

POLISSAGE AUTOMATIQUE DE MOULES D'INJECTION PLASTIQUE SUR CENTRE D'USINAGE 5 AXES

Xavier PESSOLES, Christophe TOURNIER

LURPA ENS Cachan, 61 av du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex
xavier.pessoles@lurpa.ens-cachan.fr, christophe.tournier@lurpa.ens-cachan.fr

Résumé : *Dans l'industrie de la fabrication des moules pour l'injection plastique, la réalisation de surfaces «poli miroir» est indispensable pour obtenir des pièces transparentes ou des surfaces dépourvues de rayures. Traditionnellement réalisé manuellement, nous proposons d'automatiser le polissage sur centre d'usinage 5 axes, moyen maintenant répandu chez les fabricants de moules. Notre méthode s'appuie sur l'utilisation d'outils classiquement utilisés pour le polissage manuel. D'autre part l'expérience des polisseurs nous permet de développer des trajectoires dédiées, basées sur l'utilisation de courbes fractales et de courbes trochoïdales. La maîtrise de l'effort de polissage est assurée par la mesure des jauges outils en effort. Notre procédé a été testé sur centre de fraisage 5 axes UGV Mikron UCP 710. Enfin la mesure des états de surface nous permet de comparer les écarts entre deux pièces polies automatiquement et une pièce polie manuellement.*

Mots clés : moules d'injection plastique, polissage, Usinage Grande Vitesse, fractales, trochoïdes.

Abstract: *In the plastic injection mold industry, "mirror-effect" polished surfaces are required for obtaining transparent parts or surfaces without scratches. Traditionally done manually, we propose to automate polishing on 5-axis machining center now available in mold manufacturers' workshops. Our method relies on the use of tools typically used for manual polishing. Furthermore, the experience of polishers allows us to develop dedicated trajectories based on the use of fractal and trochoidal curves. Polishing force control is done by measuring the tools load regarding its length parameter and its orientation. Our process has been tested on a 5-axis milling center Mikron UCP 710. Finally surface measurements allow us to compare the differences between two automatically polished parts and a manually polished one.*

Keywords: plastic injection molds, polishing, High Speed Milling, fractals, trochoidal curves.

1. Introduction

L'arrivée de l'usinage grande vitesse (UGV) a profondément bouleversé l'industrie de la fabrication des moules d'injection plastique. Cette technologie a permis de diminuer les temps de production en se substituant à l'électroérosion lorsque la géométrie des moules le permet. Peu à peu des centres UGV 5 axes apparaissent dans les ateliers de production car ils permettent non seulement de réaliser des surfaces qui n'étaient pas accessibles en trois axes mais aussi une amélioration de la qualité des surfaces usinées. Nous nous intéressons ici à la réalisation de surfaces dites «poli miroir» dans des aciers traités à 50 HRc sur des centres UGV 5 axes. De tels états de surface sont nécessaires pour réaliser des pièces transparentes ou parfaitement lisses. D'un point de vue économique, le polissage est un procédé coûteux pour lequel on a souvent recours à des entreprises sous-traitantes. L'externalisation de cette compétence provoque également une hausse du temps de cycle de réalisation d'un outillage. Ce sont donc les raisons pour lesquelles nous proposons une automatisation du procédé en utilisant les moyens technologiques disponibles chez les fabricants de moules.

Classiquement le polissage automatisé est réalisé par des robots anthropomorphiques [1-4]. Ces robots présentent l'avantage de pouvoir accéder facilement à chaque surface de la pièce compte tenu de leur mobilité et de pouvoir recevoir une grande variété d'outillage et plus particulièrement des moteurs pneumatiques et des systèmes d'asservissement de la position en effort. Cependant, des études ont aussi été menées sur des centres de fraisage avec des équipements spécifiques pour contrôler l'effort de polissage [5,10]. En effet, on constate que le taux d'abrasion augmente quand l'effort de polissage augmente [6,11], ce qui permet de supprimer les marques et les crêtes laissées par les opérations de fraisage ou de polissage précédentes. Cependant, cet effort doit être maîtrisé afin d'éviter de créer des écarts géométriques de forme ou d'ondulation. C'est pour cela qu'ont été développés des systèmes de gestion dynamique des efforts de polissage [2,6,7,9].

