

Amélioration de la qualité des pièces usinées par interpolation directe du trajet sur surface

Sylvain Lavernhe, Xavier Beudaert, Christophe Tournier

▶ **To cite this version:**

Sylvain Lavernhe, Xavier Beudaert, Christophe Tournier. Amélioration de la qualité des pièces usinées par interpolation directe du trajet sur surface. Machines et Usinage à Grande Vitesse 2014, Oct 2014, Clermont-Ferrand, France. hal-01096699

HAL Id: hal-01096699
https://hal.science/hal-01096699

Submitted on 18 Dec 2014

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.

AMELIORATION DE LA QUALITE DES PIECES USINEES PAR INTERPOLATION DIRECTE DU TRAJET SUR SURFACE

Sylvain LAVERNHE
LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex,
sylvain.lavernhe@lurpa.ens-cachan.fr
Xavier BEUDAERT
IK4-Ideko, Elgoïbar, Pays Basque, Espagne,
LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex,
xavier.beudaert@gmail.com
Christophe TOURNIER
LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex,
christophe.tournier@lurpa.ens-cachan.fr

Résumé : *Malgré les avancées technologiques et logicielles, le processus de réalisation par UGVdes pièces de formes complexes comporte des points durs pour atteindre simultanément productivité et qualité de surface élevées. Un des verrous scientifiques concerne les phases de calcul des trajectoires puis leur traitement par la Commande Numérique lors de l'interpolation temporelle.A ce jour, la solution FAO logicielle-CN impose une « fracture dans la chaîne numérique, limitant les performances finales atteintes. Cet article propose une méthode unifiée, nommée DTIS (Direct Trajectory Interpolation on the Surface), pour la génération et l'interpolation des trajectoires dans un contexte UGV multi-axes. Ellepermet d'annuler les écarts géométriques liés à la description et à l'interpolation à jerk contrôlé des trajectoires. Grâce au développement d'une CN ouverte sur le centre UGV 5 axes industriel du LURPA, il est possible d'évaluer le gain apporté par une telle démarche vis-à-vis du processus classique.*

Mots clés : écart géométrique, erreur de corde, trajectoire, UGV, interpolation à jerk contrôlé.

Abstract: *Despite recent advances in technology and software, the High Speed Machining process of complex surfaces still has challenges to achieve simultaneously productivity and high surface quality. Two of them are the tool path generation and its treatment by the numerical controller during real-time interpolation. To date, the classical solution "CAM-CNC" imposes breaks in the digital chain, limiting the final results that are really reached. This paper proposes a unified method, named DTIS (Direct Trajectory Interpolation on the Surface), for multi-axis tool paths generation and interpolation within a HSM context. It avoids the geometrical deviations related to the description format of the tool path and to their jerk limited interpolation. Thanks to the development of an open CNC on the LURPA's 5-axis high speed machining center, it is possible to evaluate the improvements provided by such an approach compared to the usual process.*

Keywords: geometrical deviation, chordal deviation, tool path, HSM, jerk limited interpolation.

1 Introduction

Les pièces de formes complexes sont très présentes dans les domaines aéronautique, automobile ou encore biomédical. Un besoin commun à ces géométries, est qu'elles ne doivent pas présenter de marque suite à l'usinage. Afin d'accroitre la qualité de ces surfaces usinées, les trajectoires sont exécutées à grande vitesse, et souvent en multiaxes pour garantir l'accessibilité, réduire le nombre de posages de la pièce, réduire les longueurs outils ou encore maximiser la largeur coupée en finition. Cependant, le processus d'usinage à grande vitesse est constitué de plusieurs étapes, où résident des verrous technologiques et scientifiques pour arriver à maîtriser la productivité et la qualité finale.

1.1 Présentation du processus de réalisation UGV multi-axes

Le processus d'élaboration est schématisé sur la figure 1. Le point d'entrée est un modèle géométrique nominal de la pièce (outillage ou forme finie) défini en CAO. Les trajectoires d'usinage sont calculées à partir de ce modèlenumérique selon une stratégie, et sont généralementstockées dans un fichier numérique (CL-file), selon un format de description donné. Ce fichier est ensuite interprété par la Commande Numérique de la machine afin de générer le mouvement relatif de l'outil par rapport à la piè ce par la mise en mouvement des différents axes de la machine. Enfin, le processus d'enlèvement de matièreréalisé par l'outil conduit à la surface finale usinée.

