



**HAL**  
open science

## Intégration d'un critère de fluidité en génération de trajectoires 5 axes par flanc d'outil

Pierre-Yves Pechard, Julien Chaves-Jacob, Christophe Tournier, Claire Lartigue

► **To cite this version:**

Pierre-Yves Pechard, Julien Chaves-Jacob, Christophe Tournier, Claire Lartigue. Intégration d'un critère de fluidité en génération de trajectoires 5 axes par flanc d'outil. Conception et Production Intégrée 2007, Oct 2007, Rabat, Maroc. hal-01101525

**HAL Id: hal-01101525**

**<https://hal.science/hal-01101525>**

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.

## **Intégration d'un critère de fluidité en génération de trajectoires 5 axes par flanc d'outil**

**Pierre-Yves Pechard<sup>1</sup>, Julien Chaves-Jacob<sup>1</sup>, Christophe Tournier<sup>1</sup>,  
Claire Lartigue<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup> *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 en usinage sur le flanc s'avère d'une très grande rentabilité par rapport à l'usinage en bout par balayage des formes complexes. C'est pourquoi les industriels se tournent de plus en plus vers ce procédé pour gagner des parts de marché même si les surfaces considérées ne sont pas développables ni même réglées. Aussi cet article présente l'application d'une approche qui permet de produire une trajectoire d'usinage minimisant les écarts géométriques par rapport à la surface nominale mais aussi les oscillations. Cette approche se base sur un modèle surfacique de la trajectoire d'usinage qui montre tout son intérêt pour assurer une trajectoire fluide et continue en courbure. Après avoir effectué un état de l'art des différentes méthodes de positionnement d'un outil sur le flanc, nous présentons notre approche et un exemple d'application sur lequel un logiciel de FAO a échoué. Les deux approches sont comparées en termes d'écarts géométriques et de fluidité de la trajectoire. Enfin des pistes de progrès permises par l'approche surfacique sont proposées.*

*MOTS-CLÉS : fraissage 5 axes, surfaces réglées, formes gauches, UGV.*

---

## 1. Introduction

Le développement de l'Usinage Grande Vitesse à 5 axes des surfaces complexes et le recours systématique à la chaîne numérique permettent d'améliorer la productivité et la qualité des produits réalisés. Plus particulièrement, l'usinage à 5 axes sur le flanc de l'outil permet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière et d'obtenir de meilleurs états de surface comparativement à l'usinage en bout. Ce procédé est largement employé pour l'usinage de pièces de machines hydrodynamiques ou aérodynamiques.

Cependant, les avantages de ce procédé poussent les industriels à essayer d'usiner sur le flanc des surfaces réglées non développables mais également des surfaces quelconques pour lesquelles les algorithmes développés ne conviennent plus. En effet, les méthodes de génération de trajectoires d'usinage 5 axes sur le flanc sont nombreuses mais se focalisent surtout sur la gestion locale des interférences entre l'outil et la pièce. Il en résulte des trajectoires saccadées, comportant des oscillations néfastes au bon déroulement de l'usinage.

Le LURPA a développé une méthode de génération de trajectoires d'usinage, basée sur la notion de surface d'usinage, applicable en fraisage à 5 axes en bout et sur le flanc. Cette approche, outre la gestion globale des interférences entre l'outil et la pièce doit permettre de mieux gérer l'apparition des oscillations le long de la trajectoire. Ainsi cet article se propose de démontrer l'intérêt de l'approche « surface d'usinage » dans un contexte d'usinage à grande vitesse.

Après une présentation des méthodes issues de la littérature, nous expliciterons le modèle surfacique et son intérêt. Ensuite, sur un cas réel, nous montrerons un exemple de défaillance des algorithmes mis en œuvre dans les logiciels de FAO. Nous traiterons ce même exemple avec les outils de génération de trajectoires et de certification développés au laboratoire. Enfin nous envisagerons les futurs développements de notre approche.

