



HAL
open science

Optimisation en fraisage 5 axes grande vitesse

Christophe Tournier, Sylvain Lavernhe, Claire Lartigue

► **To cite this version:**

Christophe Tournier, Sylvain Lavernhe, Claire Lartigue. Optimisation en fraisage 5 axes grande vitesse. 4th International conference on Integrated Design and Production, Nov 2005, Casablanca, Maroc. hal-01224463

HAL Id: hal-01224463

<https://hal.science/hal-01224463>

Submitted on 4 Nov 2015

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.

Optimisation en fraisage 5 axes grande vitesse

Christophe Tournier¹, Sylvain Lavernhe¹, Claire Lartigue^{1,2}

¹ Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
ENS de Cachan - Université Paris Sud 11
61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex - France

² IUT de Cachan - Université Paris Sud 11
9 Avenue de la division Leclerc, 94234 Cachan Cedex – France

Email : nom@lurpa.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ.

La réalisation des pièces de formes complexes passe par la génération de trajectoires d'usinage, basée sur un modèle CAO, une stratégie d'usinage et une machine outil à commande numérique donnée. Afin d'assurer les meilleures performances possibles en terme de qualité et de productivité, il est nécessaire d'intégrer un maximum de contraintes et de phénomènes lors de la génération des trajets d'usinage. Pour répondre au cas le plus complexe qu'est le fraisage à grande vitesse à 5 axes, nous avons développé un modèle surfacique de représentation des trajectoires d'usinage. Ce modèle permet d'intégrer très en amont lors du calcul des trajectoires les contraintes géométriques de la machine (dépassement des courses sur les 5 axes, position du porte-pièce), cinématiques (vitesses et accélérations sur les 5 axes, passage des singularités), ainsi que les problèmes de collisions avec la partie active de l'outil. Ainsi cet article est consacré à l'optimisation de l'usinage 5 axes grande vitesse des pièces de formes complexes à l'aide du modèle surfacique de représentation des trajectoires. Après avoir explicité le modèle surfacique et son intérêt, nous présentons un exemple d'intégration de la chaîne numérique FAO/Post Processeur/Commande numérique/Machine outil dans la recherche de trajectoires d'usinage assurant une qualité et une productivité maximum. Enfin nous envisageons les futurs développements de notre approche.

MOTS-CLÉS : Chaîne numérique, fraisage 5 axes, surfaces complexes, UGV, post-processeur.

1. Introduction

Le processus de réalisation des pièces de forme complexe par usinage est un processus essentiel dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, des moules et des matrices. La réalisation des pièces de formes complexes passe par la génération de trajectoires d'usinage, basée sur un modèle CAO, une stratégie d'usinage et une machine outil à commande numérique donnée. Ce processus a largement été modifié ces dernières années par l'utilisation de nouvelles techniques comme la maquette numérique, c'est-à-dire la modélisation complète du produit et de son procédé dans un système de CFAO, par l'utilisation de nouveaux formats d'interpolation au niveau du directeur de commande numérique et par l'Usinage à Grande Vitesse (UGV) [Duc 1998].

Chaque étape du processus s'appuie sur sa propre modélisation de la géométrie de la surface, et les modèles de représentation des formes génèrent des approximations dues aux différents traitements associés à la CAO, à la FAO et à la commande dynamique de la trajectoire. Le calcul de la trajectoire de l'outil en FAO s'appuie sur le modèle CAO, une géométrie d'outil, une stratégie d'usinage (une direction d'usinage et des paramètres de discrétisation) et un format de description de la trajectoire. Quel que soit le type d'usinage, à 3 ou à 5 axes, la trajectoire calculée est un ensemble de points caractéristiques de la géométrie de la trajectoire transmis au directeur de commande numérique.

L'utilisation de l'UGV a permis de limiter les opérations de polissage. Cependant, les comportements de la commande numérique et les phénomènes dynamiques en cours d'usinage se trouvent modifiés : difficulté dans le suivi de la trajectoire, difficulté dans le traitement des blocs de petite taille, dans le traitement des changements brusques de direction, comportement vibratoire du système Pièce/Outil/Machine, etc. [Dugas *et al* 2002]. Pour la plupart, ces difficultés sont principalement (mais non exclusivement) liées à l'utilisation du format d'interpolation linéaire [Lartigue *et al* 2004]. Une amélioration sensible est notée par l'utilisation de formats polynomiaux qu'ils soient natifs [Lavernhe *et al* 2004] ou temps réel [Altintas *et al* 2003] [Cheng *et al* 2002].