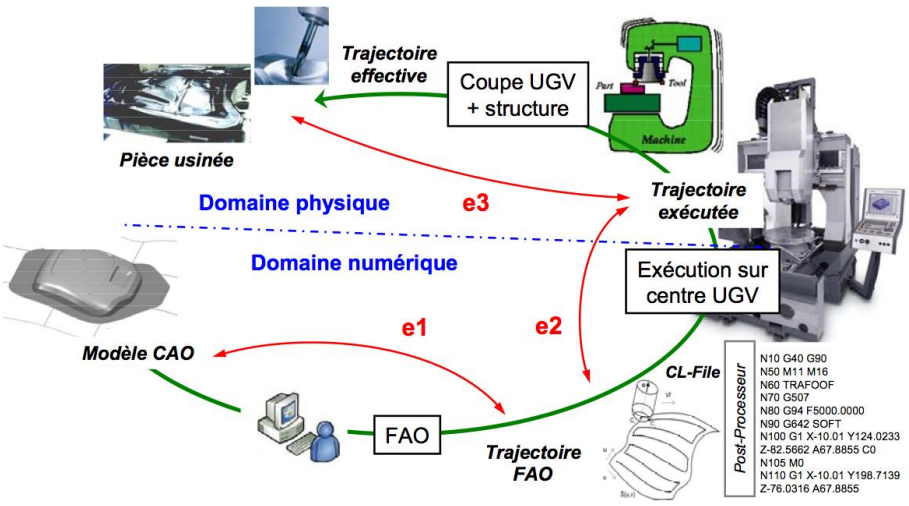


Fig. 1 : Processus de réalisation UGV et présentation des écarts géométriques

Les trois activités (FAO, exécution de trajectoires, UGV avec mouvement de la machine) décomposent naturellement les écarts totaux entre le modèle géométrique initial et la pièce finie en trois écarts qui se cumulent spatialement, respectivement e1, e2 et e3. On peut décomposer le processus en deux parties ; une numérique en amont de la mise en mouvement des axes et la seconde allant jusqu'à l'obtention de la géométrie finale du produit.Pour des trajectoires 5 axes avec usinage en bout d'outil, nous nous focalisons dans cet article sur les diverses sources d'écarts numériques apparaissant en FAO (écarts e1) et lors de l'exécution des trajectoires (écarts e2).

1.2 Ecarts macro géométriques

La première étape du processus consiste à générer les trajets d'usinage à partir d'une géométrie nominale de la surface. Les limitations des CN actuelles en terme de lecture et traitement de géométrie imposent que les trajets soient définis sous un format explicite,

souvent limité à des segments de droite ou au mieux à une forme polynomiale de degré réduit. Ainsi, en FAO, la génération des trajets consiste à positionner un outil sur la surface nominale, puis à relier ces positionnements discrets par une interpolation linéaire (format G1) ou polynomiale (format BSpline par exemple) comme dessiné en figure 2. Le nombre de positionnement est alors défini par le pas de discrétisation du trajet théorique. Celui-ci donné par la « tolérance de flèche » également appelé « tolérance d'usinage », écart entre trajectoire théorique et trajectoire calculée.Quel que soit le format retenu, étant donné une tolérance de flèche sur la trajectoire, une erreur de corde (écart géométrique entre la surface réalisée et la surface nominale) est générée sur la pièce.

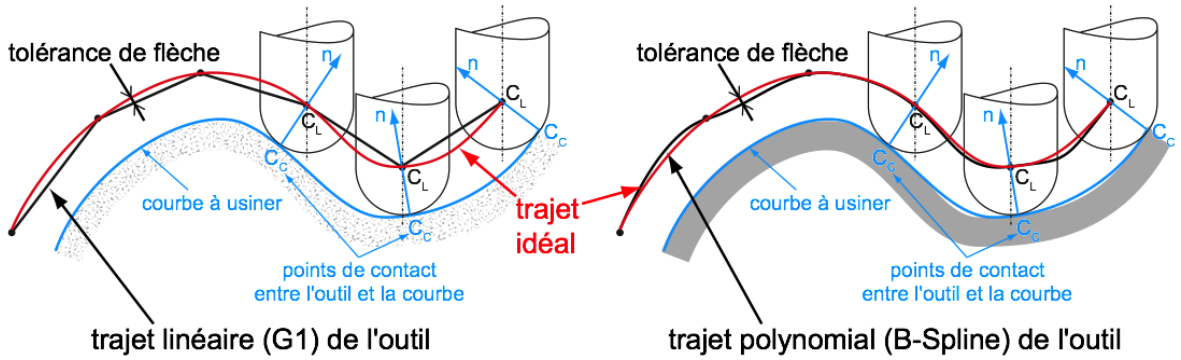


Fig. 2 : Tolérance de flèche en interpolation linéaire et polynomiale

L'écart de corde généré sur la surface s'avère très visible en interpolation linéaire lorsque les passes successives sont désynchronisées : c'est l'effet « peau d'orange » qui cumule erreur de corde et hauteur de crête générant ainsi des cavités dégradant l'aspect lisse de la surface. De plus, en usinage 5 axes, pour des changements d'orientations continus, la transformation géométrique non linéaire vient rajouter des écarts supplémentaires (erreurs de corde 5 axes) à cause des arrondis CN ou du suivi par les asservissements.