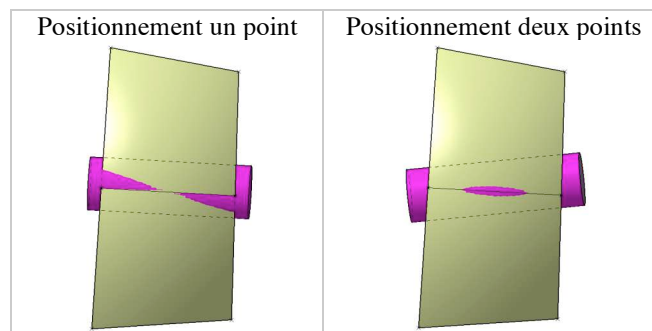
## 2 Les méthodes d'usinage par flanc d'outil

Dans cette partie, nous présentons les différentes méthodes de la littérature pour réaliser un usinage sur le flanc. Des travaux ont montré que l'usinage par flanc d'outil d'une surface réglée non-développable ne peut se faire sans interférence qu'avec un outil de rayon nul [Reishteiner 1993]. C'est pourquoi l'objectif principal de la plupart des méthodes de calcul de trajectoires proposées dans la littérature est de minimiser l'écart entre la surface usinée et la surface à usiner. De plus, dans un contexte d'Usinage à Grande Vitesse, la trajectoire calculée doit être la plus « lisse » possible afin de ne pas solliciter la structure de la machine.

On distingue deux grands types d'approches pour générer des trajectoires d'usinage sur le flanc de surfaces réglées ou quelconques. D'une part les méthodes

qui tentent de poser l'outil sur la surface tout en minimisant les erreurs (interférences positives et négatives) et d'enchaîner ces positions pour former une trajectoire. D'autre part les méthodes qui approximent la surface à usiner par des surfaces réglées développables et qui ensuite génèrent des trajectoires sur ces surfaces de substitution.

En ce qui concerne la première approche, les différentes méthodes de positionnement de l'outil peuvent être classifiées selon la nature du contact local entre l'outil et la surface. On peut remarquer que la nature du contact outil/surface a évolué de manière à minimiser l'erreur entre la surface à usiner et la surface effectivement usinée (Fig.1). En effet, les méthodes sont passées du positionnement par un point [Liu 1995] [Rubio 1998], au positionnement par deux points [Liu 1995] [Bedi *et al* 2003] puis par trois points [Senatore *et al* 2005] et enfin par trois tangentes [Menzel *et al* 2004].



**Figure 1.** méthodes de positionnement outil/surface

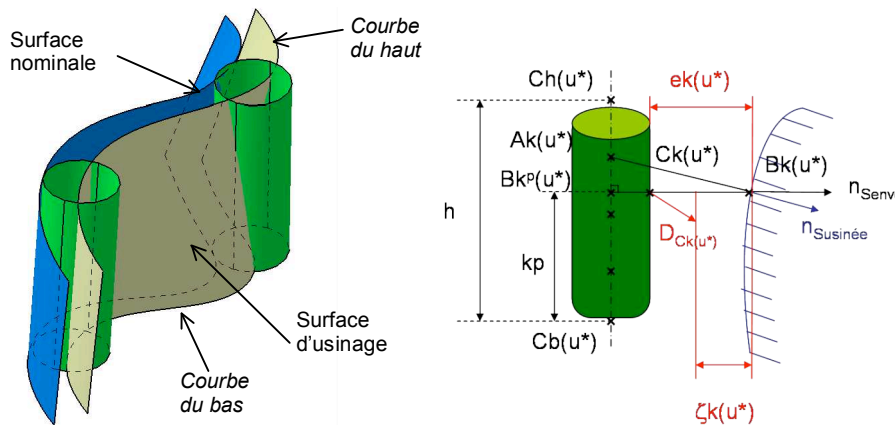
Malgré l'importance des interférences dans le cadre du posage par un point, qui restent assez grandes si la surface est fortement non développable, cette méthode reste la base de nombreux algorithmes de génération de trajectoires par flanc d'outil car elle permet de toujours obtenir un résultat quelle que soit la nature de la surface. De plus, les méthodes s'appuyant sur deux points au moins peuvent provoquer un repliement de la trajectoire de l'outil qui risque d'altérer la surface usinée. Cette évolution implique également des temps de calculs de plus en plus longs. Néanmoins, l'ensemble des solutions proposées traite le problème d'interférence de manière locale augmentant le risque d'oscillation de la trajectoire lors de l'enchaînement des positions.

La deuxième approche s'appuie sur l'élaboration d'une surface de substitution. La nature de celle-ci diffère selon les méthodes : carreaux de Bézier développables raccordés en tangence [Chu *et al* 2005] ou surfaces réglées (développables ou non) [Elber 1997], [Han *et al* 2001]. Le problème de la maîtrise des écarts subsiste, mais la trajectoire calculée est a priori plus lisse sur un carreau car le calcul est plus global. Cependant, l'enchaînement de l'usinage des différents carreaux de substitution peut provoquer à nouveau des discontinuités dans la trajectoire.