Au final, la géométrie de la forme usinée résulte du mouvement de l'outil calculé en FAO, modifié par le comportement de la commande numérique et altéré par les phénomènes dynamiques en cours d'usinage.

Aussi, afin d'assurer les meilleures performances possibles en terme de qualité et de productivité, il est nécessaire d'intégrer un maximum de contraintes lors de la génération des trajets d'usinage. Le cas le plus complexe est celui du fraisage à grande vitesse à 5 axes. Si l'usinage à 5 axes offre des avantages par rapport à l'usinage à 3 axes (plus grande accessibilité de l'outil, meilleur état de surface, taux d'enlèvement de matière plus important) les algorithmes de génération de trajectoires sont plus compliqués. Compte tenu des deux degrés de liberté supplémentaires orientant l'axe de l'outil, les méthodes de génération de trajectoires conduisent à des problèmes d'optimisation de l'orientation de l'axe de l'outil de

façon à satisfaire un certain nombre de contraintes. Si de nombreux auteurs se sont intéressés aux contraintes de type géométrique associées aux collisions outil/environnement et/ou aux interférences outil/pièce [Rao *et al* 2000][Jung *et al* 2003], des travaux plus récents s'attachent à intégrer de plus des contraintes liées à la cinématique de la machine : orientations lissées [Ho *et al* 2003], limitations des changements au niveau des axes rotatifs [Munlin *et al* 2004]. Notons qu'un des problèmes essentiels du calcul de trajectoire à 5 axes est que la trajectoire de l'outil généralement calculée dans l'espace de la pièce est exécutée dans l'espace de la machine, au travers des variables articulaires. Ainsi, l'architecture de la machine, sa cinématique, ses courses et l'encombrement des organes mécaniques sont autant de contraintes dont il faut tenir compte.

Dans cet article, nous nous sommes intéressés au problème de la prise en compte des performances cinématiques de la machine pour l'optimisation du calcul de trajectoires en usinage à 5 axes. L'étude proposée s'appuie sur un modèle dit de fabrication qui permet d'intégrer des contraintes géométriques, cinématiques et dynamiques au plus tôt dès le calcul des trajectoires d'usinage. Ce modèle a été pensé pour limiter les changements de modèles géométriques au cours du processus et faciliter l'intégration de contraintes afin d'optimiser le calcul de trajectoires de type surfacique [Duc 1999]. Cette description, « géométriquement riche » garantit une continuité au minimum C2. L'utilisation des outils de manipulation classique des surfaces (calcul de géométrie différentielle, déformations de surface, raccordements, etc.) permet l'intégration de différentes contraintes.

La deuxième partie de l'article est consacrée à la présentation du modèle surfacique de description des trajectoires. La partie 3 souligne l'importance du problème d'inversion des coordonnées dans le cadre de l'usinage à 5 axes. La partie 4 est consacrée à la prise en compte des limites cinématiques au travers d'un exemple.

2. Un modèle surfacique de trajectoires

Dans un objectif de minimisation des approximations au cours du processus, nous avons proposé de nouveaux modèles de géométrie de fabrication assurant le respect des exigences fonctionnelles tout en intégrant les contraintes dynamiques associées à la réalisation de la pièce lors de l'usinage. Nos premiers travaux ont abouti à la définition d'un modèle géométrique de fabrication sous forme d'un espace bi-paramétré : la surface d'usinage. Avec ce modèle, la trajectoire d'un point particulier de l'outil est exprimée sous forme d'une surface ou d'un ensemble de surfaces [Tournier *et al* 2000].

