



HAL
open science

Modèles géométriques polynomiaux pour la fabrication

Christophe Tournier, François Thiebaut, Claire Lartigue

► **To cite this version:**

Christophe Tournier, François Thiebaut, Claire Lartigue. Modèles géométriques polynomiaux pour la fabrication. Groupe de Travail en Modélisation Géométrique - GTMG06, LURPA Ecole Normale Supérieure de Cachan, Mar 2006, Cachan, France. hal-01101531

HAL Id: hal-01101531

<https://hal.science/hal-01101531>

Submitted on 8 Jan 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.

Modèles géométriques polynomiaux pour la fabrication

C. TOURNIER – F. THIEBAUT – C.LARTIGUE

LURPA/Ecole Normale Supérieure de Cachan – Université Paris XI
{tournier, thiebaut, lartigue}@lurpa.ens-cachan.fr

Résumé

La qualité de réalisation des moules et matrices de formes complexes dépend de l'aptitude de chacune des activités du processus de conception et de fabrication à modéliser ou produire la géométrie attendue. Il est difficile d'atteindre le niveau de qualité recherché car l'extraction de la géométrie nominale, sa re-modélisation sous forme de trajets d'usinage et son suivi par la commande numérique introduisent de nombreuses approximations. Nous introduisons donc un modèle surfacique de trajectoire d'usinage qui permet de la surface de classe A à l'usinage sur la machine outil de garantir l'exigence de qualité requise et la conformité aux exigences fonctionnelles.

Mots-clés : CFAO, surfaces complexes, génération de trajectoires, interpolation polynomiale

1.Introduction

Dans des secteurs d'activités tels que l'automobile, le flaconnage ou les biens d'équipement, la compétitivité conduit à l'élaboration de produits au design toujours plus novateur et de qualité croissante. Le processus de réalisation des moules et matrices qui permettront d'obtenir ces produits a largement été modifié ces dernières années par l'utilisation de nouvelles techniques comme l'usinage à grande vitesse et la maquette numérique. L'utilisation de l'usinage à grande vitesse permet de limiter les opérations de polissage, par conséquent la forme finale de la pièce est directement associée à la forme usinée par le mouvement de l'outil. L'adéquation entre la forme usinée et la forme attendue par le concepteur dépend de l'aptitude de chacune des activités du processus de conception et de fabrication à modéliser ou produire la géométrie attendue.

La phase de conception à partir des intentions du designer ou des spécifications fonctionnelles permet d'obtenir un modèle CAO. Si on considère le modèle CAO comme le modèle de référence, ds erreurs sont tout d'abord introduites lors de la génération des trajectoires d'usinage. En effet, l'extraction de la géométrie nominale et sa re-modélisation sous forme de trajets d'usinage introduit de nombreuses approximations car le trajet est au mieux une succession de courbes polynomiales raccordées en tangence mais la plupart du temps simplement une suite de segments de droites. Ensuite, les trajets sont communiqués au directeur de commande numérique pour l'usinage. Des problèmes de suivi de trajectoires et de comportement dynamique de l'ensemble machine/pièce/outil viennent perturber la géométrie effectivement réalisée.

Nous allons tout d'abord revenir sur l'élaboration du modèle CAO et sur la génération de trajectoires d'usinage afin d'identifier les écarts introduits par chacune des activités. Ensuite, dans l'objectif de minimiser la dégradation de l'information géométrique, nous présentons le modèle surfacique de trajectoires d'usinage que nous avons développé. Finalement, nous détaillerons la manière avec

laquelle nous avons communiqué ces trajectoires surfaciques au directeur de commande numérique afin de valider notre approche.

1.1. Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe

Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe doit permettre de garantir la fidélité entre la pièce et les spécifications fonctionnelles exprimant l'idée initiale du designer (figure 1). On construit tout d'abord un modèle géométrique à partir des spécifications fonctionnelles qui constitue le modèle de référence de la maquette numérique. Ce modèle doit proposer une représentation tridimensionnelle des différentes contraintes fonctionnelles ou esthétiques qui s'appliquent au produit. Il est le principal vecteur d'information entre tous les métiers qui interviennent sur le produit.