D'après Ryuh et al. [2], les trajectoires de polissage doivent être multidirectionnelles car les trajets unidirectionnels produisent davantage d'erreurs d'ondulation. De plus le polissage multidirectionnel est proche de ce qui est fait manuellement. L'observation des polisseurs permet d'identifier des motifs qui s'apparentent à des trochoïdes (figure 1). Ils s'efforcent aussi de modifier constamment l'orientation de la pièce afin de ne pas faire apparaître des rayures dans un sens privilégié. C'est la raison pour laquelle certains articles utilisent des trajectoires fractales de Peano (ou courbes de remplissage) [2,7,12] alors que d'autres préfèrent utiliser des balayages 3D [3,9].

Certains auteurs ont également établi des plans d'expériences [8,10] afin d'évaluer l'efficacité du polissage en fonction de l'effort de polissage mais également de la fréquence de rotation de l'outil, de la vitesse d'avance ainsi que de la taille du grain utilisé. Le critère pour évaluer l'efficacité du polissage est alors le Ra, critère 2D. Cependant, la mesure des critères d'états de surface sur des surfaces polies constitue un véritable problème. En effet, les critères 2D n'ont plus de sens sur une surface. De plus, la profondeur des rayures étant de l'ordre du nanomètre, il est donc difficile de trouver des appareils permettant d'atteindre une telle précision.

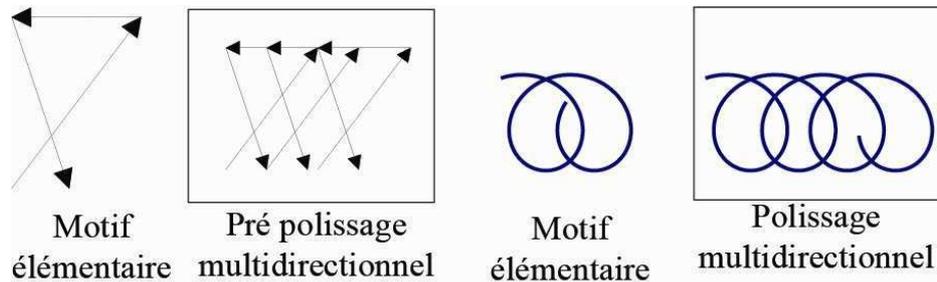


Fig. 1 : Motifs de polissage manuel.

Cette communication s'articule donc de la façon suivante. Dans un premier temps, nous exposerons les caractéristiques de l'outillage passif et flexible utilisé et plus particulièrement la corrélation entre déplacement imposé sur l'outil et effort de polissage résultant. Nous exposerons ensuite un choix de stratégie de polissage s'appuyant sur l'expérience acquise dans le domaine du polissage robotisé (trajectoires fractales) et du polissage manuel (courbes trochoïdales). Notre approche sera ensuite appliquée sur des surfaces de test au moyen d'un centre d'usinage 5 axes Mikron UCP 710. Nous présenterons ensuite des mesures réalisées grâce à un rugosimètre optique 3D ce qui nous permettra de comparer les résultats obtenus en polissage automatique et en polissage manuel.

2. Outillage et gestion de l'effort de polissage

Lors du pré polissage, l'outillage utilisé est un abrasif dont la granulométrie est fixée par la FEPA. La pastille ou disque est alors collée sur un support de disque caoutchouté muni d'une tige. Lors du polissage, l'outil est un feutre généralement en soie et l'abrasif est alors apporté sous forme de solutions diamantées. Le feutre peut avoir différentes géométries : sphères, cônes, disques, etc. Il est généralement monté sur tige (figure 8). Du pré polissage au polissage, on utilise pour chaque phase des abrasifs de granulométrie de plus en plus fine.