En usinage à 5 axes, l'orientation de l'axe de l'outil est spécifiée par l'utilisateur au travers de deux angles du repère local (f, n, t) , l'inclinaison (θ_n, t) et le pivotement (θ_n, n) (figure 1). Pour chaque position de l'outil, il faut donc préciser un point pour sa position et un vecteur pour son orientation. La surface d'usinage est donc constituée de deux surfaces, la surface de guidage S_l et la surface d'orientation S_2 . La surface de guidage S_l est le lieu du point K , tel que $\mathbf{K} = \mathbf{C}_C +$

$r.n$. C'est donc la surface offset de la surface nominale S de distance r . Cette surface est indépendante de la stratégie d'usinage, elle ne dépend que de la géométrie nominale et du rayon de l'outil choisi. La surface d'orientation S_2 est le lieu du point C_L tel que : $C_L = C_C + r.n + R.v$. Cette surface, une surface offset généralisée, dépend entièrement de la stratégie d'usinage retenue.

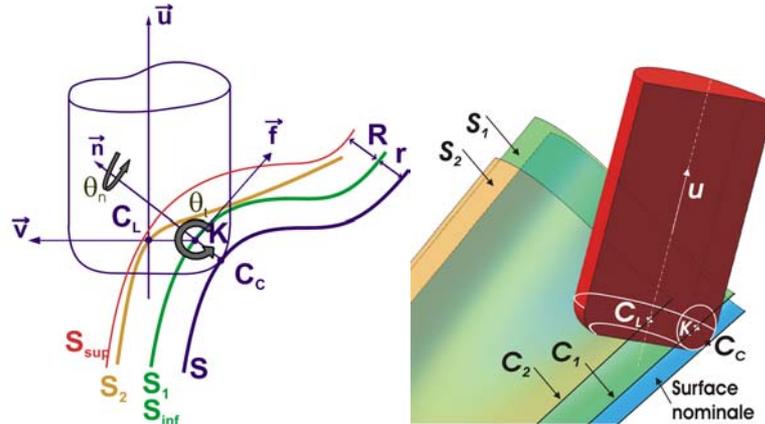


Figure 1 : modèle surfacique de trajectoire en 5 axes

Nous avons donc un modèle FAO surfacique et continu, qui contient plus d'informations que le modèle issu de l'interpolation linéaire constitué d'un nuage de points. L'utilisation de la surface d'usinage assure la continuité des trajets et découple également exigences fonctionnelles et exigences dynamiques. En effet, l'orientation de l'axe de l'outil en chaque point de posage ne dépend que de la forme de la surface d'orientation. Ce modèle permet d'intégrer dès le calcul des trajectoires d'usinage les contraintes géométriques de la machine (dépassement des courses sur les 5 axes, position du porte-pièce), cinématiques (vitesses et accélérations sur les 5 axes, passage des singularités), ainsi que les problèmes de collisions avec la partie active de l'outil. Tous ces problèmes imposent des limites et contraintes à la surface d'orientation. Par exemple, le traitement des collisions est facilité par une modification globale et continue des trajectoires dans la zone concernée au moyen d'une déformation de la surface d'orientation qui modifie l'orientation de l'axe de l'outil en conséquence [Tournier *et al* 2000]. En d'autres termes, il existe une zone de l'espace dans laquelle nous plaçons la surface d'orientation pour assurer la non collision.

Ce concept peut être étendu à d'autres contraintes liées à l'orientation de l'axe de l'outil comme la largeur coupée à chaque instant [Lee *et al* 1997], [Tournier *et al* 2005], la section de copeau et par conséquent les déformations de l'outil [Hascoet *et al* 2000], ou encore le comportement cinématique des axes de la machine sollicités lors de l'usinage. C'est ce dernier point que nous développons dans cet article. Nous souhaitons contraindre la position et la forme de la surface d'orientation de façon à minimiser les sollicitations cinématiques des axes de la machine pour garantir le respect de la vitesse d'avance programmée.

3. Problématique de l'inversion de coordonnées au cœur de la chaîne numérique

Dans la mesure où nous souhaitons anticiper le comportement de la machine lors de l'usinage, il faut maîtriser tous les éléments de la chaîne numérique entre la CFAO et le pilotage des variateurs par la commande numérique et en particulier le post-processeur. Il est important de rappeler qu'en 5 axes, les mouvements des axes de la machine dans l'espace des taches sont différents des trajectoires de l'outil décrites dans l'espace de la pièce par le logiciel de FAO. La seule analyse des trajectoires générées en FAO est insuffisante pour mener à bien l'étude cinématique du comportement des axes de la machine.