Cette première analyse montre de plus, que la plupart des méthodes de positionnement outil/surface ne sont employées que dans un contexte d'usinage de surfaces mono-carreau. De plus, aucune d'elles ne permet de contrôler l'évolution douce de la trajectoire de l'outil.

### 3 Approche surfacique pour la génération de trajectoires 5 axes sur le flanc

L'approche que nous proposons s'attache plus à l'amélioration d'un positionnement initial qu'à un calcul local et consiste à minimiser les écarts localement ou globalement en déformant la trajectoire de l'outil [Lartigue *et al* 2003]. Elle s'appuie sur une modélisation surfacique des trajectoires d'usinage [Duc *et al* 1999], la surface d'usinage. La méthode consiste à modéliser la surface lieu des axes de l'outil par une surface réglée dont la règle est l'axe de l'outil (Figure 2). La trajectoire de l'outil est donc composée de deux courbes, les deux directrices de la surface réglée ou courbes guides. Nous parlerons de la « courbe du bas » pour le point piloté et de la « courbe du haut » pour un point situé sur l'axe outil.



**Figure 2.** La surface d'usinage ; Le calcul des écarts

Dans la méthode proposée, la surface d'usinage initiale est calculée par une méthode de positionnement quelconque parmi celles vues précédemment ou par un logiciel de CFAO. La trajectoire d'usinage est décrite sous la forme de coordonnées du point piloté ( $X_{pr}$ ,  $Y_{pr}$ ,  $Z_{pr}$ ) et de l'orientation de l'axe de l'outil par ses cosinus directeurs ( $i$ ,  $j$ ,  $k$ ) dans le repère pièce. Ensuite, les positions de l'outil le long des trajectoires générées sont extraites afin de construire une première surface d'usinage. Pour cela, nous associons une courbe polynomiale de type Bspline cubique aux « points du bas » et une seconde aux « points du haut ».

Enfin, la déformation de la surface d'usinage est réalisée par un calcul de minimisation des écarts entre la surface à usiner et la surface enveloppe de l'outil. La

méthode théorique proposée est basée sur le calcul de la surface enveloppe de l'outil par une approche cinématique. Néanmoins en pratique, pour des raisons de simplicité, cette surface enveloppe est également approchée. Ainsi, les écarts  $e_k(u^*)$  sont calculés par une double projection (Figure 2). En particulier nous faisons l'hypothèse suivante :

$$e_k(u^*) = C_k(u^*)B_k(u^*) = B_k(u^*)B_k^p(u^*) - r_{outil} \quad (1)$$

La minimisation des écarts est réalisée par application d'un petit déplacement aux points de la surface enveloppe. Les déplacements de points de la surface enveloppe sont ensuite exprimés en fonction des déplacements des points de contrôles des courbes guides de la trajectoire. Pour cela nous assimilons le déplacement du point  $B_k(u^*)$  à celui de  $C_k(u^*)$ . On peut donc exprimer les écarts après déplacements  $\xi_k(u^*)$  par :

$$\xi_k(u^*) = e_k(u^*) - \mathbf{D}_{B_k(u^*)} \cdot \mathbf{n}_k(u^*) \quad (2)$$

On cherche alors les déplacements des points de contrôle qui minimisent la somme des carrés des écarts  $\xi_k(u^*)$ .

Cette méthode permet ainsi une minimisation globale des écarts entre l'outil et la surface à usiner pour assurer la qualité géométrique attendue. De plus, le caractère fluide de la trajectoire est en partie assuré grâce à la continuité géométrique des courbes polynomiales de type Bsplines utilisées.

En terme de fluidité, on distingue la fluidité du trajet suivi par le point piloté et la fluidité de l'évolution de l'orientation de l'axe de l'outil. La première dépend du comportement de la « courbe du bas », c'est-à-dire de la trajectoire du point piloté. Le format de courbe utilisé (polynomial), le type d'association de courbes utilisé (l'approximation) et le faible degré de la courbe (cubique) permettent d'assurer une fluidité satisfaisante de la trajectoire dans l'espace de la pièce. Par ailleurs il serait possible d'utiliser un algorithme d'association de courbes Bspline qui intègre directement la minimisation de l'énergie de déformation [Lavernhe *et al* 2004]. La seconde dépend de l'allure et de la synchronisation de la « courbe du bas » et de la « courbe du haut ». A priori, un paramétrage proportionnel à la longueur de corde des courbes guides permet également d'éviter les points stationnaires et donc les retours en arrière de l'outil ou les déplacements « en crabe ».

