

Choix de l'orientation outil en usinage 5 axes positionnés à partir de polytopes de jerk

Laureen Grandguillaume

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France
laureen.grandguillaume@ens-paris-saclay.fr

Sylvain Lavernhe

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France
sylvain.lavernhe@ens-paris-saclay.fr

Christophe Tournier

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France
christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr

Résumé— *En usinage 5 axes, l'orientation et la position initiale de l'outil sont généralement choisies grâce à l'expérience de l'opérateur. Ces choix sont souvent réalisés dans le but d'éviter les collisions mais sont rarement fonction des caractéristiques cinématiques de la machine-outil. Cet article propose une méthode pour choisir l'orientation relative outil/pièce en 5 axes positionnés en fonction des limites cinématiques de chaque axe. L'objectif est de pouvoir faciliter la programmation de la trajectoire en utilisant un formalisme générique associé à une représentation graphique. La méthode proposée est basée sur les polytopes de manipulabilité cinématique issus de la robotique. Les limites cinématiques dans l'espace articulaire sont modélisables par des polytopes et leurs images dans l'espace des tâches forment d'autres polytopes dont la forme et l'orientation dépendent de la position articulaire. Il est ainsi possible de déterminer la position articulaire, c'est-à-dire l'orientation de l'outil pour un point donné d'une pièce, qui permet de tirer avantage des combinaisons des différents mouvements. Des tests ont été menés pour montrer l'intérêt de l'utilisation des polytopes mais aussi leurs limites dans le choix de l'orientation de l'outil en 5 axes positionnés. L'objectif à terme est d'utiliser ces polytopes pour définir des trajectoires 5 axes continues.*

Mots-clés— *Trajectoire 5 axes, Usinage Grande Vitesse, Manipulabilité, Polytope, Posage*

I. INTRODUCTION

Le développement de l'usinage 5 axes a permis de réduire le nombre de posage nécessaire pour usiner une pièce [1]. Des méthodes ont été développées pour obtenir un posage unique [2], tout en évitant les collisions [3]. Le choix du posage est ainsi un paramètre important.

Dans la littérature, les critères liés à ce choix sont principalement associés aux écarts géométriques et au temps d'usinage, en particulier en tenant compte des effets cinématiques.

Concernant les écarts géométriques, Anotaipaiboon montre que le posage de la pièce et la longueur de l'outil ont une influence suivant les architectures machine. Le posage optimal est déterminé en trouvant la position qui minimise les erreurs causées par les transformations cinématiques [4]. Makhanov

propose un posage qui réduit la variation angulaire de l'axe outil le long de la trajectoire [5].

Concernant le temps d'usinage, Pessoles propose de choisir le posage dans le but de réduire la distance parcourue par les axes de rotation [6]. En effet, il se base sur le principe que les axes de rotations limitent souvent la vitesse d'avance. Castagnetti construit des trajectoires d'usinage 5 axes qui tendent à réduire les sollicitations des axes de rotation [7]. Cependant, cette étude tient compte de la géométrie à usiner mais pas de la cinématique de la machine-outil. Les sollicitations des axes nécessaires au suivi de trajectoires multi-axes peuvent souvent dépasser les capacités cinématiques de chaque axe, entraînant une diminution de la vitesse relative outil/pièce. De plus, il est important de prendre en compte ces caractéristiques car elles sont très différentes entre les axes d'une même machine, mais aussi potentiellement entre deux machines.

Hu prend en compte ces aspects cinématiques au niveau de l'accélération en choisissant le posage qui permet de réduire les accélérations des axes de rotation [3]. Néanmoins les accélérations des axes de rotations ne sont pas nécessairement les paramètres limitant la vitesse d'avance. Parmi les différentes méthodes de génération de trajectoire 5 axes, la prise en compte des critères cinématiques intervient dans quelques travaux. Sencer propose d'estimer la vitesse d'avance en se basant sur les contraintes cinématiques de la machine [8]. Sun propose également de tenir compte des contraintes cinématiques pour évaluer la vitesse d'avance [9]. Pateloup définit des trajectoires hors matière basés sur les capacités cinématiques dans le but de gagner du temps d'usinage [10]. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de modifier la trajectoire, en particulier l'orientation de l'outil afin d'augmenter la vitesse relative outil/pièce en considérant l'architecture de la machine et ses capacités cinématiques sur chaque axe.

En résumé, la plupart des critères choisis dans la littérature est basée sur des à-priori, choisissant l'accélération ou la distance parcourue par les axes de rotation comme paramètres limitant. Il est ainsi nécessaire de mettre en place un formalisme permettant de prendre en compte ces caractéristiques dans la génération de trajectoire 5 axes.