Dans la chaîne numérique, les logiciels de CFAO génèrent des solutions génériques d'usinage (par exemple un « fichier CL », norme ISO 3592) dont le format n'est pas reconnu par la commande numérique qui interprète quant à elle une solution spécifique décrite en « code iso » (norme ISO 6983). Un post-processeur de traduction du langage est alors utilisé à l'interface FAO/commande numérique. Dans le cas de l'usinage à 5 axes, les trajectoires d'usinage communiquées à la commande numérique peuvent être décrites dans le repère pièce ou dans le repère machine. Dans le premier cas, le programme est indépendant de la structure de la machine qui usinera la pièce. Par contre, la commande numérique devra effectuer l'inversion de coordonnées en temps réel lors de l'usinage. Dans le second cas, un post-processeur dédié à la machine utilisée devra effectuer la transformation de coordonnées pour passer du repère pièce au repère machine en plus de la traduction de langage.

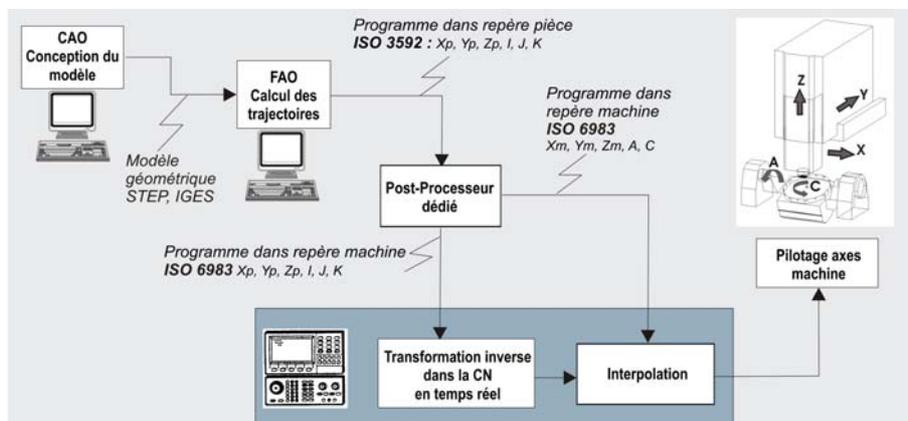


Figure 2 : le post-processeur dans la chaîne numérique en 5 axes

Les logiciels de transformation de coordonnées intégrés dans les commande numériques actuelles permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants [Duc *et al* 2002] mais leurs algorithmes de fonctionnement ne sont pas accessibles. C'est pourquoi nous avons développé notre propre post-processeur assurant l'inversion de

coordonnées dédié à la machine utilisée, un centre 5 axes Mikron UCP710 vertical avec rotations sur les axes A et C.

Le développement de logiciels de transformation bute sur deux difficultés. La première est due à la non unicité de la solution lors de l'inversion de coordonnées. Une configuration dans l'espace des taches peut correspondre à plusieurs configurations dans l'espace articulaire, voir dans les cas extrêmes, une infinité. On parle de points singuliers. Il faut alors développer des stratégies pour trouver la solution qui perturbe le moins le processus d'usinage [Affouard *et al* 2004].

La seconde difficulté est la gestion de la trajectoire dans l'espace des taches entre deux points d'interpolation. En effet, après avoir lu les valeurs des coordonnées articulaires aux extrémités du déplacement (les angles A et C plus particulièrement), la commande numérique effectue une interpolation linéaire dans l'espace articulaire. La trajectoire dans l'espace des taches est donc quelconque et la vitesse d'avance n'est plus maîtrisée. On pourra alors utiliser la programmation en inverse du temps, c'est à dire que l'on impose à la CN le temps qu'il faut pour aller d'un point à un autre en interpolation linéaire. Pour cela, il est nécessaire de déterminer la distance parcourue dans l'espace des taches [Poulachon 2004].

Nous obtenons alors un modèle géométrique pour la position des axes et un modèle différentiel pour la vitesse des axes nous permettant de décrire les mouvements des axes de la machine dans l'espace des taches.