1.3 Ecarts micro géométriques

Si l'on se cantonne au domaine numérique, la qualité de la surface est également affectée par des effets « micro géométriques ».En considérant une géométrie représentative de l'outil (i.e. avec toutes les faces, angles et rayons) mais nominale, la rotation de l'outil combinée à l'avance génère une hauteur de crête dite longitudinale qui apparaît dans le plan d'avance (fig. 3.).

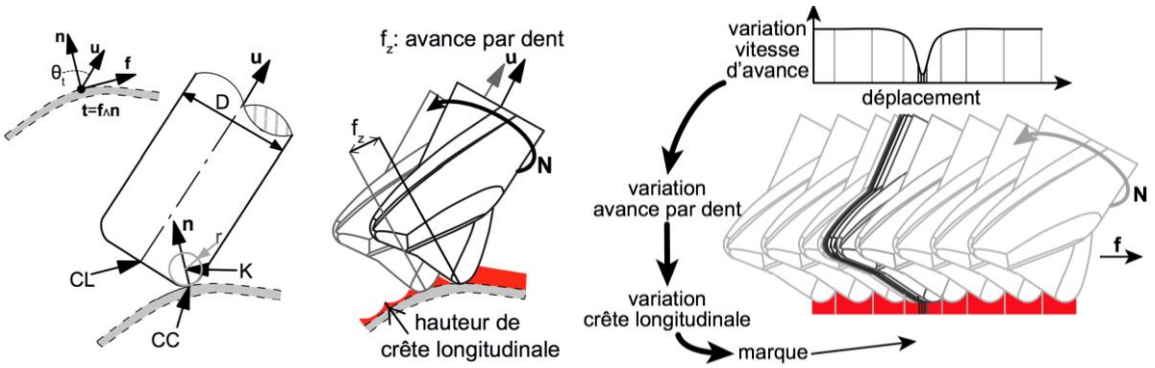


Fig. 3 : Définition de la hauteur de crêtelongitudinale et effet de la variation de l'avance

Pour réduire les erreurs de corde précédemment citées, la densification des positionnements outil est souvent utilisée. Cependant, les limitations cinématiques en vitesse,

accélération et jerk vont induire des fluctuations de la vitesse d'avance effective lors de l'exécution. Ainsi les variations de vitesses, surtout les forts ralentissements vont modifierl'avance à la dent effective, donc la hauteur de crête longitudinale. Ces variations de géométrie vont apparaître clairement à l'œil sur la surface, comme une modification de texture ou des marquesrévéléespar les variations de réflexion de la lumière.

1.4 Pistes d'amélioration de la qualité

Parmi les travaux de la littérature qui traitent de la réduction des écarts géométriques dues à la génération et à l'interpolation des trajectoires, nousretiendrons les approches surfaciques pour l'interpolation. Ainsi, dès 1995 Koren et Lin proposent une nouvelle architecture d'interpolateur temps réel, avec un générateur de trajectoire interne pour déterminer les positionnements outils puis consignes articulaires après transformation géométrique inverse [1]. La donnée d'entrée à cette nouvelle CN est directement une surface. Ces travaux sont poursuivis par Lin en 2000 pour maitriser la vitesse d'avance constante, mais sans tenir compte des caractéristiques cinématiques d'axes très influents en UGV. Parmi les développements les plus pertinents, ceux de Lianget Li en 2011 et 2013 [2][3] consistent à proposer un nouveau code G adapté à l'interprétation des surfaces et s'intégrant dans STEP-NC.

Bien qu'il paraisse possible de bâtir une interpolation géométrique de trajectoire surfacique dans une architecture telle STEP-NC, il est nécessaire de tenir compte de l'avance effective de l'outil pour contrôler les effets des crêtes longitudinales variables. Ces effets micro géométriques sontliés à l'interpolation temporelle. En effet, le respect strict des contraintes cinématiques des axes (vitesse, accélération et jerk) permet une évolution régulière du profil de vitesse, sans à coup. De plus, d'un point de vue pratique, les interpolations à jerk limité ne sont souvent pas idéales et présentent des variations bien plus importantes que nécessaires, ou alors ne respectent pas les contraintes de jerk, risquant alors de générer des secousses dans la commande, donc des marques sur la pièce.