L'objectif de cet article est de proposer une méthode définissant l'orientation de l'outil dans le cadre de l'usinage 5 axes positionnés. La méthode s'adresse particulièrement à l'usinage de pièces avec une faible variation de courbure. Le but est de tirer profit des combinaisons cinématiques des différents axes de la machine pour augmenter la vitesse relative outil/pièce. La méthode proposée dans cet article est basée sur les polytopes de manipulabilité cinématique issus de la robotique [11] [12], en particulier sur les polytopes de jerk. En effet, l'état de l'art permet de dire que le jerk est le niveau cinématique le plus limitant au cours de l'usinage [13], hypothèse qui s'est vu validée par les travaux précédents [14]. Cette étude propose ainsi de modéliser les limites en jerk de chaque axe de la machine dans l'espace articulaire afin de trouver l'orientation de l'axe de l'outil qui permet d'augmenter le jerk tangentiel dans l'espace des tâches.

La suite de cet article se focalise sur le cas de l'usinage 5 axes positionnés et s'articule de la façon suivante : la seconde partie définit les polytopes de jerk dans l'espace articulaire et leurs images dans l'espace des tâches. La troisième partie explique le principe du choix de l'orientation de l'outil à partir des polytopes définis dans la seconde partie. La dernière partie est consacrée à la réalisation d'essais sur centres d'usinage et montre l'intérêt de la méthode mais également ses limites dans le cas de l'usinage 5 axes positionnés.

II. POLYTOPES DE MANIPULABILITE CINEMATIQUE

A. Polytope de jerk dans l'espace articulaire

Les centres d'usinage sont réglés lors de l'intégration de la commande numérique ou lors de leur utilisation spécifique en fonction de leur architecture mécanique, de leur comportement cinématique et dynamique afin d'éviter des phénomènes vibratoires et de respecter les caractéristiques des composants mécaniques (moteurs, transmissions...). La limitation de ces vibrations permet d'obtenir la qualité désirée pour les pièces usinées. Techniquement, ce sont les couples moteurs qui sont limités dans le but d'éliminer les mouvements saccadés [15]. Ainsi la vitesse (\dot{q}_i), l'accélération (\ddot{q}_i) et en particulier le jerk (\dddot{q}_i) de chacun des axes q_i sont bornés (équation (1)).

$$\text{éq. (1): } \ddot{q}_i^{\min} \leq \ddot{q}_i \leq \ddot{q}_i^{\max}$$

L'équation (1) correspond à la définition d'un polytope par des hyperplans dans l'espace articulaire. Les limites en jerk de chaque axe sont résumées dans le Tableau (1).

| | X_m | Y_m | Z_m | J_{\tan} | A | C |
|--|-------|-------|-------|------------|---|----|
| J_{\max} (m/s ³ - tr/s ³) | 5 | 5 | 5 | 100 | 5 | 50 |

Tableau 1. LIMITES EN JERK DES AXES DU CENTRE MIKRON UCP710

La Figure (1) montre un schéma du centre d'usinage 5 axes Mikron UCP710 de structure $[w C' A' b X_m Y Z_m (CI) t]$ selon la norme ISO1079 et le polytope 3D correspondant.

La trajectoire de l'outil est usuellement définie dans l'espace des tâches, i.e. dans un repère associé à la pièce. Il est donc nécessaire d'étudier l'effet des limites cinématiques articulaires sur le mouvement outil/pièce lors de l'exécution.

Cette analyse est possible en transférant le polytope cinématique de l'espace articulaire vers l'espace des tâches.

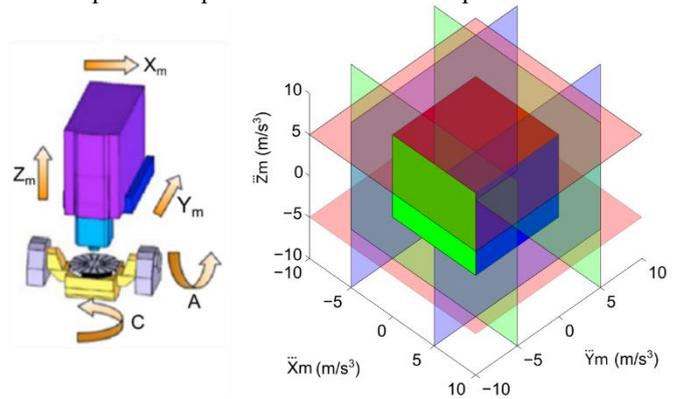


Figure 1. CENTRE D'USINAGE MIKRON UCP 710 ET LE POLYTOPE 3D ASSOCIE

B. Polytope de jerk dans l'espace des tâches

Pour le centre d'usinage étudié, l'espace articulaire q est défini par les 5 composantes (X_m, Y_m, Z_m, A, C). Dans l'espace des tâches, la trajectoire de l'outil X est décrite par 6 composantes : 3 pour la position du point piloté de l'outil (X_p, Y_p, Z_p) et 3 pour les projections de la direction de l'axe outil dans la base pièce (i, j, k). Le modèle cinématique direct permet de décrire l'évolution des vitesses \dot{X} dans l'espace des tâches (dimension 6) en fonction de l'évolution des vitesses articulaires \dot{q} (dimension 5) (équation (2)).