4. Prise en compte des limites cinématiques et mise en oeuvre

Nous souhaitons générer des trajectoires d'usinage en 5 axes permettant l'usinage à grande vitesse d'une surface, en respectant une qualité imposée par des tolérances géométriques de défaut de forme et d'état de surface et surtout par l'absence de marque sur la pièce. Par ailleurs, l'étude des conditions de coupe permet de déterminer la meilleure vitesse d'avance pour le couple outil/matière considéré.

Sur les machines à 5 axes, les axes rotatifs sont les moins performants. Si par endroit ils arrivent à saturation en vitesse, cela signifie que la vitesse d'avance tangentielle programmée ne sera pas atteinte, diminuant ainsi la productivité et favorisant l'apparition de marques dues à des flexions d'outil. Il faut donc pouvoir générer des trajectoires et des orientations d'axe outil optimales d'un point de vue cinématique.

Nous souhaitons déterminer les meilleures orientations prises par l'outil sans avoir recourt à des tests sur machines qui immobilisent le moyen de production. Le processus que nous proposons pour déterminer la meilleure orientation est décrit sur la figure 3. On constate que le choix de l'orientation de l'outil ne peut se faire sans tenir compte des collisions, du posage de la pièce et de la stratégie d'usinage. Le lien entre tous ces paramètres rend le problème relativement complexe à résoudre. L'objectif de cet article n'est pas de résoudre le problème dans son ensemble mais d'analyser les relations entre les différentes contraintes propres à l'usinage à 5 axes. C'est pourquoi dans le cas présent nous faisons des hypothèses simplificatrices.

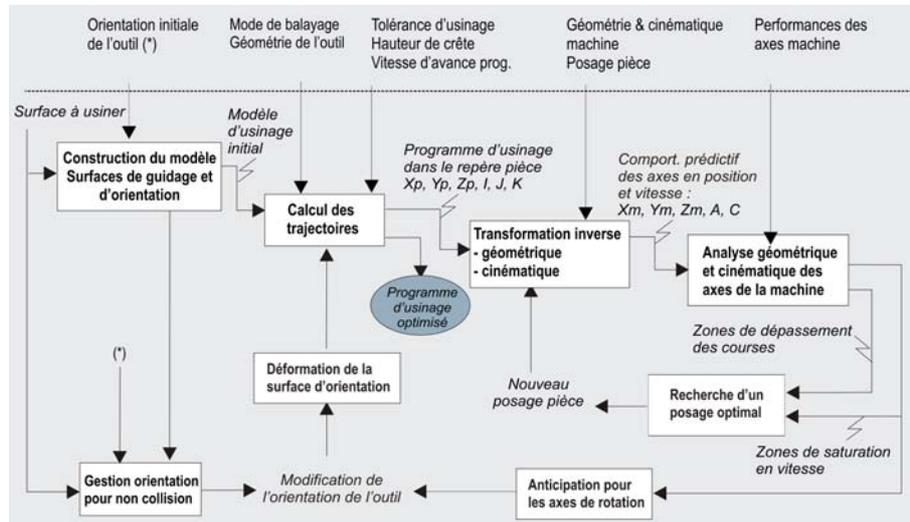


Figure 3 : algorithme de gestion de l'orientation

Tout d'abord, le posage de la pièce dans l'espace machine est imposé. Sa position est centrée sur le plateau et son orientation est parallèle aux axes de la machine. On considère l'usinage d'une surface de type parabolôïde hyperbolique en fraisage à 5 axes avec un outil torique sur la machine Mikron UCP710 à cinématique de type RRTTT. La stratégie d'usinage retenue est une stratégie par plans parallèles orientés à 45° par rapport aux axes X et Y , avec un angle d'inclinaison de 1° et un angle de pivotement nul. Nous avons imposé une distance fixe entre les plans de guidage. La surface et les différentes positions et orientations de l'axe de l'outil le long des passes calculées sont représentées sur la figure 4.