Les travaux présentés dans cet article visent à unifier le principe d'interpolation surfacique à celui d'une interpolation temporelle à jerk contrôlé performante. Pour cela, nous nous appuierons sur l'algorithme VPOp (Velocity Profile Optimization), développé au LURPA, permettant de respecter les contraintes de jerk sur chaque axe d'une machine-outil 5 axes, et d'interpoler des trajets définis dans les formats B-Splineet G1[4].

2 Méthode de calcul de trajectoires DTIS

La méthode DTIS consiste à combiner le positionnement outil sur surface et l'interpolation temporelle à jerk limité.Le principe est de recalculer à chaque pas temporel un positionnement outil respectant le principe de balayage de la surface, mais surtout les contraintes cinématiques des axes. Le respect de ces contraintes nécessite un raffinement du posage qu'il est alors possible de faire directement dans l'espace paramétrique de la surface à réaliser. Ainsi, grâce à cette association, chaque point interpolé, consigne pour l'asservissement, est exactement sur la trajectoire théorique : il n'y a donc plus de tolérance de flèche sur la trajectoire et donc d'erreur de corde induite à ce niveau.

2.1 Définition d'un trajet d'usinage

Dans le contexte STEP-NC, le format d'entrée de la CN n'est plus limité à l'interpolation linéaire ou polynomiale. Il est maintenant possible de définir un trajet d'usinage par n'importe quelle expression mathématique explicite ou implicite. La seule condition est de pouvoir calculer la position de n'importe quel point du trajet avec une précision aussi élevée que nécessaire.

Pour l'application proposée, le trajet d'usinage est déterminé par la définition :
– de la surface nominale à usiner,
– de la stratégie d'usinage (plans parallèles, iso-paramétriques, distance entre passes...),
– de l'outil utilisé (type, dimensions ...),
– du positionnement de l'outil en 5 axes (inclinaison, pivotement).

Par exemple, pour la définition de la stratégie d'usinage, différentes classes sont prévues par la norme ISO14649-11 de 2004[5] pour l'usinage des surfaces de formes complexes.

L'utilisation de ce type de définition des trajets permet d'éviter les ruptures de la chaine numérique. La CN reçoit ainsi des informations de haut niveau qui permettent par exemple d'avoir la définition de la surface à usiner au lieu d'avoir uniquement un ensemble de trajets qui balayent la surface . Comparée à la situation actuelle , la quantité d'informations à transférer est plus faible , les informations sont de meilleure qualité , mais des traitements plus lourds doivent être effectués par la CN. C'est l'amélioration des échanges de donnéesau sein de la chainenumérique qui permet d'optimiser le processus d'usinage.

2.2 Calcul exact du trajet

Les positionnements de l'outil le long du trajet doivent respecter deux conditions :
- posage exact du point de contact CC sur la surface à usiner
- respect de la stratégie d'usinage

Pour cela, l'orientation de l'axe outil est paramétré par les angles d'inclinaison θ_t et pivotement θ_n dans le repère local $(CC,\vec{f},\vec{n},\vec{t})$ où $\vec{f}$ est le vecteur tangent à la surface et orienté suivant la direction d'avance, $\vec{n}$ le vecteur normal à la surface usinée au point de contact CC, et $\vec{t}$ le vecteur transverse complétant la base. Le point piloté de l'outil CL est obtenu par l'équation (1), où D représente le diamètre, r le rayon de coin et $\vec{u}$ l'axe outil (fig. 3).

$$\overrightarrow{CL} = \overrightarrow{CC} + r\vec{n} + \left(\frac{D}{2} - r\right)\vec{v} - r\vec{u} \text{avec} \vec{v} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{n}}{\|\vec{u} \wedge \vec{n}\|} \wedge \vec{u} \quad (1)$$

La stratégie d'usinage permet alors de déterminer la position du point piloté de l'outil en résolvant les valeurs des paramètres correspondants *u* et *v* de l'espace paramétrique de la surface. Ainsi, pour une stratégie de guidage par plans parallèles$\prod$ (« Plane_cl_strategy »), la formulation implicite du problème nécessite une résolution numérique. Le problème à résoudre est écrit en équation (2).

$$\begin{cases} CC \in S(u,v) \\ CL \in \text{plan de guidage } \prod \end{cases} \quad (2)$$

Une méthode de raffinement de type Newton-Raphsonest utilisée pour déterminer directement les paramètres de la surface (u*,v*) (Fig. 4). A partir du positionnement précédant (u,v), une solution initiale (u_0,v_0) est estimée. Ce positionnement outil est analysé vis à vis de l'avance le long de la courbe ($\Delta s_0 = \Delta s + \varepsilon_1$), et de la distance au plan de guidage (ε_2). Le raffinement consiste alors à annuler les écarts ε_1 et $\varepsilon_2$pour respecter la stratégie d'usinage.