$$\text{éq. (2): } \dot{X} = J(q) \cdot \dot{q} \text{ avec } J(q) = \frac{\partial X}{\partial q}$$

où $J(q)$ représente la matrice Jacobienne de dimension (6x5) du système poly-articulé. Elle est fonction de la configuration articulaire q .

Le modèle cinématique du troisième ordre, correspondant à un niveau cinématique de jerk, est obtenu en dérivant deux fois le modèle cinématique du premier ordre (équation (3)).

$$\text{éq. (3): } \ddot{X} = J(q) \cdot \ddot{q} + 2 \cdot \dot{J}(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + \ddot{J}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \cdot \dot{q}$$

Dans le cas de cet article, ces termes ne seront pas considérés puisque l'orientation de l'outil recherchée est constante par passe. En effet, les matrices $\dot{J}(q, \dot{q})$ et $\ddot{J}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ sont nulles en 5 axes positionnés. Ces dérivées font intervenir dans chaque terme les dérivées des axes de rotation (\dot{A}, \dot{C}) et (\ddot{A}, \ddot{C}), termes nulles en 5 axes positionnés puisqu'il n'y a pas de variations de A et C. Le passage de l'espace articulaire à l'espace des tâches est donc une application linéaire pour une configuration articulaire donnée. Dans le cas de l'usinage en 5 axes positionnés ($\dot{A} = \dot{C} = 0$), le polytope de jerk dans l'espace articulaire est de dimension 3 et son image dans l'espace des tâches est également de dimension 3. La forme du polytope de jerk dans l'espace des tâches reste la même que dans l'espace articulaire mais son orientation évolue en fonction de A et C. La Figure (2) montre l'influence de la position des axes de rotations A et C sur l'orientation du polytope dans l'espace des tâches.

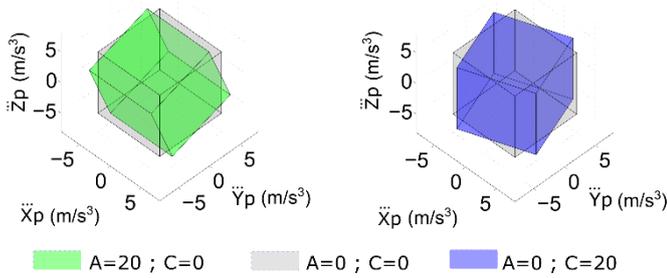


Figure 2. INFLUENCE DE A ET C SUR LE POLYTOPE DE JERK DANS L'ESPACE DES TÂCHES EN USINAGE 5 AXES POSITIONNÉS

Après avoir défini les polytopes de jerk d'un centre d'usinage multiaxes en usinage 5 axes positionnés la partie suivante décrit la méthode proposée pour calculer l'orientation de l'outil par passe qui permet d'augmenter la vitesse relative outil/pièce et potentiellement de diminuer le temps d'usinage.

III. CHOIX DE L'ORIENTATION OUTIL/PIECE BASE SUR LES POLYTOPES DE JERK EN USINAGE 5 AXES POSITIONNÉS

A. Paramètre limitant la vitesse relative outil/pièce

La vitesse relative outil/pièce caractérise les performances de la trajectoire utilisée et donne une image de la qualité de la surface au sens du respect des conditions de coupe programmées. Pour une même distance parcourue, plus la vitesse relative outil/pièce est élevée, plus le temps d'usinage est faible. La vitesse relative outil/pièce est limitée la plupart du temps par les caractéristiques cinématiques en jerk de chacun des axes de la machine. La norme du jerk permet de caractériser les déplacements du point piloté de l'outil dans l'espace des tâches (Equation (4)).

$$\text{éq. (4): } \|\ddot{\mathbf{X}}\| = \sqrt{\ddot{X}_p^2 + \ddot{Y}_p^2 + \ddot{Z}_p^2}$$

L'intérêt du polytope exprimé dans l'espace des tâches est de pouvoir évaluer directement la valeur de ce jerk en fonction de la direction locale de la trajectoire. Le jerk dans l'espace des tâches se décompose en fonction de la direction d'avance, vecteur unitaire $\mathbf{f} = \frac{d\mathbf{X}}{ds}$, et de la dérivée première et seconde de \mathbf{f} (Equation (5)) où s désigne l'abscisse curviligne le long de la trajectoire.