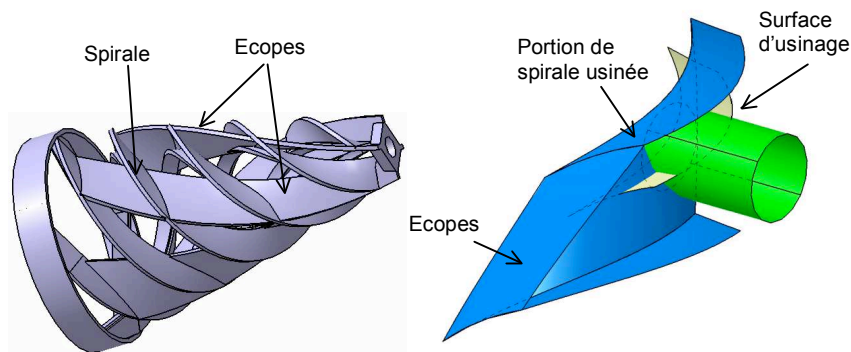
Nous proposons dans le paragraphe suivant un exemple pour lequel les algorithmes des logiciels de CFAO génèrent des oscillations de l'orientation de l'axe de l'outil néfastes à l'usinage et des écarts géométriques conséquents. Nous appliquerons sur le même exemple la méthode développée afin de comparer les résultats, du point de vue géométrique mais également de la qualité de la trajectoire.

#### 4 Application

L'exemple proposé est l'usinage d'une partie de la structure d'une pompe hydraulique. Celle-ci est composée de la spirale et d'écopes permettant de rigidifier la spirale mais aussi de participer à l'entraînement du fluide (Figure 3).

La stratégie d'usinage retenue consiste à usiner chaque caisson de façon indépendante (Figure 3). Les principales difficultés que pose l'usinage du caisson sont l'usinage de chacun des flancs qui sont réglés mais non développables et le passage entre deux carreaux, car notre caisson test est composé de plusieurs carreaux. On s'intéresse plus particulièrement à l'usinage d'un flanc du caisson. La stratégie d'usinage retenue dans le logiciel de CFAO est un balayage multi-axes avec outil torique de diamètre  $R=10$  mm et une erreur de corde de  $0,01$  mm.

Une fois les trajectoires calculées, elles sont traitées par le post-processeur afin d'être communiquées à la commande numérique.



**Figure 3.** Représentation de la pompe et de l'usinage d'un caisson isolé

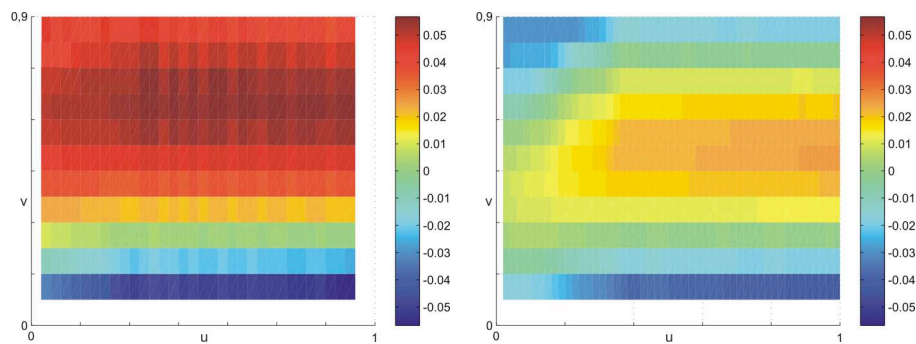
##### 4.1 Analyse des écarts géométriques

À partir des points du programme correspondant à la trajectoire initiale issue du logiciel de CFAO, nous avons calculé les écarts géométriques par rapport à la surface nominale. La simulation est basée sur la méthode de la double projection proposée dans la partie précédente. Les résultats de la simulation (Figure 4a) montrent que les écarts sont importants puisque leur amplitude est de  $0,12$  mm environ. On remarque également que le positionnement de l'outil s'est fait majoritairement en interférence locale positive puisque les écarts sont surtout positifs.

Nous avons appliqué notre méthode en nous appuyant sur la trajectoire initiale pour définir une surface d'usinage initiale. À l'issue de cette première étape nous

avons évalué à nouveau les écarts géométriques. Les écarts constatés sont relativement similaires à ceux de la figure 4a et n'ont donc pas été représentés. La phase d'approximation n'apporte pas d'amélioration en termes d'écarts géométriques.