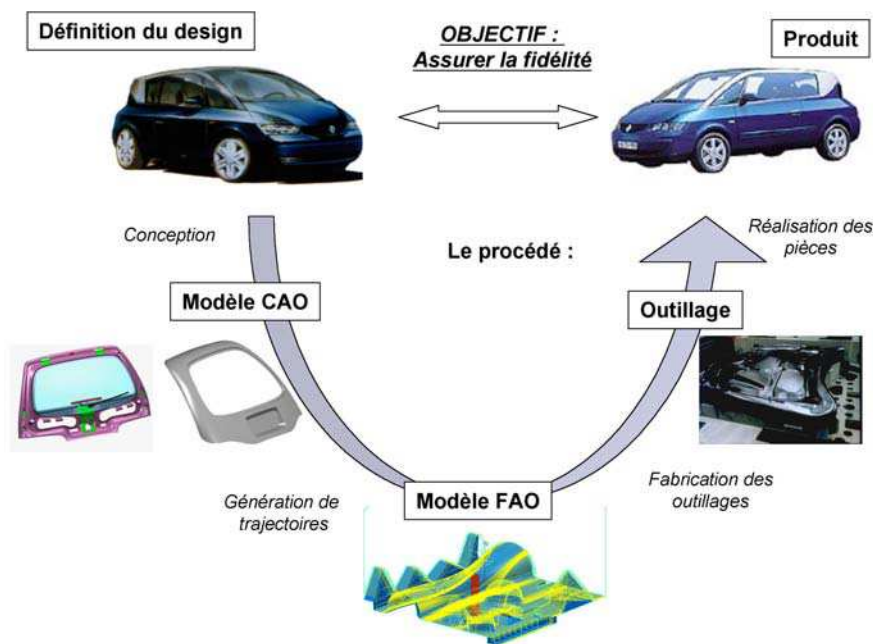


Fig 1: processus de réalisation des formes complexes

Chaque maillon du processus est susceptible d'introduire des écarts entre la géométrie de la pièce réalisée et celle escomptée. Le premier problème est la dégradation de l'information lors de l'expression de l'idée du concepteur en données géométriques dans le modèleur 3D. En effet, les techniques de construction des surfaces restent limitées, elles ne permettent pas toujours de réaliser les formes souhaitées par le concepteur ainsi que les raccords nécessaires à un usinage précis. De plus la continuité aux raccords est altérée lors de l'échange de données entre les logiciels de design et ceux de FAO à cause de tolérances numériques différentes.

La construction du produit passe par la déclaration d'éléments géométriques dans le modèleur. Les surfaces simples sont spécifiées par des dimensions caractéristiques telles que des angles et des distances. En ce qui concerne les surfaces complexes, leur construction repose sur l'association de surfaces par interpolation ou approximation d'éléments géométriques tels que des lignes de style ou des lignes d'écoulement hydrodynamique ou aérodynamique, ou bien des nuages de points. Cependant, une telle démarche ne garantit pas la définition univoque d'une surface car entre deux courbes d'interpolation la forme de la surface dépend du mode d'association utilisé.

L'utilisateur est tributaire des fonctionnalités du logiciel mis à sa disposition. La forme résultante ne correspond donc pas forcément à l'intention du concepteur mais est la plus proche représentation

géométrique que le modeler permette d'obtenir. En outre, les contraintes de style ne sont pas exprimées en tant que telles dans le modèle CAO. Elles sont contenues dans l'équation de la surface sans pouvoir en être extraites. Les modifications d'ordre technologique de la forme dans les différentes étapes du processus d'élaboration du produit sont donc susceptibles d'altérer ses propriétés esthétiques.

Les contraintes de style et d'évolution douce tiennent une place importante pour les surfaces complexes et sont pourtant les moins formalisées. Il n'existe aucun critère esthétique objectif ni de spécifications géométriques canoniques pour ces contraintes. Cependant, les outils développés pour valider la qualité de la surface peuvent être utilisés pour spécifier sa forme. Pour l'instant, le seul critère esthétique utilisé est le comportement des lignes de reflet. Ce critère est totalement subjectif et obéit aux tendances esthétiques du bureau de design. D'autre part, le comportement des lignes de reflet sur les pièces fabriquées est utilisé comme critère d'acceptation par certains services de contrôle. La difficulté se situe alors au niveau de la définition des critères qui permettent de conclure sur la qualité de la pièce contrôlée.

1.2. La génération de trajectoires d'usinages

Les activités de génération de trajectoires et de fabrication doivent assurer la réalisation d'un produit fidèle au modèle CAO. Des écarts supplémentaires sont introduits d'abord en FAO lors du calcul de la trajectoire de l'outil, puis lors de l'usinage à cause des performances de la commande numérique, du comportement dynamique de la machine outil et des déformations de l'outil.

L'obtention des pièces de forme gauche se fait soit en fraisage à 3 ou à 5 axes en bout par balayage (figure 2), soit en fraisage à 5 axes par le flanc d'un outil cylindrique ou conique (figure 3). La fabrication d'une pièce nécessite la construction de passes d'usinage et leur juxtaposition en fonction d'une stratégie d'usinage. Le choix des paramètres de discrétisation longitudinal (tolérance de flèche) transversal (hauteur de crête) doit assurer la réalisation d'une surface réelle respectant des spécifications géométriques de défaut de forme et d'état de surface, ainsi que des spécifications fonctionnelles de fidélité à la forme, c'est-à-dire le respect des arêtes vives et des sens de concavité.

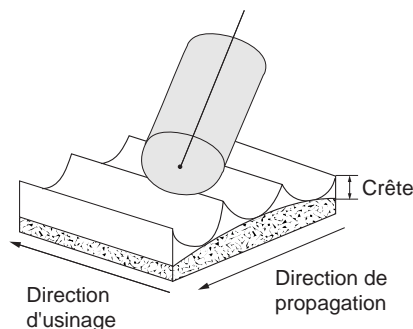


Fig 2 : fraisage en bout

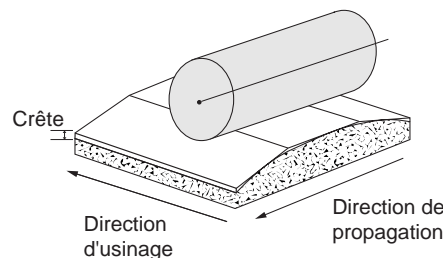


Fig 3 : fraisage en roulant

La surface usinée est un ensemble de sillons ou de surfaces réglées approchant le modèle CAO ou surface nominale. La technique de fabrication retenue génère donc des écarts géométriques avant même la réalisation de l'usinage car le modèle FAO ne représente pas parfaitement le modèle de référence.