$$\text{éq. (5): } \ddot{\mathbf{X}} = \ddot{s} \cdot \mathbf{f} + \dot{s} \cdot \frac{d\mathbf{f}}{ds} + s^3 \cdot \frac{d^2\mathbf{f}}{ds^2}$$

En considérant une étude locale pour choisir l'orientation, les termes $\frac{d\mathbf{f}}{ds}$ et $\frac{d^2\mathbf{f}}{ds^2}$ ne sont pas considérés. Le jerk tangentiel correspond à l'évaluation de $\ddot{\mathbf{X}}$ dans la direction d'avance \mathbf{f} . En faisant l'hypothèse que le jerk tangentiel résulte du maximum des capacités des axes de la machine, alors le jerk tangentiel peut prendre toutes les valeurs correspondant à l'enveloppe du polytope de jerk. Pour que cette hypothèse soit valide, il faut s'assurer que le paramètre de jerk tangentiel défini dans la Commande Numérique soit supérieur à la valeur maximale de jerk tangentiel défini par le maximum des capacités des axes de la machine (Tableau (1)). L'objectif est donc d'orienter le polytope dans l'espace des tâches pour que la norme de l'intersection entre le polytope et la direction d'avance \mathbf{f} le long de la trajectoire soit maximale. La Figure (3) montre que suivant

A et C l'intersection avec le polytope donne une valeur de \ddot{s} différente.

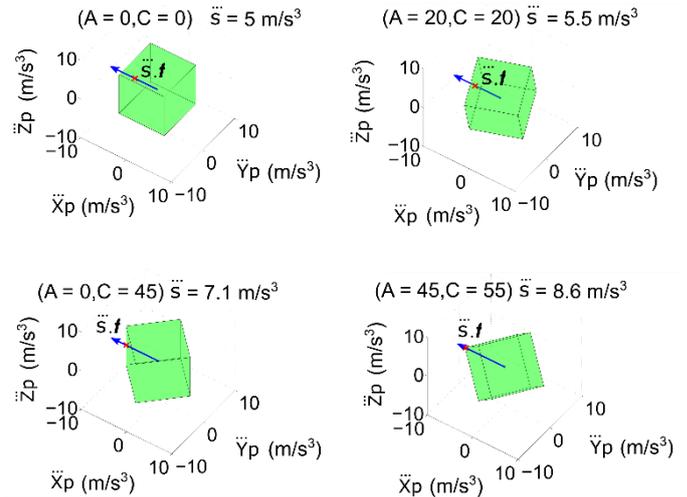


Figure 3. INFLUENCE DE LA DIRECTION D'ÉVALUATION SUR \ddot{s}

B. Principe de la méthode proposée

L'objectif est de trouver l'orientation A et C maximisant le long de la passe le jerk tangentiel dans la direction imposée par la trajectoire \mathbf{f} . La valeur maximale du jerk tangentiel est donnée par la distance maximale dans l'espace des tâches de l'origine à la surface du polytope. Etant donné que le polytope est convexe, le jerk maximum sera atteint sur un de ses sommets, correspondant à l'intersection de limites articulaires. Ainsi, à partir du modèle cinématique de l'Equation (3) (avec $\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ et $\ddot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ nulles (5 axes positionnés)), le problème posé revient à résoudre le système défini par l'Equation (6) pour trouver les positions articulaires A et C solutions, c'est-à-dire l'orientation de l'axe outil par rapport à la pièce.

$$\text{éq. (6): } \ddot{s} \cdot \mathbf{f} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}}$$

- où :
- \mathbf{f} est le vecteur tangent unitaire
 - $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ est la matrice Jacobienne de la machine
 - $\ddot{\mathbf{q}}$ définit les sommets du polytope de jerk.

Le polytope ne se déforme pas entre l'espace articulaire et l'espace des tâches, ainsi $\ddot{s} = \|\ddot{\mathbf{q}}\|$, en particulier aux sommets du polytope. Pour une architecture 5 axes de type RRTTT, le système à résoudre est donné par l'Equation (7).

éq. (7):

$$\begin{cases} \ddot{s} \cdot f_x = \cos(C) \cdot \ddot{q}_x - \cos(A) \cdot \sin(C) \cdot \ddot{q}_y + \sin(A) \cdot \sin(C) \cdot \ddot{q}_z \\ \ddot{s} \cdot f_y = \sin(C) \cdot \ddot{q}_x + \cos(A) \cdot \cos(C) \cdot \ddot{q}_y - \sin(A) \cdot \cos(C) \cdot \ddot{q}_z \\ \ddot{s} \cdot f_z = \sin(A) \cdot \ddot{q}_y + \cos(A) \cdot \ddot{q}_z \end{cases}$$

La troisième équation de ce système ne dépendant que de A, il est possible de trouver sa valeur et d'en déduire celle de C avec les deux premières équations du système. Ainsi, les orientations qui maximisent le jerk tangentiel localement le long de la trajectoire se déterminent de manière explicite.