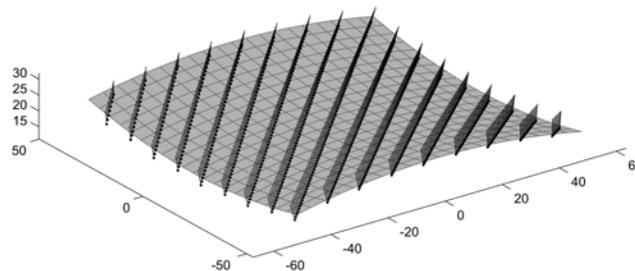


Figure 4 : surface de test

Une étude préalable a permis de valider que les angles d'inclinaison envisagés permettent de pouvoir usiner la pièce sans collisions. La vitesse d'avance programmée est de 5 m/min. Le suivi de la trajectoire pour respecter cette vitesse et les orientations de l'axe outil sollicitent les axes de rotation d'un point de vue

cinématique entraînant des saturations en vitesse. Les vitesses de rotation des axes sont estimées à l'aide du modèle différentiel inverse, sur trois points consécutifs de la trajectoire, en supposant que l'outil se déplace à la vitesse programmée. La vitesse de rotation maximum de l'axe A est de 15 tr/min et celle de l'axe C de 20 tr/min. On peut voir sur la cartographie de la figure 5 que les sollicitations de l'axe A restent dans les limites machines ce qui n'est pas le cas pour l'axe C .

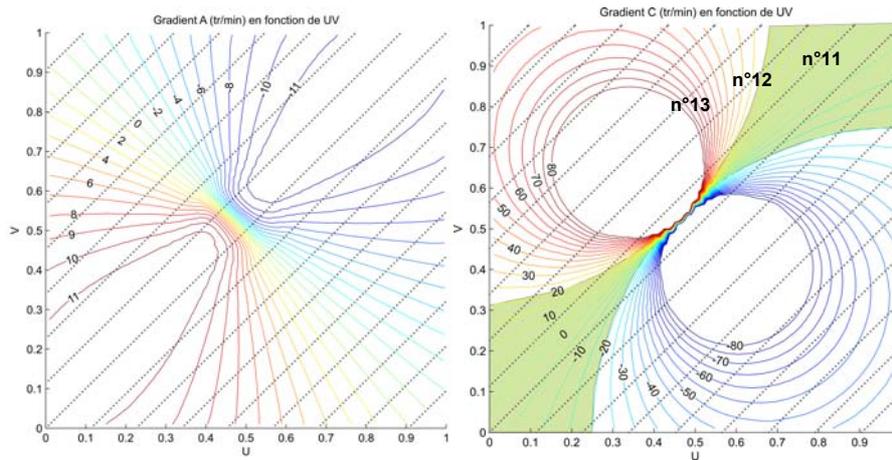


Figure 5 : analyse des vitesses de rotation des axes

Nous proposons donc de modifier les orientations de l'axe outil dans une des zones où l'axe C sature afin d'atteindre la vitesse d'avance programmée. Nous avons analysé l'évolution des vitesses des axes rotatifs avec différents angles d'inclinaison. A priori, il existe des zones pour lesquelles un angle d'inclinaison de 5° permettrait de moins saturer, tout en conservant une inclinaison de 1° là où il n'y a pas de solution. Aussi, nous avons introduit des modifications locales sur les passes n°11, n°12 et n°13. Pour cela nous avons effectué une déformation de la surface d'orientation (Figure 7) en imposant à quelques points de la passe n°12 une inclinaison de 5° . Grâce à la continuité de la surface d'orientation, toute une zone est déformée et n'importe quelle position de l'outil sur la passe considérée est modifiée.

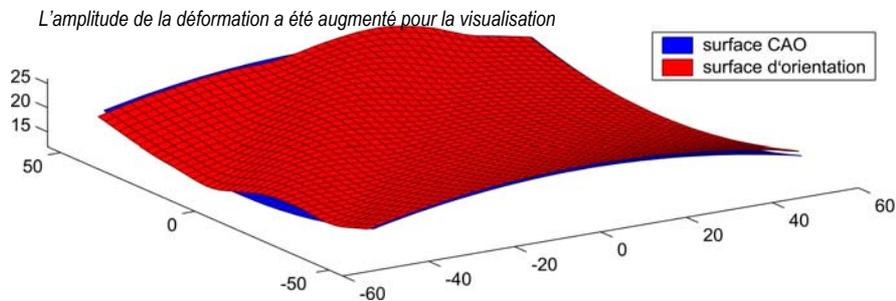


Figure 6 : modification de la surface d'orientation

Dans la direction transversale à la passe, cette déformation a également généré une modification de l'angle d'inclinaison sur la passe précédente et sur la passe suivante. On observe sur la figure 7 que les vitesses sur l'axe A restent dans les limites de la machine et nous avons pu limiter les saturations sur l'axe C dans la mesure du possible.