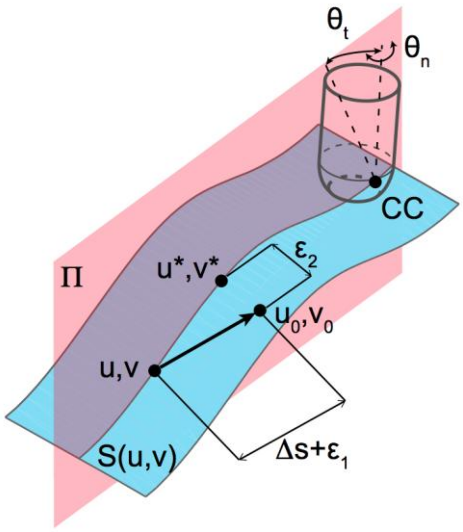


Fig. 4 : Calcul du positionnement outil par cheminement sur la surface.

2.3 Interpolation temporelle

La méthode DTIS permet ensuite de lier directement les positionnements outils calculés à l'interpolation temporelle selon les équations écrites dans [6].Le principe d'intersection des contraintes développé initialement dans les travaux de Bobrow et al. [7] et Shin et McKay [8] permet, par un algorithme itératif à deux passes, de déterminerla plage admissible de variation Δs. L'ajout des contraintes cinématiques des axes en accélération et jerk permet de réduire les solutions à celles compatibles avec la machine pour l'exécution.

Ainsi les positionnements outils sont calculés directement sur la surface à chaque pas temporel associé à la commande : ce sont les consignes de position en entrée des boucles asservissement en position des axes.Les consignes étant échantillonnées, on introduit forcément une erreur de flèche, mais à une échelle beaucoup plus faible que l'erreur de flèche introduite en FAO. À cette échelle, l'approximation linéaire entre deux échantillons n'a plus vraiment de sens puisque le système physique réalisera naturellement une sorte de lissage des consignes envoyées. On obtient donc au final la meilleure géométrie atteignable avec le temps de cycle Δt de l'interpolation temporelle. Laméthode DTIS permet donc de supprimer les écarts géométriques induits en FAO et respecte les contraintes cinématiques pour obtenir un suivi le plus fluide possible.

3Développement d'une CN ouverte

Afin de mettre en œuvre les principes et algorithmes proposés, il est nécessaire de disposer d'une CN suffisamment ouverte pour accéder au « cœur » de l'interpolation. Nous avons fait le choix de développer notre propre CN ouverte, nommée PREMIUM-Open CNC, et de l'implanter sur le centre industriel UGV 5XMikron UCP 710 du laboratoire, nativement équipé d'une CN Siemens 840D.

Dans le mode de pilotage « ouvert » de la Mikron, la CN PREMIUM-OpenCNC cohabite avec la CN Siemens 840D. Les déplacements des axes XYZA et C sont pris en charge par la CN ouverte : les variateurs initiaux 611D sont remplacés par des variateurs 611U pilotés en +/- 10V. Le pilotage de la broche reste assuré par la CN industrielle.



Fig. 5 : Centre Mikron équipé de la CN Siemens 840D à droite et de la CN PREMIUM OpenCNC à gauche.

La CN PREMIUM-OpenCNC est basée sur un système modulaire temps réel dSpace. Une interface encodeur permet de récupérer directement les signaux numériques des règles. Les consignes de positions des axes sont calculées avec une période de 1 mspar un modèle Matlab compilé sur une carte temps réel dSpace DS1006. Les librairies Real Time Interface permettent alors de connecter facilement les différents blocs physiques entrées/sorties au modèle d'interpolation et d'asservissement développé sous Simulink.

Pour obtenir une erreur de poursuite suffisamment faible et compatible avec un usinage grande vitesse, il est nécessaire d'implémenter une anticipation en vitesse sur la boucle de position. Les boucles de vitesse et de courant sont à ce jour laissées à l'intérieur des variateurs. Etant donné les différences des temps de réponse des axes de rotation par rapport aux axes de translation, une adaptation dynamique des boucles de vitesse est développée pour synchroniser les mouvements.

Bien que l'asservissement proposé par l'architecture industrielle « CN 840D-variateurs 611D » soit plus abouti que l'asservissement implémenté à ce jour dans l'architecture ouverte (intégration de fonctions diverses comme le rattrage de jeux aux inversions de mouvement, compensation de température, anticipation en accélération…), la solution actuelle permet raisonnablement d'obtenir un mouvement des axes avec des écarts de suivi de l'ordre de grandeur de la solution industrielle.