Nous avons ensuite procédé à l'étape d'optimisation par la méthode proposée. Les écarts sont à nouveau calculés (Figure 4b) et l'on peut constater que leur amplitude a diminué pour s'établir à 0,06 mm. De plus on remarque que le critère des moindres carrés répartit les écarts aussi bien en interférences positives qu'en négatives. Enfin la somme des carrés des écarts est divisée par 10 environ.

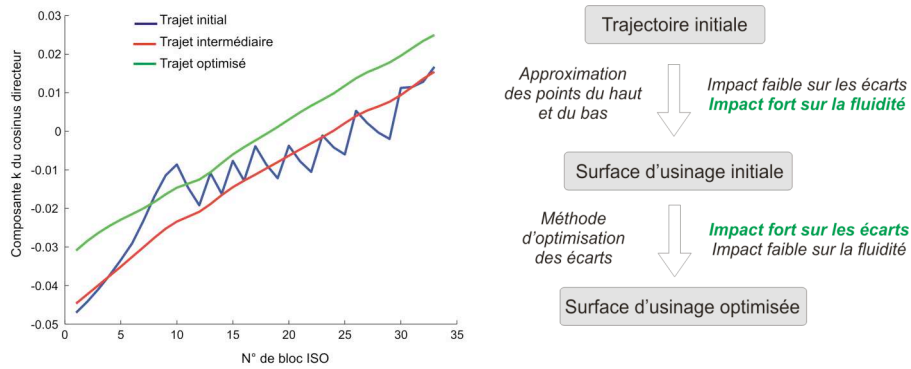


**Figure 4.** (a) écarts initiaux, (b) écarts optimisés (en mm)

#### 4.2 Analyse de la fluidité des trajectoires

Nous nous intéressons maintenant au comportement géométrique de la trajectoire calculée en terme de fluidité. Pour cela nous évaluons deux paramètres. Le premier paramètre étudié est l'orientation de l'axe de l'outil tout au long de la trajectoire, et en particulier l'évolution des cosinus directeurs de l'axe de l'outil dans le repère pièce. Dans le cas de la trajectoire initiale calculée par le logiciel, on constate la présence d'oscillations sur la composante  $k$  de l'orientation de l'axe de l'outil (Figure 5a). Après observation, on peut déduire que ces oscillations sont dues principalement au pivotement de l'outil autour de la direction d'avance pour contrôler les interférences avec la surface. On retrouve là l'inconvénient majeur des méthodes de positionnement local des outils sur les surfaces non développables. En ce qui concerne les trajectoires intermédiaires et optimisées, on peut voir une nette amélioration concernant l'évolution de la composante  $k$  après application de notre approche.





**Figure 5.** (a) analyse de la composante  $k$  des cosinus directeur de l'axe outil, (b) évolution des caractéristiques selon les étapes

Le deuxième paramètre est l'énergie de déformation de chacune des courbes guides de la surface d'usinage. L'énergie de déformation  $E^1$  d'une courbe paramétrique  $C(t)$  dépend de la courbure  $\kappa$  de la courbe et est donnée par l'équation suivante :

$$E = \int_l \kappa^2(s) ds = \int_l \left( \frac{|C' \wedge C''|}{|C'|^3} \right)^2 |C'| dt \quad (3)$$

Pour chacune des trois trajectoires correspondant aux trois étapes principales de la méthode d'optimisation, nous avons calculé l'énergie de déformation des courbes du bas et du haut (Tableau 1). Pour information, l'énergie de déformation  $E$  d'une courbe rectiligne est nulle. L'énergie de déformation de la trajectoire initiale a été calculée sur des courbes Bsplines obtenues par interpolation des points de la trajectoire initiale. On remarque que dès l'étape intermédiaire, c'est-à-dire après approximation de la trajectoire initiale par des courbes Bsplines, l'énergie de déformation a déjà été divisée par 6 pour la courbe du bas et par 10 par la courbe du haut. Par contre, l'étape d'optimisation n'apporte pas d'amélioration au niveau de l'énergie de déformation. Les résultats obtenus sont cohérents avec l'évolution des cosinus directeurs étudiés précédemment. L'énergie de déformation apparaît donc comme un bon indicateur de fluidité des trajectoires.