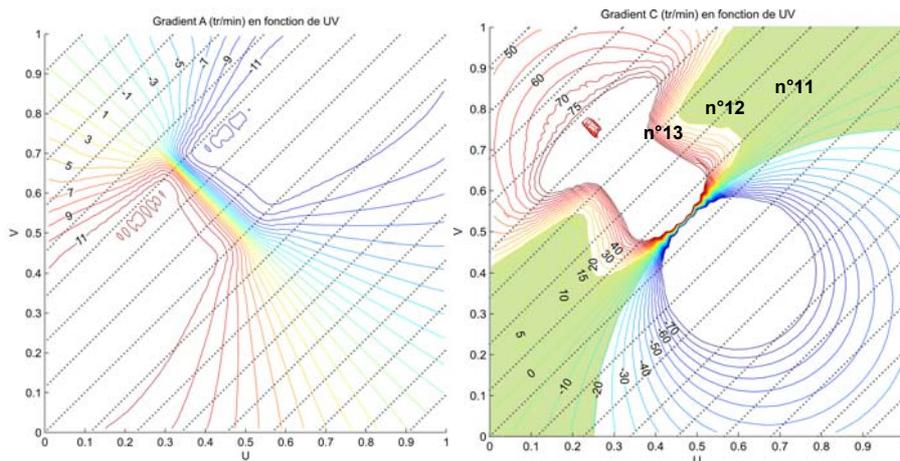


Figure 7 : analyse des vitesses de rotation des axes après modification

Ces modifications de l'angle d'inclinaison ne sont pas sans conséquences sur la largeur coupée à chaque instant. En effet, avec un outil torique orienté par rapport à la normale à la surface selon l'inclinaison et le pivotement, le profil de l'outil vu dans un plan perpendiculaire à la vitesse d'avance est une ellipse dont le grand rayon R_{eq} vaut la valeur suivante :

$$R_{eq} = \frac{r(R + r \sin \theta)}{r \sin \theta \cos^2 \theta + (R + r \sin \theta) \sin^2 \theta}$$

Aussi, si le pivotement est nul, on obtient le résultat suivant :

$$R_{eq} = \frac{(R + r \sin \theta)}{\sin \theta}$$

On remarque que pour un angle d'inclinaison nul, le rayon équivalent est infini, ce qui est normal car l'outil travaille dès lors à plat. Par contre, nous sommes alors certains de générer des collisions entre l'outil et la surface dans les zones concaves.

L'application numérique montre qu'avec un pivotement de 5°, le rayon équivalent est cinq fois plus petit qu'avec un angle de 1° (104 mm pour 516 mm). En conservant une stratégie d'usinage à distance entre plans constante, la hauteur des crêtes générées sera plus grande dans les zones où nous avons augmenté l'angle d'inclinaison. Aussi, afin de maintenir les écarts géométriques dans les limites fixées par les tolérances, le resserrage des passes dans les zones déformées peut être effectué automatiquement en fonction de la déformation de la surface d'orientation.

5. Conclusions et perspectives

L'étude que nous avons menée permet de prévoir et d'analyser l'influence des deux degrés de liberté propres à l'usinage à 5 axes en bout, les angles d'inclinaison et de pivotement. A partir d'un choix initial, nous pouvons prédire l'impact des modifications de l'orientation de l'outil sur le comportement des axes de la machine au travers du post-processeur dédié à la machine utilisée.