On a vu l'importance de l'effort de polissage sur la suppression des différentes marques ainsi que les risques de déformer la surface. Les centres d'usinage ne permettent pas de mesurer simplement les efforts en temps réels. Il n'est donc pas possible d'asservir directement le positionnement de l'outil en fonction de l'effort de contact. Afin de contourner ce problème nous avons choisi d'étalonner les outils en effort en complément de la mesure des jauges faites sur un banc de préréglage. Nous avons donc conçu un système basé sur un capteur d'effort à quartz Kistler 9011 relié à une platine Kistler 5015 qui permet l'affichage de l'effort. Il est ensuite possible de réaliser l'acquisition des courbes sur un ordinateur grâce à une interface Vernier LabPro (figure 2). Ce dispositif nous permet donc de corriger la jauge outil en fonction de deux paramètres : le déplacement de l'outil ainsi que l'angle d'inclinaison entre l'outil et la surface à polir. Nous avons donc réalisé 3 essais avec des angles de dépinçage différents en mesurant les courbes déplacement / effort (figure 3). Nous pouvons alors modifier la jauge outil en fonction de l'effort souhaité pour une inclinaison donnée. L'interruption des courbes est due au décollage de l'abrasif. En effet si l'angle est trop faible, lorsque l'effort augmente l'effort de cisaillement provoque le décollement de la pastille.

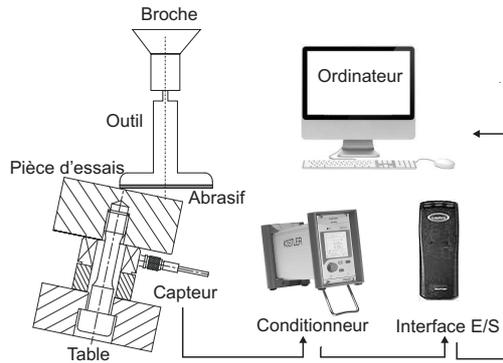


Fig. 2: Etalonnage de l'outil en effort.

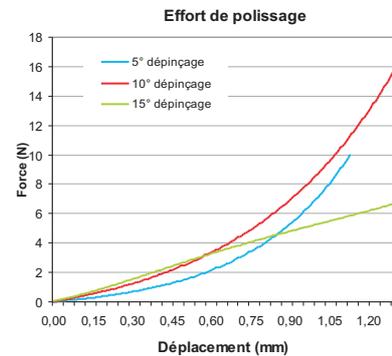


Fig.3 : Effort de polissage.

3. Trajectoires de polissage

Les trajectoires disponibles dans la plupart des logiciels FAO ne permettent pas d'obtenir un polissage satisfaisant. En effet, en général on peut observer sur la pièce des sens de rayures privilégiés ou encore une répétition de motifs. Nous allons donc générer nous-même des trajectoires multidirectionnelles en 5 axes continus. Il nous faut pour cela décrire le trajet suivi par le point extrémité de l'outil ainsi que l'axe outil tout au long de la trajectoire. Dans le but d'utiliser l'expérience des polisseurs manuels ainsi que du polissage robotisé, nous choisissons de générer des trochoïdes s'appuyant sur une courbe guide fractale de type courbes de Peano. Nous allons donc décrire la conception de courbes fractales qui serviront ensuite de guide à des trajectoires trochoïdales.

3.1 Trajectoires Fractales

Comme on l'a dit ces courbes présentent deux avantages majeurs. Le premier est leur aspect multidirectionnel : elles ne privilégient donc pas de sens de rayures. Le second est lié à notre méthode de planification des trajectoires. En effet, les surfaces complexes sont décrites mathématiquement de façon paramétrique. Il est donc possible de générer des trajectoires dans l'espace paramétrique u, v de la surface, qui est restreint à un intervalle $[0,1]^2$. Les courbes de Peano ayant la propriété de remplir des espaces carrés, on peut alors les utiliser pour remplir l'espace paramétrique puis projeter ces courbes dans l'espace de la pièce. Les courbes de Peano sont définies par récurrence comme ceci :

$$\text{Si } n = 0 : \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Sinon : } \begin{cases} x_n = 0,5 \cdot [-0,5 + y_{n-1} & -0,5 + x_{n-1} & 0,5 + x_{n-1} & 0,5 - y_{n-1}] \\ y_n = 0,5 \cdot [-0,5 + x_{n-1} & 0,5 + y_{n-1} & 0,5 + y_{n-1} & -0,5 + x_{n-1}] \end{cases}$$