Finalement, le centre 5 axes UGV peut être utilisé soit avec une configuration standard Siemens 840D, soit avec la CN ouverte PREMIUM-OpenCNC où le processus d'interpolation est totalement maîtrisé. Cette plateforme offre une opportunité unique pour comparer des nouvelles avancées scientifiques avec des moyens industriels modernes.

4Application

La méthode DTIS d'interpolation de la trajectoire directement sur la surface permet des gains aux niveaux macro géométrique (erreur de corde) et micro géométrique (marques d'usinage) ainsi qu'au niveau de la productivité. L'application suivante montre l'ampleur des gains potentiels.

4.1 Définition du cas test

Le cas test consiste en une surface complexe de BSpline de degré3 selon Y et 1 selon X, usinée à l'aide d'un outil torique de diamètre 10mm et de rayon de coin 2mm. 5 bandes sont préparées pour pouvoir comparer 5 stratégies différentes. La vitesse d'avance programmée est de 3m/min, l'axe outil est incliné de 10° par rapport à la normale locale de la surface. Cette géométrie génère un trajet 5 axes sollicitant les axes Y, Z et A ; son aspect réglé permet de comparer et analyser clairement les résultats en terme d'écart au contour.

Les 5 bandes sont usinées avec 5 stratégies différentes, mais toutes en plans parallèles YZ en aller simple. Les quatre premières bandes sont usinées dans des conditions industrielles classiques. Le logiciel de FAO Catia v5 est utilisé pour générer les programmes APT d'usinage. Les paramètres modifiés sont le format de sortie (G1 ou BSpline) et la tolérance d'usinage FAO (10µm ou 1µm). La machine est utilisée dans les meilleures conditions possibles avec un asservissement utilisant l'anticipation en accélération. Les bandes1et 2sont usinées avec un processus classique G1 ; les bandes3 et 4sont usinées avec des BSplines nativement créées par le logiciel de FAO, c'est le processus le plus performant disponible industriellement. Finalement, la dernière bande de la surface est usinée avec la méthode DTIS.Les paramètres sont synthétisés dans le tableau 1.

N°	Nom	FAO	Post-pro	CN	Lignes CN	Exécution
1	G1 10µm	Catia : APT G1	Matlab	Siemens 840D	59	14.4s
2	G1 1µm	Catia : APT G1	Matlab	Siemens 840D	189	12.2s
3	BSpline 10µm	Catia : APT Nurbs	Matlab	Siemens 840D	85	8s
4	BSpline 1µm	Catia : APT Nurbs	Matlab	Siemens 840D	226	9s
5	DTIS	DTIS - Premium Open CNC			-	3s

Tab. 1 : Présentation des 5 stratégies d'usinage.

4.2 Analyse des écarts FAO et CN

Sur la gauche de la figure 6, on vérifie bien que les points des programmes d'usinage G1 sont bien posés sur la géométrie à usiner, mais que l'interpolation linéaire entre deux points entraîne des écarts de contour fonction de la tolérancespécifiée en FAO. Sans connaissance particulière sur les algorithmes utilisés pour l'interpolation BSpline dans le logiciel Catia v5, il est difficile de savoir pourquoi l'écart de contour atteint 12µm sur le trajet BSpline 10µm.

Les écarts entre le trajet FAO et le trajet idéal peuvent êtrecalculés en tout point du trajet et sont donc représentés par des courbes continues. En revanche, les écarts entre les consignes CN et le trajet FAO sont calculés uniquement aux points échantillonnéscalculés par la CN, c'est pour cela que les écarts sont représentés uniquement par des marqueurs sur le graphique de droite de la figure 6.En exécutant les trajets avec une vitesse programmée de 3m/min, on peut voir que des écartsgéométriques sont introduits par l'algorithme d'interpolation temporelle utilisé dans la CN Siemens 840D. En effet, le graphique de droite de la figure 6 montre que pour toutes les trajectoires plusieurs µm d'écart de contour apparaissent entre les consignes mesurées avant l'asservissement (sans compensation géométrique ni thermique) et le trajet FAO décrit dans le programme CN associé . Là encore , il est difficile de dire exactement d'où viennent ces écarts de contour puisque l'algorithme utilisé est une boîte noire. Cependant, les ré-interpolations et filtrage des consignes dans l'interpolateur de la commande numérique Siemens peuvent introduire ces écarts de contour. On remarque que pour le programme BSpline 1µm, l'écart de contour introduit par la commande numérique est plus important que celui introduit par la FAO.