Nous pouvons constater également que les contraintes liées à l'orientation de l'outil sont antagonistes et devraient donc faire l'objet d'une optimisation globale. En effet, une inclinaison minimum de l'outil par rapport à la normale à la surface assure une largeur coupée maximum, donc un temps d'usinage diminué. A contrario, cette orientation de l'outil est la première source de collisions entre l'outil et la surface. Enfin, la modification de l'orientation de l'axe outil pour augmenter la vitesse d'avance et donc diminuer le temps d'usinage changera sans doute la largeur coupée, ce qui peut augmenter le nombre de passes et donc le temps d'usinage. C'est vers cette approche globale que se dirigent nos travaux.

Dans le cadre de la génération de trajectoires d'usinage, le choix de la stratégie d'usinage et de l'orientation de l'axe outil ne doit pas, si possible, découler d'une analyse a posteriori mais doit être le résultat d'une synthèse des contraintes menant à une solution optimale. Il faut donc travailler sur la formalisation des contraintes sous forme géométrique afin de spécifier directement les orientations outil compatibles, c'est à dire la surface d'orientation.

Enfin nous développons dès à présent un simulateur pour prévoir les vitesses d'avance effectives en fonction des difficultés géométriques rencontrées, telles que des discontinuités en tangence et en courbure des trajectoires, et des caractéristiques du couple machine/commande numérique utilisé. Couplé au post-processeur, ce simulateur devrait permettre d'avoir une meilleure image des positions et vitesses requises sur chacun des axes de la machine.

Références

- Affouard A., Duc E., Lartigue C., Langeron J-M., Bourdet P., « Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(4), pp. 415-425, April 2004
- Altintas Y., Erkomaz K., « Feedrate optimization for spline interpolation in High Speed Machine Tools », *Annals of the CIRP*, vol. 52(1), pp. 297-302, 2003
- Cheng M.-Y., Tsai M.-C., Kuo J.-C., « Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers », *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42(7) pp. 801-813, 2002
- Duc E., Usinage de formes gauches, « Contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires », *Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 9 Décembre 1998
- Duc E., Lartigue C., Bourdet P., « Utilisation de l'interpolation polynomiale pour l'UGV - cas de l'usinage à 5 axes », *Assises Machines et Usinage Grande vitesse*, Lille (France), pp.287-296, mars 2002
- Dugas A., Lee J-J., Hascoët J-Y., « High Speed Milling–Solid simulation and machine limits », *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Kluwer Academic Publishers, pp. 287-294, 2002
- Jun C-S., Cha K., Lee Y-S., « Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration space search method », *Computer-Aided Design*, vol. 25, pp 549-566, 2003
- Hascoët J.Y., Lee J.J., Dugas A., « Machining simulator with dynamic error analysis on free surface machining », *IDMME2000*, CDROM paper, Montréal(Canada), May 2000
- Ho M-C., Hwang Y-R., Hu C-H., « Five-axis orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm », *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 1259-1267, 2003
- Lartigue C., Tournier C., Ritou M., Dumur D., « High-performance NC for High-Speed Machining by means of polynomial trajectories », *Annals of the CIRP*, 53(1), pp. 317-320, 2004
- Laverhne S., Duan X., Tournier C., Lartigue C., « Performance of off-line polynomial CNC trajectories within the context of HSM », *ASME International Mechanical Engineering Congress*, CDROM paper N°60900, 7 p., Anaheim (USA), November 2004
- Lee Y.S., Ji,H., « Surface interrogation and machining strip evaluation for multi-axis CNC die mold machining », *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 1, pp 225-252, 1997.
- Munlin M., Makhanov S.S., Bohez E.L.J., « Optimization of a 5-axis milling machine near stationary points », *Computer-Aided Design*, vol. 36, pp1117-1128, 2004
- Poulachon G., « de la modélisation à l'usinage 5 axes d'un impeller », journées techniques sur l'usinage à 5 axes, L'ENSAM de Cluny , novembre 2004.
- Rao A., Sarma R., « On local gouging in five-axis sculptured surface machining using flat-end tools », *Computer-Aided Design*, vol. 32, pp. 409-420, 2000

Tournier C., Duc E., Lartigue C., Contri A, « The concept of the machining surface in 5-axis milling of free-form surfaces », *3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing In Mechanical Engineering, IDMME'2000*, Montréal (Canada), CDRom paper, 8 pages, May 2000.

Tournier C., Duc E., «Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, To be published in 2005