Il existe plusieurs manières de générer des trajectoires d'usinage. Citons tout d'abord la méthode de l'offset. Dans le cas de l'outil hémisphérique la surface offset contient l'ensemble des positions du centre de l'outil, qui assure un contact tangent avec la surface à usiner. Cependant il n'est pas possible d'obtenir cette surface dans le cas général sans faire d'approximations. De plus, des problèmes d'auto intersection peuvent apparaître sur la surface offset synonymes de collisions si elles ne sont pas

supprimées. Une alternative est la méthode polyédrique où la surface est maillée. Les calculs pour le passage à l'offset sont alors plus simples car ils sont appliqués à des facettes donc à des plans mais c'est au détriment de la précision d'usinage. Les générateurs implicites sont basés sur l'échantillonnage des positions de l'outil. Une position est calculée puis un contrôle d'interférence entre l'outil et la pièce est effectué avant de rechercher la position suivante selon la stratégie d'usinage retenue. La passe est ainsi construite de proche en proche. Citons également la méthode de l'offset inverse où des positions du centre de l'outil sont calculées à partir d'un ensemble de points de la surface de la pièce par Z-buffer. Cette méthode est notamment utilisée pour usiner une surface à partir d'un maillage ou d'un nuage de points issu de numérisation, ce qui permet de s'affranchir de la reconstruction du modèle CAO.

L'activité de génération de trajectoires consiste donc en une acquisition de la géométrie de la surface nominale décrite dans le modèle CAO et sa transformation en un ensemble de points pilotés. Les propriétés de continuité en tangence ou en courbure de la surface nominale peuvent être perdues et les algorithmes provoquent de nouveaux écarts lors de l'association de la trajectoire du centre de l'outil à cet ensemble de points. La surface enveloppe des mouvements de l'outil ainsi générée ne respecte pas nécessairement les contraintes de forme et de continuité imposées par le concepteur. La perte de qualité survient lors du transfert des spécifications géométriques de la surface nominale à l'ensemble discret des positions admissibles de l'outil.

2. Le concept de la surface d'usinage

La surface d'usinage est une surface qui contient l'ensemble des caractéristiques géométriques nécessaires au pilotage de l'outil, telle que la surface enveloppe du mouvement de l'outil couvrant cette surface donne la forme attendue [DUC98] (figure 4).

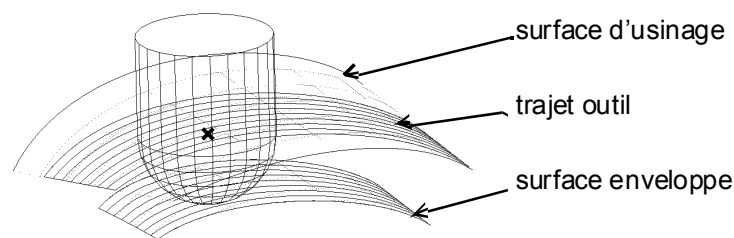


Fig 4 : le concept de la surface d'usinage

Le concept de la surface d'usinage a été développé pour répondre à trois besoins :

- assurer la réalisation d'une pièce fidèle aux contraintes fonctionnelles initiales,
- améliorer la qualité des trajectoires d'usinage et leur planification,
- simplifier le pilotage de l'outil sur la trajectoire par la commande numérique.

La construction de la surface d'usinage s'appuie donc sur les éléments géométriques permettant d'obtenir une surface enveloppe répondant aux spécifications fonctionnelles. La surface d'usinage est la représentation surfacique et continue de l'ensemble des positions d'un point particulier de l'outil. La génération de trajectoires consiste alors à tracer des trajets sur la surface d'usinage.

Le concept de la surface d'usinage peut être introduit dans le processus d'élaboration des pièces de formes gauches de deux manières distinctes. Une intégration totale où les contraintes fonctionnelles sont respectées par la surface enveloppe du mouvement de l'outil. La surface d'usinage constitue le modèle FAO et les trajectoires d'usinage résultent d'une planification. Une intégration partielle qui

laisse le processus de conception inchangé mais apporte une modélisation surfacique du trajet d'usinage. C'est le cas des techniques de génération de trajectoires par la méthode de l'offset en fraisage à 3 axes avec outil hémisphérique. Si l'intégration totale du concept de la surface d'usinage paraît difficile, la modélisation surfacique des trajectoires d'usinage que le concept suggère présente un grand intérêt. D'une part parce que cela apporte de la continuité dans la direction transversale aux trajets d'usinage mais également de la précision d'usinage.

