque combinaison, les trajectoires ont été simulées avec le logiciel de CFAO TopSolid'Cam puis usinées sur un centre d'usinage 5 axes Mikron UCP710 (structure RRTTT) dans un bloc en aluminium avec un outil torique FRAISA AluSpeed C5275.450 (diamètre $D = 10 \text{ mm}$, rayon de coin $r_c = 1,5 \text{ mm}$, longueur de coupe $L_c = 11 \text{ mm}$, nombre de dents $Z = 2$) dans les conditions de coupe conseillées par FRAISA pour le rainurage. Les engagements axiaux et radiaux maxima ont été fixés respectivement à 4 mm et $4,5 \text{ mm}$. L'avance à la dent est fixée à $f_z = 0.08 \text{ mm}$, la vitesse de rotation de la broche à $N = 15000 \text{ tr/min}$ et la vitesse d'avance à $F = 2400 \text{ mm/min}$.

La broche est instrumentée avec 2 accéléromètres *National Instruments*, positionnés respectivement dans les directions X et Y , afin d'observer l'évolution des phénomènes vibratoires (Figure 7). Les résultats de mesure des temps d'usinage et de vibrations lors de la passe la plus contraignante (la dernière passe sur le flanc de la poche) sont présentés dans le Tableau 1.



Figure 7 : Instrumentation de la broche et conséquences des vibrations dans les coins

Objectif	Pondération			Amplitude max. vibrations de broche [m/s^2]	Temps d'usinage [s]	Gain de temps (%)
	β	φ	τ			
Uniforme	0	0	0	1426	14.5	0
Fluidité	0	1	0	1672	11.4	+21.4
Bornes	1	0	0	569	17.9	-23.4
Mixte	10	5	0	1181	16.1	-11.0

Tableau 1 : Mesures de vibrations et temps d'usinage sur une passe

Les figures 8 à 10 présentent l'évolution de θ_t , de la vitesse d'avance mesurée F , et de l'amplitude des vibrations de la broche sur X et Y en fonction du temps. La

stratégie uniforme présente de nombreuses zones de vibrations, principalement au passage des coins, où les variations de θ_t sont les plus importantes (Figure 8).

L'optimisation de la fluidité, en plus de présenter une réduction de plus de 20 % du temps d'usinage pour une longueur de trajet identique, met en évidence le fait que les vibrations sont déclenchées aux voisinages des changements de signe de θ_t , et pas forcément dans les coins (Figure 9), d'où l'intérêt de maîtriser la plage angulaire de fonctionnement de l'outil.

L'optimisation par respect d'une plage préférentielle de fonctionnement négative permet de réduire les effets vibratoires le long de la passe (Figure 10), mais rallonge le temps d'usinage. De fait, les axes sont plus sollicités afin de maintenir une orientation dans les bornes indiquées, ce qui se traduit par une perte de fluidité lors du parcours de l'outil et par conséquent une perte de temps. Une combinaison des poids β et φ permet alors de réduire les vibrations en atténuant l'influence sur le temps d'usinage (Figure 11). Une recherche empirique des pondérations idéales devrait donc permettre de trouver un bon compromis entre performance cinématique des axes de la machine et réduction des effets vibratoires.

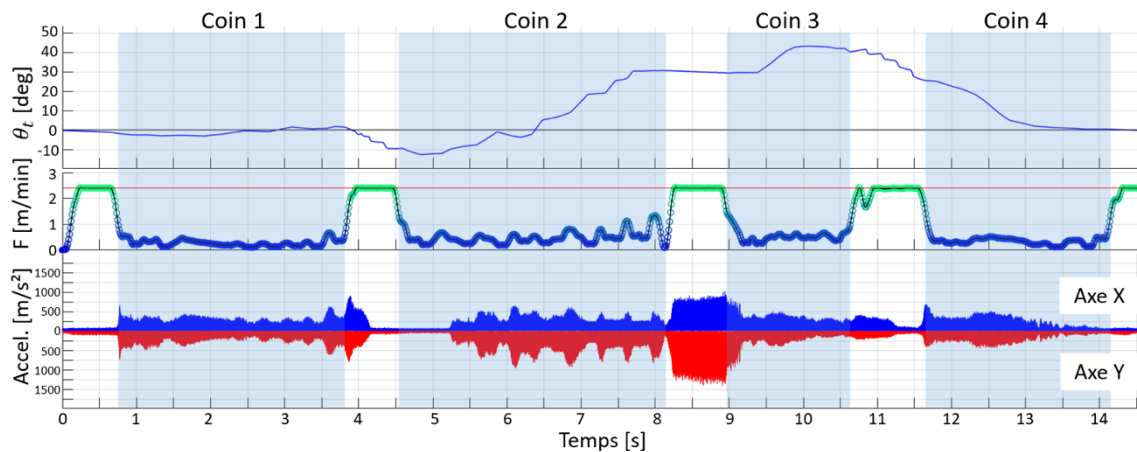


Figure 8 : Résultats de mesure après usinage (synchronisation uniforme)