Le polytope dans l'espace articulaire a 8 sommets, il y a donc 8 couples solutions (A,C) en chaque point de la trajectoire. La

Figure (4) montre un exemple des 8 solutions obtenues pour une direction imposée $\mathbf{f} = (-1 \ 0 \ 0)^T$.

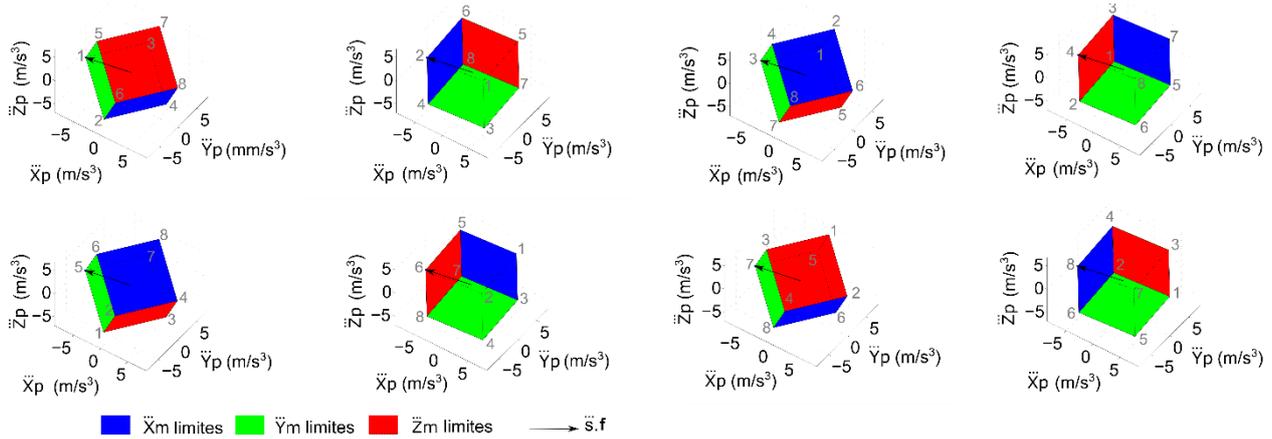


Figure 4. EXEMPLE DES 8 SOLUTIONS OBTENUES POUR A ET C CORRESPONDANT AUX 8 SOMMETS DU POLYTOPE

Les capacités en jerk suivant les axes X_m , Y_m , et Z_m sont les mêmes dans notre cas, les solutions obtenues sont donc symétriques. Le choix de la solution retenue est déterminé par les courses de la machine. De plus, le but est d'avoir des valeurs de (A,C) minimales et qui garantissent de bonnes conditions de coupe (effet non étudié dans cet article).

En résumé, la méthode proposée consiste à venir orienter le polytope de jerk dans l'espace des tâches pour que, localement, la direction d'avance \mathbf{f} intersecte avec l'un des sommets du polytope de jerk. Le choix de A et C donne ainsi des capacités de jerk tangentiel plus importantes, ce qui permet d'augmenter la vitesse relative outil/pièce. La partie suivante présente les résultats obtenus par cette méthode sur une pièce test.

IV. APPLICATION SUR UNE PIÈCE TEST

A. Pièce test

La pièce test choisie est extraite d'une précédente étude réalisée par Pessoles [6]. Les coordonnées des points de contrôle de la surface sont données par l'Equation (8).

$$\text{éq. (8): } \begin{aligned} P_1 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & P_2 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 0 \end{pmatrix} & P_3 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 40 \\ 10 \end{pmatrix} & P_4 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 60 \\ 10 \end{pmatrix} \\ P_5 &= \begin{pmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & P_6 &= \begin{pmatrix} 20 \\ 20 \\ 0 \end{pmatrix} & P_7 &= \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 10 \end{pmatrix} & P_8 &= \begin{pmatrix} 20 \\ 60 \\ 10 \end{pmatrix} \\ P_9 &= \begin{pmatrix} 40 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} & P_{10} &= \begin{pmatrix} 40 \\ 20 \\ 10 \end{pmatrix} & P_{11} &= \begin{pmatrix} 40 \\ 40 \\ 0 \end{pmatrix} & P_{12} &= \begin{pmatrix} 40 \\ 60 \\ 0 \end{pmatrix} \\ P_{13} &= \begin{pmatrix} 60 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} & P_{14} &= \begin{pmatrix} 60 \\ 20 \\ 10 \end{pmatrix} & P_{15} &= \begin{pmatrix} 60 \\ 40 \\ 0 \end{pmatrix} & P_{16} &= \begin{pmatrix} 60 \\ 60 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