3. Définition de la surface d'usinage en fraisage multi-axes

L'objectif est de déterminer la géométrie de la surface d'usinage en fonction de la géométrie de l'outil et du nombre d'axes utilisés. On rappelle que la surface d'usinage recherchée est le lieu de points fixes de l'outil, permettant sa mise en position à chaque instant et de manière univoque pour un point usiné donné.

3.1. Positionnement de l'outil

Afin de traiter un cas général, nous nous plaçons dans le cadre du fraisage à 5 axes avec un outil torique dont les résultats pourront être appliqués aux autres géométries d'outil. Aussi, si nous souhaitons isoler un point fixe de l'outil afin de le piloter, les rotations de mise en position doivent laisser ce point inchangé tout en assurant un contact tangent entre l'outil et la pièce. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser le point K , situé sur le cercle méridien du tore (figure 5).

Les deux rotations (θ_t, \mathbf{t}) et (θ_n, \mathbf{n}) que nous utilisons pour orienter l'outil sont définies dans le repère $(K, \mathbf{f}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$ avec \mathbf{f} le vecteur tangent à la courbe suivie par le point piloté K . Le point K est alors sur l'axe central du torseur de la rotation instantanée de l'outil par rapport à la surface. Il reste donc fixe au cours des mouvements de rotation de l'outil lors de son orientation.

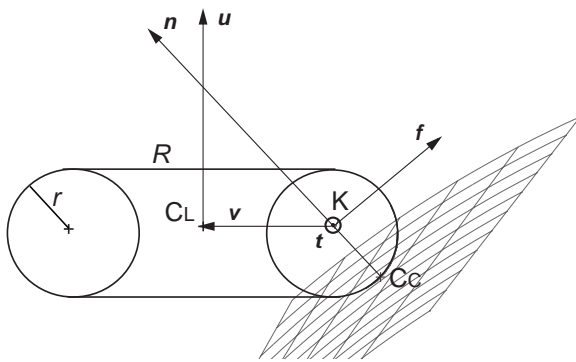


Fig 5 : positionnement de l'outil

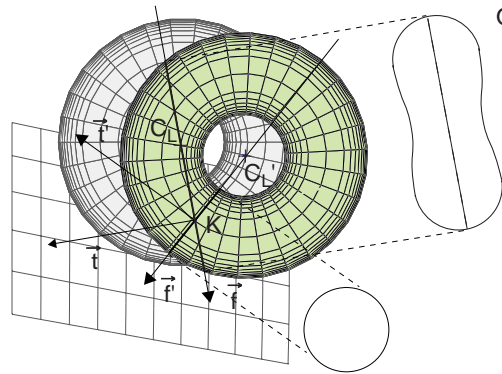


Fig 6 : sections spiriques du tore

Il faut également s'assurer que les deux rotations laissent les plans tangents de l'outil et de la surface au point de contact C_C confondus. En ce qui concerne la rotation (θ_n, \mathbf{n}) , le résultat est immédiat car \mathbf{n} est orthogonal au plan tangent. Pour la deuxième rotation, l'obtention du résultat est à démontrer. On définit tout d'abord la position de l'outil par défaut comme étant celle pour laquelle $\theta_t = \theta_n = 0$ quand les vecteurs \mathbf{u} et \mathbf{n} sont colinéaires et \mathbf{u} est dans le plan défini par $(K, \mathbf{f}, \mathbf{n})$. Cette configuration assure un contact tangent car en n'importe quel point de contact C_C entre l'outil et la surface, la normale à la surface passe par l'axe du tore.

Soit C , le cercle résultant de l'intersection du tore représentant la partie active de l'outil avec le plan $(K, \mathbf{f}, \mathbf{n})$. Ce plan passant par l'axe du tore, C est le cercle de centre K qui engendre le tore par rotation

autour du cercle méridien (figure 5). Le vecteur t est orthogonal au cercle C car orthogonal à (K, f, n) par définition. La rotation autour de t laisse donc le cercle C identique à lui-même, donc la partie active de l'outil reste tangente à la surface, seul le point de contact appartenant à l'outil est modifié. Le point de contact C_C appartenant à la surface est inchangé, l'outil usine toujours le même point. Cependant, l'ordre des rotations est important pour conserver un contact tangent. Dans le cas où la rotation (θ_t, t) a lieu en premier, le point C_C restant inchangé, la normale n est aussi inchangée. La seconde rotation (θ_n, n) laisse donc les plans tangents confondus. Par contre si (θ_n, n) est la première rotation, le plan (K, f, n) n'est plus le plan méridien du tore et l'intersection entre le tore et ce plan est un ovale de Cassini (figure 6). Dès lors la rotation autour de t ne laisse plus la partie active de l'outil identique à elle-même, il y a interférence. Dans ce cas, la rotation doit s'effectuer autour du vecteur t' , image du vecteur t par la rotation (θ_n, n) .