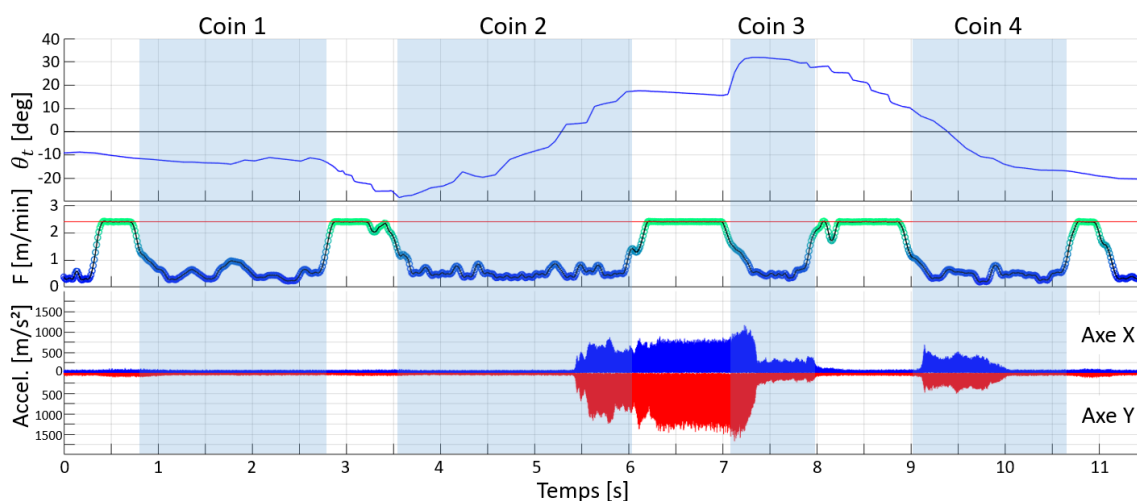


Figure 9 : Résultats de mesure après usinage (optimisation de fluidité)

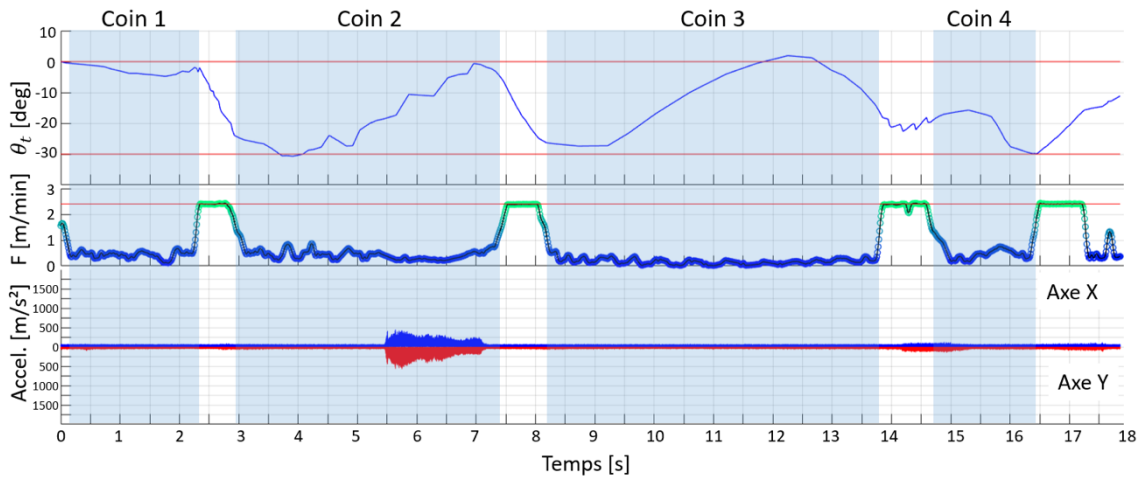


Figure 10 : Résultats de mesure après usinage (optimisation de bornes)