Dans la méthode DTIS proposée, l'écart de contour correspondant à la FAO est nul . L'écart entre les consignes CN et le trajet idéal FAO est de 0.02µm au maximum. En effet, avec la méthodeproposée les consignes sont échantillonnées sur une discrétisationtrès fine du trajet. Cet écart n'est pas nul, mais la solution pratique qui permet de réaliser l'interpolation temporelle permet de garantir que cet écart est largement inférieur à l'écart qui sera introduit par l'asservissement par exemple ; il peut donc être négligé.

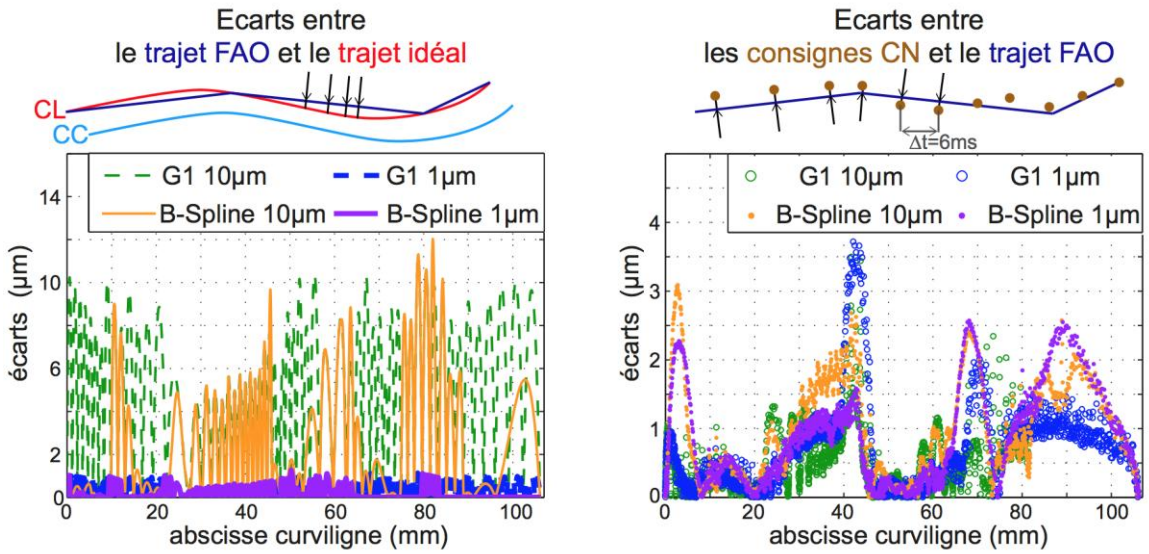


Fig. 6 : Écarts de contour introduits par la FAO et par la CN

4.3 Synthèse

D'un point de vue qualitatif, les écarts FAO ont un effet de facettisation plus visible sur la surface que les écarts liés à la CN. La figure 7 permet de juxtaposer la qualité visuelle de la pièce (partie gauche), au erreurs de cordes simulée sur la surface (partie droite). On retrouve les ondulations introduites par une forte tolérance d'usinage en G1 et BSpline. Pour les tolérances de 1µm, les écarts sont plus faibles, mais les facettisations présentes en G1 et quelques ondulations apparaissent en BSpline. Quasiment aucun écart n'est notable avec la méthode DTIS.

Ces résultats d'écarts géométriques sont à mettre en regard du comportement cinématique de la machine lors de l'exécution des trajets. Bien que cet aspect ne soit pas développé dans cet article, les stratégies 2 et 4 à 1µm possèdent une vitesse d'avance effective bien en dessous de celle programmée. Les stratégies 1 et 3 à 10µm ont une vitesse effective plus élevée mais comportant de forts ralentissements, marquant la pièce. La stratégie DTIS présente quant à elle un mouvement beaucoup plus fluide et respectant la géométrie de la pièce. Le tableau 1 présente les temps d'exécution par passe : La vitesse moyenne atteinte avec la méthode DTIS est plus de deux fois plus élevée qu'avec le meilleur format BSpline.

Ainsi qualitativement, ces fluctuations d'avance, superposées à la facettisation générée par la tolérance d'usinage en FAO laissent des marques ou ondulations sur les 4 premières stratégies. Ces marques sont clairement visibles à l'œil nu et sont révélées par le jeu de reflets de lumière sur l'aspect métallique de la surface. Les principales marques, annotées par des vaguelettes jaunes sur la gauche de la figure 7 correspondent spatialement, soit avec les long segments G1, soit avec les zones de fort ralentissement.