Il est donc très aisé de calculer des courbes à un ordre donné. Suivant l'étendue de la pièce à couvrir, des ordres 3 sont suffisants pour polir une pièce. En effet, un petit ordre ne permet pas d'avoir des directions suffisamment multiaxiales. Un grand ordre introduit une multitude de petits segments qui ne sont pas compatibles avec la dynamique machine. On note que les

courbes calculées sont discontinues en tangence. Ceci est problématique dans le cas du polissage automatisé. En effet, sur centre d'usinage 5 axes, on s'attache à utiliser des parcours d'outils continus en courbure afin d'améliorer la dynamique machine. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de rajouter des portions circulaires en lieu et place des angles droits (figure 4).

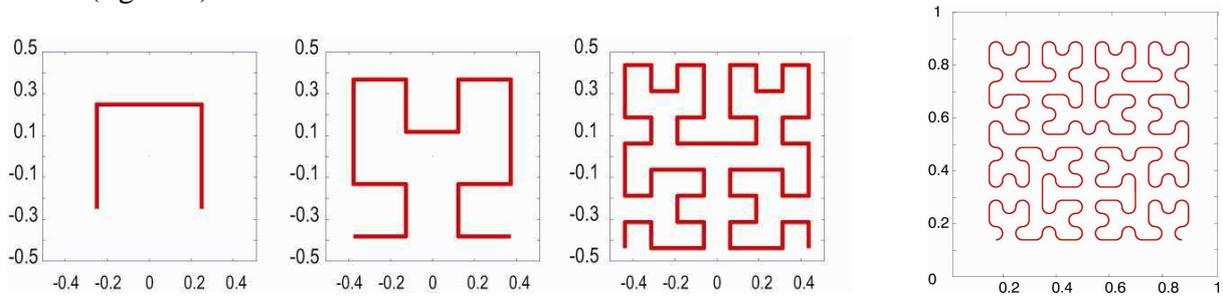


Fig.4 : Courbes de Hilbert aux ordres 1, 2, 3 et 4 arrondis.

3.2 Générations de trochoïdes

Étant donné que les courbes fractales sont calculées dans un espace 2D, on calcule aussi les trochoïdes dans un espace 2D (figure 5). Soit $C(s) = (s, f(s))$, une courbe guide paramétrique définie par son abscisse curviligne s . Soit \mathbf{n} le vecteur normal à C en s . Soit un cercle de centre O et de rayon r_c roulant sans glisser sur C . Soit P le point tel que $OP = D_{TR}$. La trochoïde est donc la trajectoire décrite par le point P lorsque le cercle roule sur C . L'équation paramétrique est donc la suivante :

$$\vec{P}(s) = \vec{C}(s) + r_c \vec{n}(s) + D_{TR} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{s}{r_c}\right) & \sin\left(\frac{s}{r_c}\right) \\ -\sin\left(\frac{s}{r_c}\right) & \cos\left(\frac{s}{r_c}\right) \end{bmatrix} \vec{n}(s) \quad (2)$$

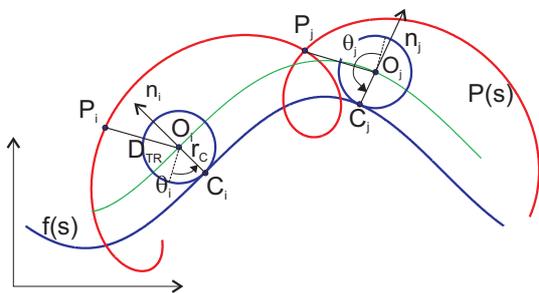


Fig. 5 : Trochoïde sur courbe quelconque.