L'usinage est réalisé avec une fraise hémisphérique de diamètre 16 et la stratégie retenue initialement est un usinage par plans parallèles suivant les plans (Y_p, Z_p) . Le choix de l'orientation de l'outil est ainsi libre dans la limite de conditions de coupe acceptables et de non collision. La Figure (5) donne une représentation de la surface.

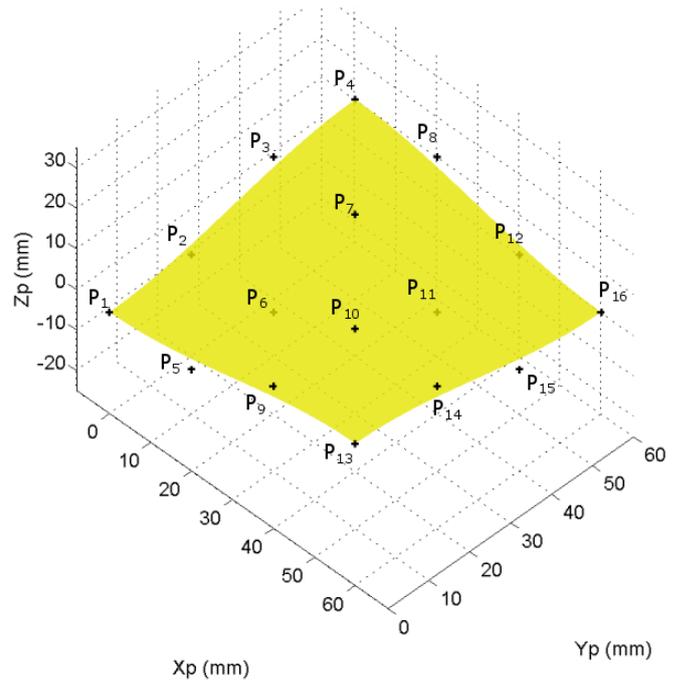


Figure 5. PIÈCE TEST

B. Application de la méthode proposée

La direction d'avance \mathbf{f} évolue le long de chaque passe dans les plans (Y_p, Z_p) , les valeurs de A et C obtenues évoluent donc le long de la passe. Or, l'objectif est de réaliser de l'usinage en 5 axes positionnés, la valeur de A et C solution doit être déterminée pour le $\mathbf{f}_{\text{moyen}}$ le long de la passe. En appliquant la méthode proposée dans la partie III, il suffit de résoudre le système pour trouver A et C qui permet d'orienter l'un des sommets du polytope dans la direction $\mathbf{f}_{\text{moyen}}$. La Figure (6) représente les orientations de l'outil pour 3 passes caractéristiques ($X_p = 0$, $X_p = 15$, $X_p = 30$).