Pour pouvoir positionner l'outil, il nous faut définir au moins un deuxième point fixe de l'outil. Pour cela nous allons utiliser le point C_L tel que $K C_L = v$, avec v le vecteur radial. Il reste alors une rotation possible autour du vecteur radial v . Cependant, il faut remarquer que le vecteur axe outil u et le vecteur radial v restent toujours coplanaires avec le vecteur normal n à la surface au point usiné lors des deux rotations θ_t et θ_n de mise en position de l'outil. En effet, ils sont coplanaires dès le début de la mise en position (par défaut). Ensuite, les deux rotations autour de t et n laissent les vecteurs coplanaires. La connaissance des points K et C_L et du vecteur normal n est suffisante pour positionner l'outil dans l'espace.

3.2. Modèle géométrique de la surface d'usinage

La surface d'usinage est donc constituée de deux surfaces, la surface de guidage S_1 et la surface d'orientation S_2 . (figure 7) La surface de guidage S_1 est le lieu du point K , tel que :

$$K = C_C + r.n.$$

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 [BRE92], dépend entièrement de la stratégie d'usinage retenue.

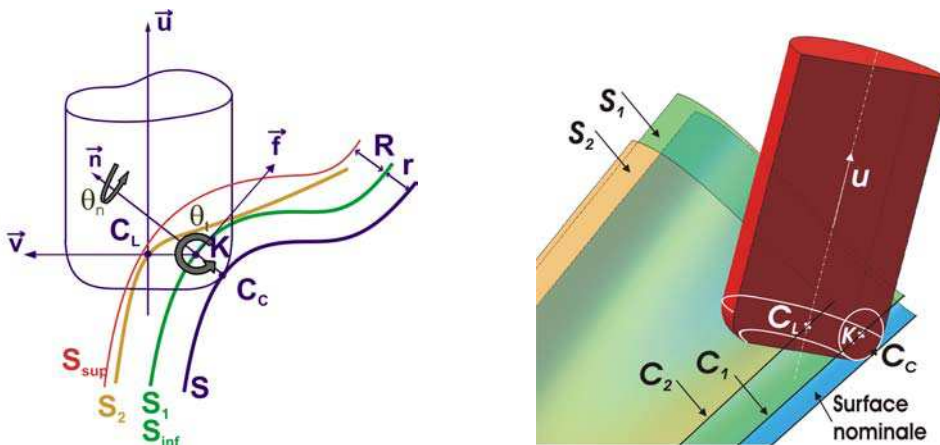


Fig 7 : la surface d'usinage en fraisage à 5 axes avec un outil torique

3.3.Application

L'exemple traité consiste à usiner une surface (carreau de Bézier de degré 5) avec un outil torique ($r = 2 \text{ mm}$ et $R = 5 \text{ mm}$) et la stratégie suivante : fraisage à 5 axes, guidage centre selon des plans parallèles à YOZ et $\theta_t = 5^\circ$ et $\theta_n = 0^\circ$.

La surface de guidage S_1 est construite sous forme de carreaux de Bézier bi-cubiques raccordés en tangence [FAR86]. A titre d'exemple, les valeurs minimum et maximum des écarts entre la surface obtenue et la surface théorique sont de $-3 \mu\text{m}$ et $77 \mu\text{m}$ avec 64 carreaux. Par contre, la surface d'orientation S_2 est modélisée par un seul carreau de Bézier de degré 5 afin d'être en mesure de la déformer le plus simplement possible en agissant sur ses points de contrôle.

La modélisation de la cinématique du déplacement de l'outil sur les deux surfaces S_1 et S_2 a permis de simuler l'usinage de la surface le long du plan de guidage (figure 8).

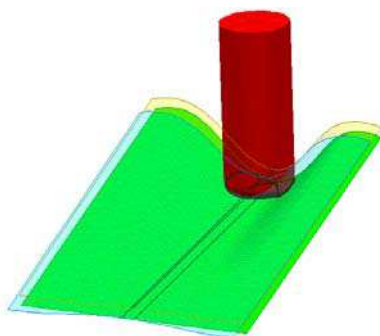


Fig 8 : simulation d'usinage

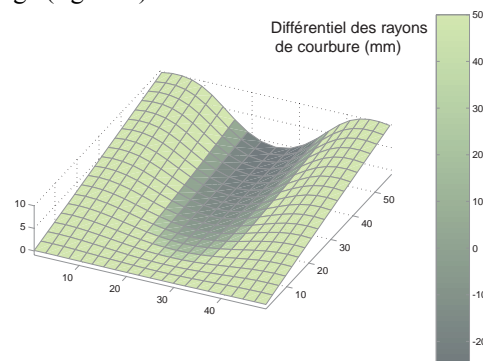


Fig 9 : détection des interférences

Une étude comparative de la courbure de la surface à usiner transversalement au trajet et du rayon effectif de l'outil a été menée afin d'évaluer les interférences à l'image de la méthode développée dans [LEE97]. On peut voir qu'il y a interférence car le rayon effectif de l'outil est plus grand que le rayon de courbure de la surface dans la direction transversale au trajet (figure 9). Autrement dit, l'angle d'inclinaison θ_t dans cette zone est trop petit. La surface d'orientation est modifiée en déplaçant ses points de contrôle afin d'éliminer les interférences (figure 10) mais on pourrait aussi utiliser des méthodes plus intuitives comme celles développées dans [CEL90] et [GUI99] qui minimisent l'énergie de déformation. Le trajet résultant ne présente plus d'interférence et l'angle d'inclinaison augmente au fur et à mesure que l'outil avance (figure 11).