<sup>1</sup> L'énergie de déformation d'une courbe n'est pas homogène à des joules mais à des  $m^{-1}$ . Aussi pour plus de clarté, nous ne mettrons pas d'unités.

|                                  | <i>Courbe du bas</i> | <i>Courbe du haut</i> |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <i>Trajectoire initiale</i>      | <i>0,1334</i>        | <i>0,1709</i>         |
| <i>Trajectoire intermédiaire</i> | <i>0,0203</i>        | <i>0,0154</i>         |
| <i>Trajectoire optimisée</i>     | <i>0,0207</i>        | <i>0,0151</i>         |

**Tableau 1.** *Energie de déformation*

## 5 Conclusions et perspectives

Nous avons montré sur un exemple qu'il existe des cas complexes où les algorithmes implantés dans les logiciels de CFAO génèrent des trajectoires 5 axes sur le flanc défailtantes. Ces défaillances sont dues à la méthode de posage de l'outil utilisée, en l'occurrence la méthode locale. L'approche surfacique proposée permet d'assurer le respect des écarts géométriques et l'absence d'oscillation sur la trajectoire du point piloté ou sur l'orientation de l'axe de l'outil. On remarque que ces deux caractéristiques ne sont pas atteintes lors de la même étape (Figure 5b). Cette approche nous paraît suffisamment robuste pour envisager l'utilisation de l'usinage sur le flanc de l'outil pour usiner n'importe quelle surface, même non réglée.

Par ailleurs, l'expérience montre qu'à vouloir un posage précis de l'outil, on dégrade la fluidité de la trajectoire dans l'espace de la pièce avec des méthodes s'appuyant sur un posage local. Même s'il est possible de corriger ces problèmes de fluidité avec un post-traitement et l'utilisation d'un format polynomial pour décrire la trajectoire ou pour piloter les axes de la machine (Lavernhe *et al* 2004), des problèmes peuvent subsister dans l'espace machine au travers des variables articulaires : changement d'espace de solution, passage près des singularité, limites des caractéristiques MO-CN, etc. (Tournier *et al* 2006) Il est alors nécessaire de remonter ces problèmes lors de la génération des trajectoires afin d'avoir un modèle d'écart plus réaliste et une conception de la fluidité des trajectoires en accord avec les caractéristiques de la machine utilisée.

D'un point de vue des écarts géométriques tolérés par l'utilisateur lors de la programmation, il serait intéressant qu'il puisse choisir la façon dont les écarts seront répartis par rapport à la surface nominale. C'est-à-dire de privilégier la répartition des écarts selon un critère de son choix.

## Références

- Bedi S., Mann S., Menzel C., Flank milling with flat end milling cutters, *Computer-Aided Design*, 35(3), pp. 293-300, 2003.
- Chu C-H., Chen J-T., Tool path planning for five-axis flank milling developable surface approximation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(7-8), pp. 707-713, 2006.
- Duc E., Lartigue C., Tournier C., Bourdet P., A new concept for the design and the manufacturing of free-form surfaces : the machining surface, *Annals of the CIRP*, 48(1), pp. 103-106, 1999
- Elber G., R. Fish, 5-axis freeform surface milling using piecewise ruled surface approximation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(3), pp. 383-387, 1997.
- Han Z., Yang D.C.H., Chuang J-J., Isophote-based ruled surface approximation of free-form surfaces and its application in NC machining, *International Journal of Production Research*, 39(9), pp. 1911-1930, 2001.
- Lartigue C., Duc E., Affouard A., Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelope surface, *Computer-Aided Design*, 35(4), pp. 375-382, 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.
- Lavernhe 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.
- Liu X-W., Five-axis NC cylindrical milling of sculptured surfaces, *Computer Aided Design*, 27(12), pp. 887-894, 1995.
- Menzel C., Bedi S., Mann S., Triple tangent flank milling of ruled surfaces, *Computer Aided Design*, 36(3), pp. 289-296, 2004.
- Rehsteiner F., Collision free five-axis milling of twisted ruled surfaces, *Annals of the CIRP*, 42(1), pp. 457-461, 1993.
- Rubio W., Lagarrigue P., Dessin G., Pastor F., Calculation of tool paths for a torus mill on free-form surfaces on five-axis machines with detection and elimination of interferences, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(1), pp 13-20, 1998
- Senatore J., Monies F., Redonnet J-M., Rubio W., Analysis of improved positioning in five-axis ruled surface milling using envelope surface, *Computer Aided Design*, 37(0), pp. 989-998, 2005.
- Tournier C., Castagnetti C., Lavernhe S., Avellan F., Tool path generation and post-processor issues in five-axis high speed machining of hydro turbine blades, *The 5th International Conference on High Speed Machining*, pp.500-510, March 2006.