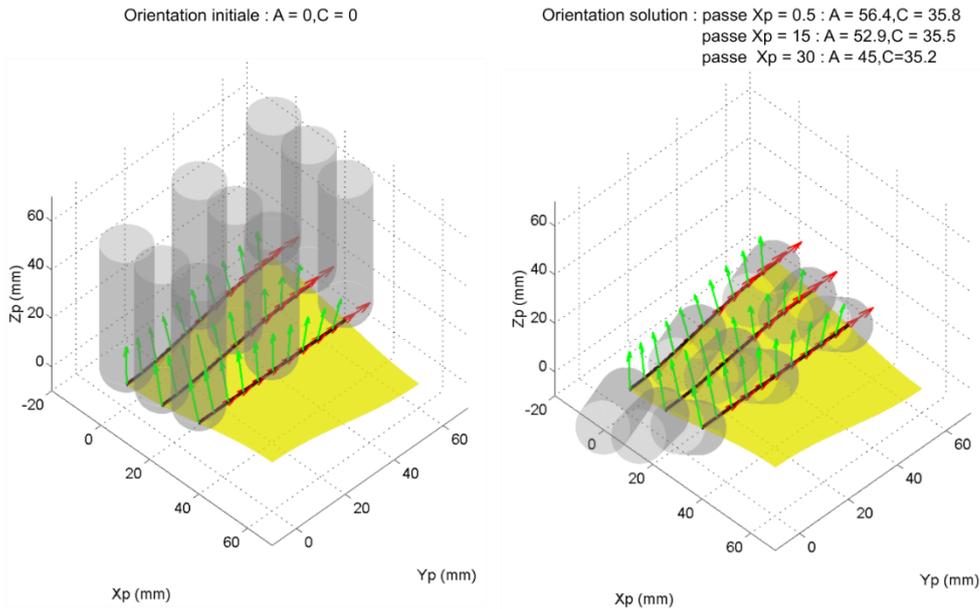


Figure 6. ORIENTATIONS INITIALES ET SOLUTIONS POUR 3 PASSES CARACTERISTIQUES

C. Tests sur le centre d'usinage Mikron UCP710

Afin de ne pas être limité par la taille des segments pendant l'exécution sur la machine, une interpolation polynomiale de degré 5 a été utilisée sur chaque passe. Les coordonnées du point piloté (X_p, Y_p, Z_p) sont décrites pour chaque passe via une fonction polynomiale de degré 5 et les coordonnées A et C sont constantes. Lors de l'exécution de la trajectoire, les valeurs des vitesses des différents axes sont relevées. La Figure (7) montre les vitesses relatives outil/pièce relevées avec une orientation (A,C) nulle et avec l'orientation proposée par notre méthode pour les 3 passes caractéristiques ($X_p = 0, X_p = 15, X_p = 30$).

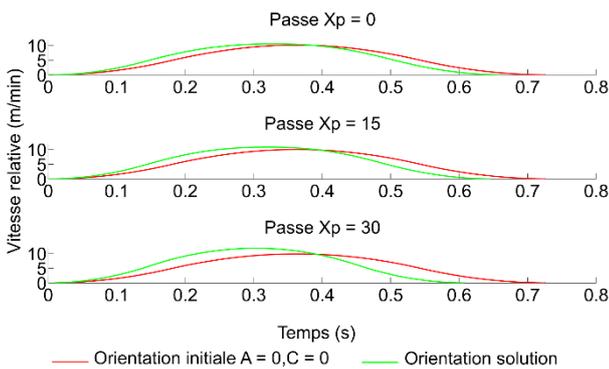


Figure 7. INFLUENCE DE LA DIRECTION D'EVALUATION DU JERK

Le Tableau (2) donne les gains de temps pour différentes passes.

| | $X_p = 0$ | $X_p = 15$ | $X_p = 30$ |
|-------------|-----------|------------|------------|
| Gain | 9% | 11% | 16% |

Tableau 2. GAIN DE TEMPS RELATIF SUIVANT LA PASSE

Le tableau (3) résume les temps d'usinage obtenus pour la pièce complète, avec l'orientation initiale ($A=0, C=0$), avec l'orientation solution obtenue pour chaque passe, et en gardant la même orientation pour toute la pièce. L'orientation retenue pour toute la pièce correspond à la moyenne des orientations de chaque passe.

| | A0 C0 | 5 axes positionnés par passe | 5 axes positionnés pièce complète |
|--------------|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| Temps | 1min43s | 1min45s | 1min35s |

Tableau 3. TEMPS D'USINAGE

La Figure (7) montre que le temps d'usinage sur chaque passe est plus faible avec la nouvelle orientation proposée. En revanche, le Tableau (3) montre qu'il n'y a pas de gain de temps sur la pièce complète. Ceci peut s'expliquer par le temps mis pour changer d'orientation entre chaque passe. Le gain obtenu le long de chaque passe ne permet pas de compenser la perte de temps causée par le changement d'orientation entre chaque passe. En réalisant de l'usinage 5 axes positionnés sur la pièce complète, le gain de temps est d'environ 8%.

D. Limites de la méthode proposée

Le choix de A et C est donné sur une passe pour avoir la direction moyenne (f_{moyen}) qui coïncide avec l'un des sommets du polytope. Cependant f évolue le long de la passe, ce qui veut dire que localement la direction f ne va pas coïncider avec l'un des sommets du polytope (Figure (8)). La valeur du jerk tangentiel n'est donc pas maximale sur toute la passe lorsqu'il y a une variation de f . Sur la passe $X_p = 0$, la variation de f est plus importante que sur la passe $X_p = 30$. Le gain de temps est donc plus important sur la passe $X_p = 30$ (Tableau 2). Cette méthode s'applique donc particulièrement bien aux surfaces avec une variation de f pas trop importante, c'est-à-dire aux surfaces dites « tendues ».