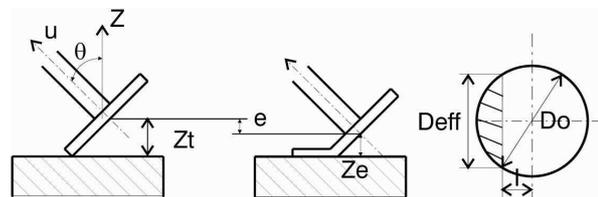


Fig. 6 : Ecrasement du porte disque.

L'enveloppe E du mouvement de l'outil se déduit aisément en fonction du diamètre effectif de l'outil en travail D_{eff} :

$$E = A + D_{eff} = 2D_{TR} + D_{eff} \Leftrightarrow D_{TR} = \frac{E - D_{eff}}{2} \quad (3)$$

Le disque d'abrasif est monté sur un support caoutchouc lui même dépinçé par rapport à la normale à la surface. Pour calculer D_{eff} il faut donc calculer la largeur de la bande de contact entre un outil et la pièce en fonction de l'angle de dépinçage (figure 6). On établit donc une relation entre l'angle d'inclinaison de l'outil θ , l'écrasement e , le diamètre de l'outil D_o et le diamètre effectif de l'outil en travail D_{eff} :

$$D_{eff} = 2 \sqrt{\left(\frac{D_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{\frac{D_o}{2} \sin \theta - e}{\tan \theta}\right)^2} \quad (4)$$

En fonction de l'effort de polissage voulu et du dépinçage, on peut donc déterminer l'écrasement de l'outil et donc le diamètre effectif de travail. Le choix de largeur de la bande de travail E permet donc de calculer D_{TR} .

3.3 Génération de trajectoires 5 axes

Le mode de définition des trajectoires nous permet de calculer la position de notre point centre outil et de notre axe outil en deux temps. On calcule tout d'abord la trajectoire centre outil dans l'espace paramétrique de la pièce qu'on projette ensuite dans l'espace de la pièce. En chacun de ces points, on peut alors connaître la normale à la surface et calculer l'orientation de l'axe \mathbf{u} de l'outil. En discrétisant les courbes de Peano et en les utilisant comme courbe guide des trochoïdes, on obtient donc la trajectoire du point de contact $Cc(s)$ de façon discrète. Dans notre cas, on ne cherche qu'à dépinçer l'outil d'un angle θ (il serait néanmoins possible d'introduire un angle de pivotement, notamment dans des cas d'interférences). \mathbf{u} est donc défini ainsi (figure 7):

$$\vec{u} = \cos \theta \cdot \vec{n} + \sin \theta \cdot \vec{f} \quad (5)$$

La direction d'avance \mathbf{f} est calculée localement à partir des points de contact successifs.

Et le point piloté est donné par :

$$\overrightarrow{OC_E} = \overrightarrow{OC_C} + r \cdot \vec{n} + \delta(R - r) \cdot \vec{v} - r \cdot \vec{u} - e \cdot \vec{z} \quad (6)$$

$$\text{avec : } \vec{v} = \vec{u} \wedge \frac{\vec{u} \wedge \vec{n}}{\|\vec{u} \wedge \vec{n}\|} \quad (7)$$

et $\delta = 1$ si $\theta > 0$; $\delta = -1$ si $\theta < 0$, ce qui permet de polir en tirant ou en poussant.

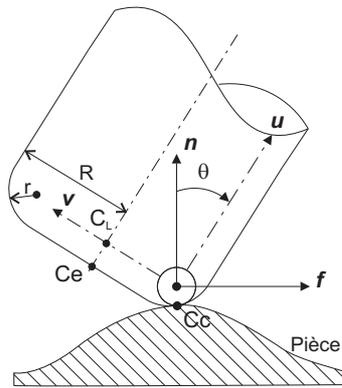


Fig. 7 : Définition du point piloté.