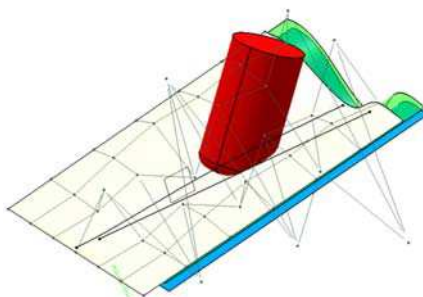


Fig 10 : élimination des interférences

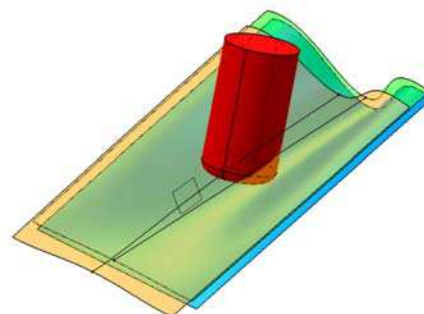


Fig 11 : trajectoire hors collisions

4.L'interpolation surfacique

4.1.Introduction

Une fois les trajectoires générées, elles doivent être communiquées au directeur de commande numérique sous un format d'interpolation compréhensible par ce dernier. Pour l'usinage des surfaces complexes, les trajectoires sont actuellement programmables en interpolation linéaire (figure 12) ou polynomiale (figure 13).

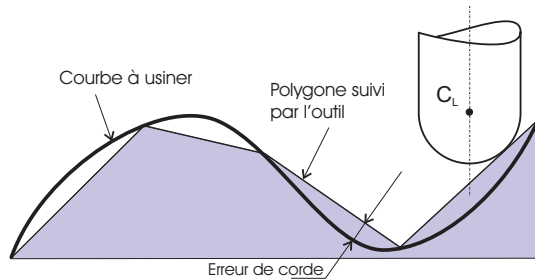


Fig 12 : interpolation linéaire

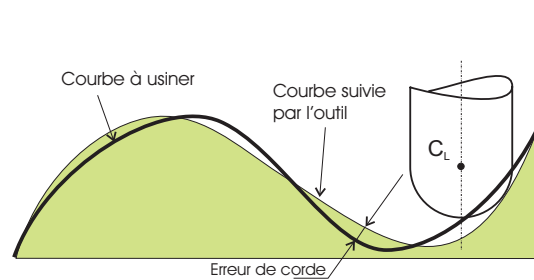


Fig 13 : interpolation polynomiale

Le format d'interpolation linéaire est le plus communément répandu. Les positions de l'outil sont directement retranscrites dans le programme d'usinage et l'outil se déplace en ligne droite d'une position à la suivante. Les posages sont généralement calculés de sorte à respecter la tolérance d'usinage le long d'un trajet et la distance entre passes avec la hauteur de crête. Ainsi l'erreur de flèche entre l'enveloppe du mouvement de l'outil et la surface nominale est nulle en ces quelques posages. Ailleurs sur la surface, les écarts géométriques résultent de la combinaison de la flèche et de la hauteur de crête [TOU01]. Ils forment ce que l'on appelle de la « peau d'orange » (figure 14).

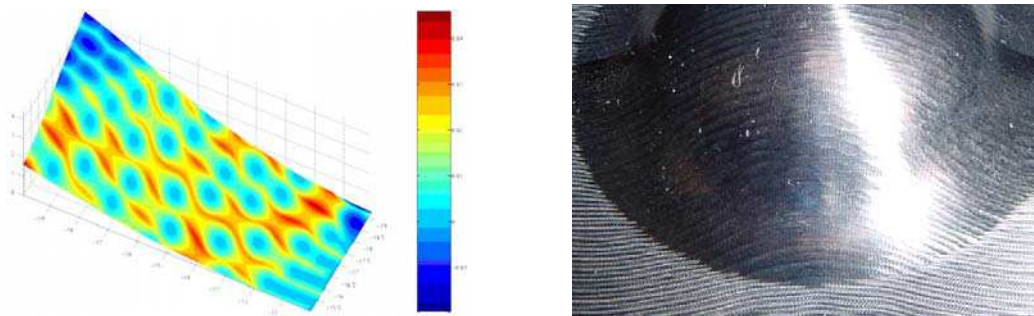


Fig 14 : effet « peau d'orange »