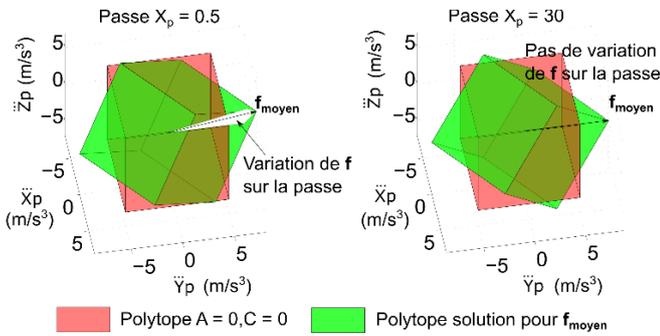


Figure 8. CONSEQUENCES DE LA VARIATION DE F SUR LA PASSE

Le choix de f_{moyen} est ici cohérent car la saturation est uniquement en jerk. Si une saturation en accélération se produisait, il serait préférable de choisir une orientation $f_{initial}$ ou f_{final} pour coïncider avec les instants où le jerk sature.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de cet article est de montrer l'intérêt d'utiliser une approche basée sur les polytopes de manipulabilité cinématique pour faciliter le choix de la programmation de la trajectoire. La méthode proposée consiste à optimiser l'orientation de l'outil dans le cas de l'usinage 5 axes positionnés. Le jerk étant classiquement le paramètre limitant la vitesse relative outil/pièce, l'orientation de l'outil est choisie dans le but de maximiser le jerk tangentiel le long de la trajectoire. Pour cela, il faut trouver l'orientation qui permet de faire coïncider la direction d'avance moyenne le long de la passe avec l'un des sommets du polytope de jerk dans l'espace des tâches. Des essais expérimentaux ont montré que la vitesse relative outil/pièce pouvait être augmentée, en particulier sur des surfaces tendues, c'est-à-dire où la direction d'avance évolue assez peu. L'objectif à terme est de définir des trajectoires continues en 5 axes, que ce soient l'orientation de l'outil ou sa direction de guidage, en se basant sur ces polytopes de manipulabilité cinématique.

Ce travail a été conduit dans le cadre du groupe de travail Manufacturing 21 regroupant 18 laboratoires de recherche français. Les axes étudiés sont : la modélisation des interactions outil/matière, le comportement mécanique des structures articulées, l'usine numérique, les procédés innovants et durables.

VI. REFERENCES

- [1] P. Gupta, R. Janardan, J. Majhi et T. Woo, «Efficient geometric algorithms for workpiece orientation in 4- and 5-axis NC-machining,» *Springer Berlin Heidelberg*, pp. 171–182, 1995.
- [2] D. Dornfeld, M. Helu, M. Mi'radj Isnaini, R. Sato et K. Shirase, «6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014 Workpiece Setup Simulation based on Machinable Space of Five-axis Machining Centers,» *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 257 - 262, 2014.
- [3] P. Hu, K. Tang et C.-H. Lee, «Global obstacle avoidance and minimum workpiece setups in five-axis machining,» *Computer-Aided Design*, vol. 45, pp. 1222 - 1237, 2013.
- [4] W. Anotaipaiboon, S. Makhanov et E. Bohez, «Optimal setup for five-axis machining,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 964 - 977, 2006.
- [5] S. S. Makhanov et M. Munlin, «Optimal sequencing of rotation angles for five-axis machining,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, pp. 41-54, 2007.
- [6] X. Pessoles, Y. Landon, S. Segonds and W. Rubio, "Optimisation of workpiece setup for continuous five-axis milling: Application to a five-axis BC type machining centre," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 67-79, 2012.
- [7] C. Castagnetti, E. Duc et P. Ray, «The Domain of Admissible Orientation concept: A new method for five axis tool path optimisation,» *Computer Aided Design*, vol. 40, pp. 938-950, 2008.
- [8] B. Sencer, Y. Altintas et E. Croft, «Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, pp. 733--745, 2008.
- [9] Y. Sun, Y. Zhao, Y. Bao et D. Guo, «A smooth curve evolution approach to the feedrate planning on five-axis toolpath with geometric and kinematic constraints,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 97, pp. 86--97, 2015.
- [10] S. Pateloup, *Modélisations et aptitudes à l'emploi des machines_outils à structure parallèle : vers une optimisation dirigée du processus*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II., 2011.
- [11] J.-P. Merlet, «Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots,» *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, pp. 199-206, 2005.
- [12] M. T. Rosenstein et R. A. Grupen, «Velocity-dependent dynamic manipulability,» *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002.
- [13] X. Beudaert, S. Lavernhe et C. Tournier, «Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, pp. 73-82, 2012.
- [14] L. Grandguillaume, S. Lavernhe et C. Tournier, «Using kinematic manipulability polytope to optimize 5-axis machining tool path,» chez *Thirteenth International Conference on High Speed Machining*, Metz, 2016.
- [15] M. Vulliez, S. Lavernhe et O. Bruneau, «Dynamic approach of the feedrate interpolation for trajectory planning process in multi-axis machining,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 1-12, 2016.