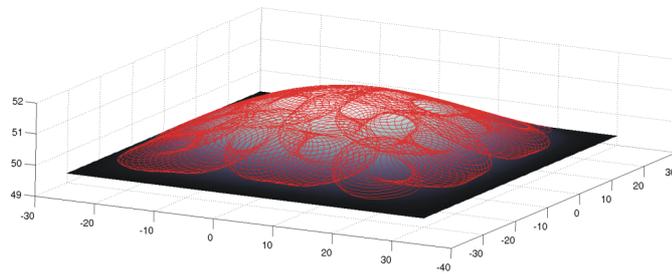


Fig. 8 : Trochoïdes sur fractale.

4. Application

Initialement, nous nous intéressions à la réalisation d'empreintes pour l'injection plastique et plus en particulier des moules permettant l'obtention de matériel électrique comme par exemple des portes transparentes de coffrets ou encore des façades d'interrupteurs. Les surfaces rencontrées sont donc tendues et de tailles moyenne. Afin de tester notre méthode, nous nous sommes intéressés à la réalisation d'un plan ainsi que d'une surface convexe.

4.1 Protocole expérimental

L'acier utilisé est un X38CrMoV5 d'une dureté de 53 HRc après traitement. La section des surfaces testées est de 50x50 mm. En fraisage, les paramètres de l'opération de finition sont les suivants : outil boule $\phi 6$ mm, $V_c=90$ m/min, $f_z=0.057$ mm/tr, hauteur de crête programmée de 1 μ m. Nous proposons de réaliser le pré polissage et le polissage sur la même machine avec comme paramètres : $N=2000$ tr/min, $V_f = 2$ m/min et un angle d'inclinaison $\theta = 3^\circ$.

Quatre opérations sont utilisées en pré polissage. Les trois premières sont réalisées avec les résines polymères chargés d'abrasifs constitués d'oxyde d'alumine, dont les granulométries correspondent à 120, 240 et 600 selon la norme FEPA. Les outils se présentent sous forme de disques de 18 mm de diamètre que l'on vient coller sur le support flexible. Pour la quatrième opération, l'abrasif est du carbure de silicium rapporté sur un papier. En finition de polissage, nous utilisons comme abrasif de la pâte diamantée de grade 9 μ m, 3 μ m et 1 μ m. La pâte diamantée est appliquée grâce à des feutres en tissus collés sur le support flexible.

En ce qui concerne les trajectoires, nous avons utilisé des trajectoires trochoïdales s'appuyant sur des courbes fractales (figure 8). Afin d'obtenir une vitesse de parcours élevée, nous avons fait le choix de faire la transformation inverse dans la commande numérique en temps réel afin de mieux gérer les vitesses d'avance des différents axes. De plus, nous utilisons les fonctions de lissage polynomiaux des axes de translation en temps réel.

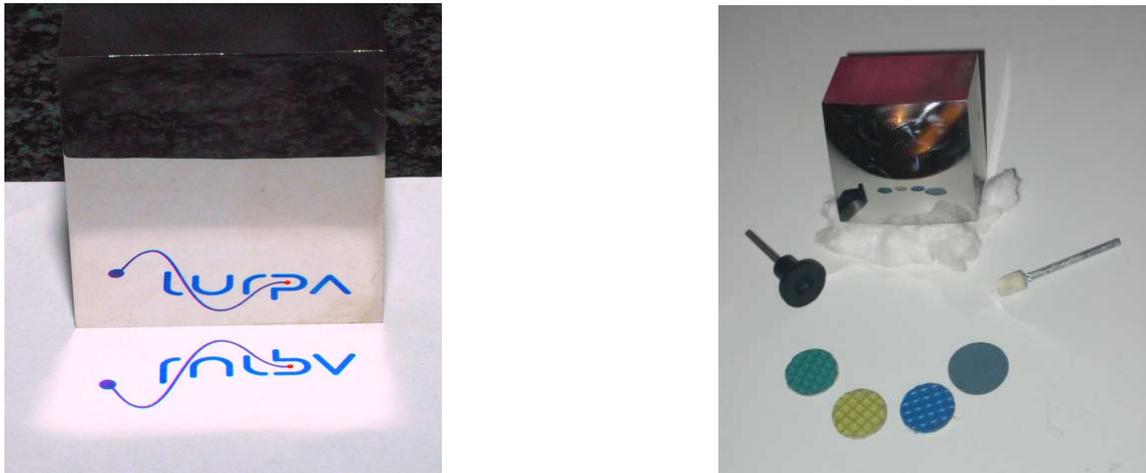


Fig. 9 : Pièces polies et outils utilisés.