En interpolation polynomiale il s'agit de faire passer une courbe au plus près des positions de l'outil posé sur la pièce. La courbe doit respecter la tolérance d'usinage donnée et son paramétrage doit être en corrélation avec l'abscisse curviligne pour un meilleur suivi de la trajectoire lors de l'usinage. Auparavant, les portions de trajectoires sans discontinuités sont détectées. En effet, il n'est pas concevable qu'un angle vif soit au milieu d'une courbe au moins C^2 , il doit être à la jonction de deux courbes. Pour générer ces courbes, la littérature fournit différents modes d'interpolation : [SHP94], [DUC98], [LAV04]. Les courbes sont généralement données sous forme de B-spline, de NURBS ou de polynôme canonique de degré 3 à 5. Différents tests d'usinage ont été effectués pour comparer les modes de construction des courbes polynomiales à partir des points issus de l'interpolation linéaire : interpolation, approximation des moindres carrés, approximation avec minimisation de l'énergie et

inter approximation. A priori, le critère d'association n'a que très peu d'influence sur l'aspect dynamique en cours d'usinage. Ce type d'interpolation, s'il apporte une amélioration dans le suivi de la trajectoire de part sa continuité et les vitesses d'avances plus grandes qu'il permet d'atteindre, ne résout pas les problèmes d'erreur de flèche et de peau d'orange. En effet, les trajectoires polynomiales ne permettent pas à l'outil d'être constamment « posées » sur la surface à usiner.

4.2.Modèle

L'idée est donc d'utiliser un format de description de trajectoires surfacique en définissant les trajectoires de l'outil comme des courbes appartenant à des surfaces, autrement dit, dans l'espace paramétrique des surfaces (figure 15). Le support le mieux adapté pour cela est d'utiliser la surface d'usinage et plus particulièrement la surface offset lieu d'un point fixe de l'outil. Comme nous l'avons vu précédemment, le passage à l'offset sous forme explicite engendre des écarts géométriques. Cependant, si ces écarts affectent le défaut de forme de la surface d'une manière uniforme et contrôlée, le gain en terme de qualité locale est très important car il minimise ou élimine l'étape de polissage. On peut alors découpler les écarts géométriques du premier ordre (le défaut de forme) des écarts du troisième ordre (la rugosité) et éliminer l'effet « peau d'orange ».

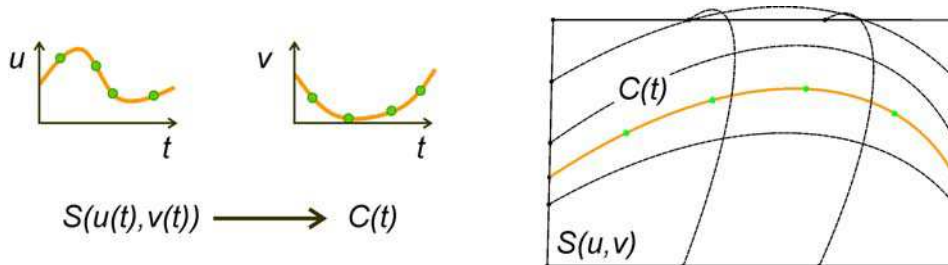


Fig 15 : interpolation surfacique

Il est pour le moment impossible de communiquer de telles courbes à un directeur de commande numérique. En effet, pour un carreau de degré 5 et des trajectoires paramétriques de degré 3, les courbes polynomiales $C(t)$ seraient de degré 16. Nous avons donc exploité les formats de trajectoires disponibles dans les directeurs de commande numérique afin de prouver l'intérêt d'une approche surfacique.

4.3.Expérimentations

La pièce de test proposée est une portion de sphère raccordée à un plan par un tore (figure 16). Ce type de surface permet le passage à l'offset sans approximation. Son usinage s'effectue selon des plans parallèles et les différents types de trajectoires qui en découlent sont décrites sur la figure. Il s'agit d'intersections plan/plan, sphère/plan et tore/plan.

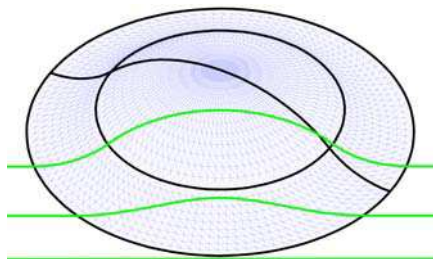


Fig 16 : surface de test

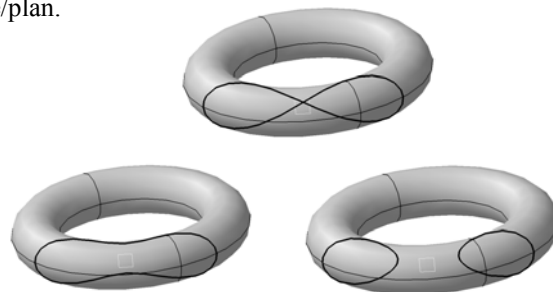


Fig 17 : intersection tore / plans

La pièce paraît relativement simple cependant la partie torique va poser problème. En effet, l'intersection d'un tore et d'un plan ne donne pas une conique mais une quartique. La quartique est plus précisément un Ovale de Cassini, qui selon la distance du plan de coupe au centre du tore est un ovale simple, une lemniscate de Bernoulli ou un ovale double (figure 17). Ce type de courbe peut s'exprimer de manière paramétrique sous la forme :

$$\begin{cases} x = a + \frac{b^4 - 4a^2t^2 - t^4}{4at^2} \\ y = \pm t \sqrt{1 - \left(\frac{b^4 - 4a^2t^2 - t^4}{4at^3} \right)^2} \end{cases}$$

Cependant, le format de courbes NURBS de degré 5 disponible sur la commande numérique utilisée ne nous permet pas de décrire l'Ovale de Cassini de manière exacte. Les portions d'Ovale de la pièce vont donc devoir être approchées, ce qui va entraîner des erreurs de flèche. Ceci est un handicap mais n'est pas contradictoire avec l'objectif fixé. En effet, cette approximation va engendrer un défaut de forme sur la pièce que nous allons tenter de minimiser mais la suppression de l'effet « peau d'orange » sera assuré par la synchronisation en courbure des trajectoires. Le schéma d'association de courbe a donc été une approximation selon les moindres carrés par des courbes de Bézier rationnelles de degré deux avec passage par les extrémités. Les inconnues étant les coordonnées du deuxième pôle ainsi que son poids.