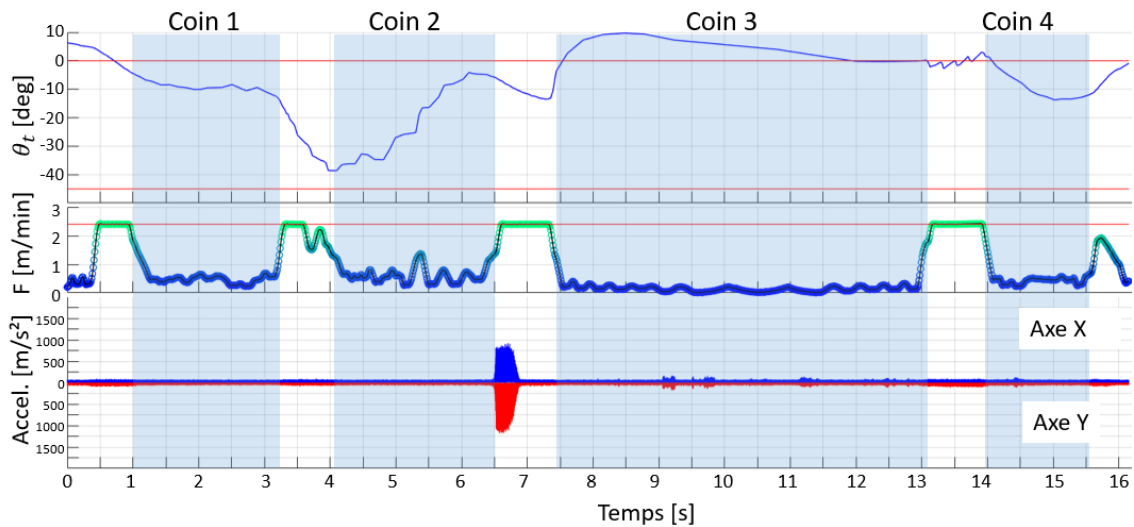


Figure 11 : Résultats de mesure après usinage (optimisation mixte)

7 Conclusions

La maîtrise de l'orientation de l'outil est primordiale lors du parcours de trajectoires pour l'ébauche 5 axes de poches, où les engagements de l'outil dans la matière sont importants. Une stratégie est donc proposée pour contraindre l'orientation de l'outil tout le long de la trajectoire concernée. Des courbes guides sont d'abord utilisées pour imposer l'orientation de l'outil dans le plan orthogonal à l'avance en respectant au maximum la géométrie des surfaces de flanc. Ensuite une optimisation à 3 objectifs permet de contraindre l'orientation de l'outil par rapport à la surface usinée en bout d'outil. Il est alors possible de limiter les vibrations au cours de l'ébauche et/ou de diminuer les temps d'usinage par un choix empirique des poids à affecter à chacun des objectifs d'optimisation.

Une perspective intéressante à ces travaux serait de trouver un moyen de définir automatiquement les valeurs des coefficients de pondération des objectifs d'optimisation en fonction du couple outil-matière mis en jeu par le cas d'usinage, évitant ainsi une recherche empirique et chronophage de ces paramètres dans un contexte industriel. Pour cela, des essais dans différents matériaux seraient enrichissants.

Remerciements

Ces travaux de recherche sont menés dans le cadre du partenariat « CAMLAB » entre TopSolid et le LURPA de l'École normale supérieure Paris-Saclay. Ils s'inscrivent dans les activités du groupe de travail national « Manufacturing 21 ».

Références

- X. Beudaert, S. Lavernhe, and C. Tournier. 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities. *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, 73:9-16, 2013.
- C. Castagnetti, E. Duc, and P. Ray. The domain of admissible orientation concept: A new method for five-axis tool path optimisation. *Computer-Aided Design*, 40(9):938-950, 2008.
- L. Chen, K. Xu, and K. Tang. Collision-free tool orientation optimization in five-axis machining of bladed disk. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(4):197-205, 2015.
- J. P. Davim. *Machining of complex sculptured surfaces*. Springer, 2012.
- P. E. Gill, W. Murray, and M. A. Saunders. SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization. *SIAM Review*, 47(1), 99-131, 2005.
- P. Gilles, F. Monies, W. Rubio. Optimum orientation of a torus milling cutter: Method to balance the transversal cutting force. *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, 47(15):2263-2272, 2007.
- C. -S. Jun, K. Cha, and Y. -S. Lee. Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration-space search method. *Computer-Aided Design*, 35(6):549-566, 2003.
- B. Jousselin, Y. Quinsat, and C. Tournier. A 5-axis pocket roughing strategy reducing the remaining material volume. *Procedia CIRP*, 82:368-373, 2019.
- L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J.A. Sánchez, and M.A. Salgado. Toolpath selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surfaces milling *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, 47(2):388-400, 2007.
- D. Prat, G. Fromentin, G. Poulachon, and E. Duc. Experimental Analysis and Geometrical Modelling of Cutting Conditions Effect in 5 Axis Milling with Ti6Al4V Alloy. In *5th CIRP Conference on High Performance Cutting*, 1:84-89, Switzerland, June 2012.
- P. -Y. Pechard, C. Tournier, C. Lartigue, J. -P. Lugarini. Geometrical deviations versus smoothness in 5-axis high-speed flank milling *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, 49(6):454-461, 2009.
- Y. Sun, Y. Bao, K. Kang, and D. Guo. A cutter orientation modification method for five-axis ball-end machining with kinematic constraints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67(9-12):2863-2874, 2013.