Le gain simultané sur les écarts géométriques et la fluidité de la vitesse d'avance lors de l'exécution obtenus avec la méthode DTIS exécutée sur la CN PREMIUM Open CNC permet une nette amélioration de la qualité de la surface usinée.

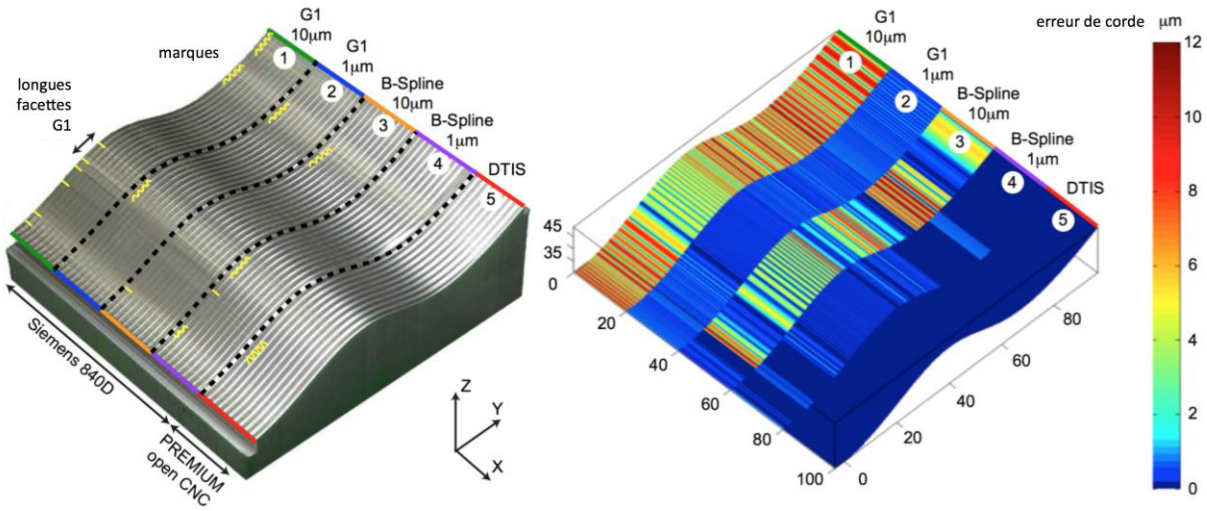


Fig. 7 : Photo de la surface usinée avec marques (gauche) et écarts FAO(droite)

5 Conclusion

Laméthode DTIS, fusionne deux étapes classiques du processus d'usinage que sont le calcul de trajectoire sur un modèle CAO, puis son interpolation temporelle dans la CN. Cette fusion permet de supprimer toute limitation liée au format de description de la trajectoire ainsi qu'à la tolérance de flèche (ou d'usinage). Ainsi, il n'y a plus d'erreur de corde induite sur la surface usinée par ces deux facteurs, ce qui améliore la qualité en terme géométrique sans dégrader la vitesse de parcours. L'implémentation de cette méthode sur une CN ouverte et sa mise en œuvre sur centre UGV industriel atteste des gains apportés. Pour rendre ces marges de progrès accessibles industriellement, il faut permettre une nouvelle définitionet génération des trajets d'usinage dans les commandes numériques, notamment par le développement de CN et d'algorithmescompatibles avec le standard STEP-NC.

Références

[1] Y. KOREN, R.-S. LIN, 1995, *Five-axis surface interpolators*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, N°44(1), p. 379-382.
[2] X. LI, H. LIANG,2011,*Development of a STEP-NC controller for 5-axis machining of NURBS surfaces*. Advanced Materials Research, N°317-319, p. 1940-1948.
[3] H. LIANG, X. LI, 2013,*Five-axis STEP-NC controller for machining of surfaces*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, N°68(9-12), p. 2791-2800.
[4] X. BEUDAERT, S. LAVERNHE, C. TOURNIER, 2012, *Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, N°57(0), p. 73-82.
[5] ISO14649-11, 2004,*Industrial automation systems and integration - physical device control - data model for computerized numerical controllers - part 11 : Process data for milling*, ISO14649-11.
[6] X. BEUDAERT, 2013, *Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes*, Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, p. 205.
[7] J. BOBROW, S. DUBOWSKY, J. GIBSON, 1985, *Time-optimal control of roboticmanipulatorsalongspecifiedpaths*, International Journal ofRobotics Research,N°4(3), p3-17

[8] K. SHIN, N. McKAY, 1985, *Minimum time control of roboticmanipulatorswithgeometricpathconstraints*, IEEE Transactions on Automatic Control N°30(6), p. 531-541.