Nous avons comparé notre approche avec l'interpolation linéaire et l'interpolation polynomiale sur la pièce test. La validation virtuelle des avantages du format est montrée grâce à la simulation d'usinage par Z-buffer puis par une validation réelle sur centre d'usinage. On peut voir sur la figure 18 les écarts en interpolation linéaire. En pseudo interpolation surfacique seules subsistent des erreurs de corde (figure 19) car le format d'interpolation utilisé ne permettait pas d'être parfaitement posé sur la surface.

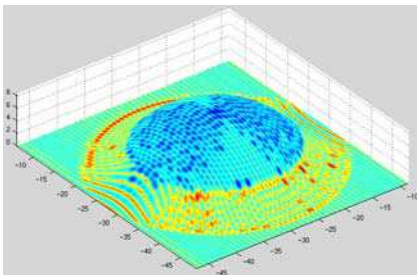


Fig 18 : interpolation linéaire

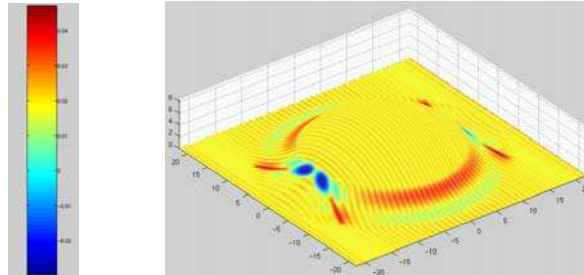


Fig 19 : pseudo interpolation surfacique

5. Conclusions

Le concept de la surface d'usinage permet d'intégrer les contraintes fonctionnelles et de fabrication tout au long du processus de réalisation des pièces de formes complexes. La difficulté d'intégrer le concept dès la phase de conception réside dans la nécessaire connaissance de la géométrie des outils qui vont réaliser la pièce. Une solution envisageable serait d'utiliser un langage déclaratif afin de pouvoir instancier le modèle CAO en fonction des géométries d'outil choisies [SER00]. Cependant les changements culturels engendrés paraissent insurmontables.

Par contre comme nous l'avons montré, son utilisation en tant que modèle surfacique de trajectoire est un moyen d'améliorer la qualité des pièces usinées. Il est le prolongement du format d'interpolation polynomiale qui apporte déjà des améliorations dans le sens longitudinal du trajet.

C'est également un vecteur d'intégration de contraintes d'usinage. En effet, la surface d'orientation en fraisage à 5 axes possède des degrés de liberté que l'on peut exploiter pour prendre en compte les risques de collision, les performances cinématiques des machines outil ou les flexions de l'outil par exemple. Cependant, la déformation de la surface d'orientation est une opération a posteriori. Le choix de la stratégie d'usinage devrait 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.

Références

- [BRE92] E.L. Brechner, General tool offset curves and surfaces, *Geometry processing for design and manufacturing*, SIAM, p. 101-121, 1992.
- [CEL90] G. Celniker, ShapeWright: Finite Element Based Free-form Shape Design, *Ph.D*, MIT, 1990.
- [DUC98] E. Duc, Usinages des formes gauches, contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage, *Thèse de Doctorat*, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1998.
- [LAV04] S. Lavernhe, X. Duan, C. Tournier, C. Lartigue, 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.
- [FAR86] R.T. Farouki, The approximation of non degenerate offset surfaces, *Computer-Aided Geometric Design*, vol. 3, p. 15-43, 1986.
- [LEE97] Y.S Lee, Admissible tool orientation control of gouging avoidance for 5-axis complex surface machining, *Computer-Aided Design*, vol. 29, no. 7, p. 507-521, 1997.
- [GUI99] S. Guillet, Modélisation et construction de formes gauches soumises à des contraintes de conception, *Thèse de Doctorat*, INP Grenoble, Janvier 1999.
- [LEO91] J-C. Leon, Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO, *Hermès*, 1991.
- [SER00] P. Serré, Cohérence de la spécification d'un objet de l'espace euclidien à n dimensions, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Paris, 2000.
- [SHP94] M. Shpitalni, Y. Koren, C.C. Lo, Realtime curve interpolators, *Computer Aided Design*, vol. 26, no. 11, p. 832-838, 1994.
- [TOU01] C. Tournier, Contribution à la conception des formes complexes : la surface d'usinage en fraisage 5 axes isocrêtes, *Thèse de Doctorat*, Ecole Normale Supérieure de Cachan 2001.