4.2 Contrôle de l'état de surface

Industriellement, la qualité des surfaces polies est validée par le polisseur lui même par des critères visuels. Par ailleurs, les polisseurs indiquent que la qualité miroir d'une surface polie est obtenue quand la rugosité arithmétique Ra 2D est inférieure à 20 nm. Cependant, les nouvelles technologies de mesure sans contact nous permettent de relever la topographie de la pièce en trois dimensions et de traiter les données avec la nouvelle norme internationale d'état de surface 3D. On s'affranchit ainsi de la direction suivant laquelle les paramètres 2D sont relevés.

Parmi tous les critères normalisés (ISO/DIS 25178-2), il est important de savoir quels sont les paramètres les plus aptes à qualifier un état de surface poli glace. Cependant à notre connaissance, ce travail de caractérisation n'a pas encore été réalisé. Il a été proposé par Suh et al. [13] une comparaison de ces différents critères. Il résulte de cette étude que les paramètres Sa et Sq ne sont pas pertinents pour repérer les rayures des surfaces contrairement à Ssk . Lors de la mesure d'une prothèse de genou, Hilerio et al. [14] donnent aussi une interprétation de certains de ces critères. Ainsi Ssk représente la symétrie du profil :

- $Ssk = 0$: le profil est symétrique par rapport à la ligne médiane,
- $Ssk > 0$: le profil a plus de pics que de creux,
- $Ssk < 0$: le profil a plus de creux que de pics.

Et Sku représenterait l'étalement de la distribution :

- $Sku > 3$: la surface est plutôt tendue,
- $Sku < 3$: la surface a une tendance à présenter des pics ou des rayures.

Une fois les pièces polies, nous les avons mesurées grâce à un rugosimètre 3D sans contact (Talysurf CCI 6000). Nous avons effectué des mesures sur les deux pièces polies avec notre approche (le plan et la bosse) ainsi qu'une pièce plane qui a été polie manuellement par un professionnel. Les résultats des mesures sont donnés dans le tableau 1 et les relevés topographiques figure 10.

Critères	Bosse – Auto	Plan – Auto	Plan – Manu.
Sa (nm)	7,619	1,085	1,014
Sq (nm)	9,543	1,346	1,307
Ssk	-0,2314	0,103	-0,5941
Sku	2,92	2,713	3,478

Tab. 1 : Résultats de la mesure sans contact.

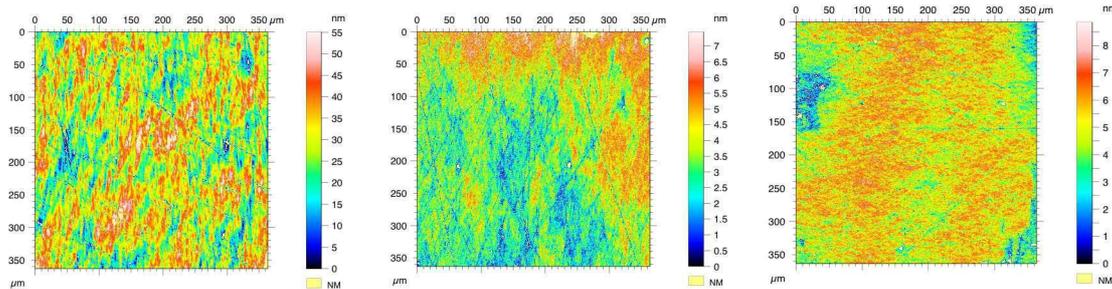


Fig. 10 : Mesures de la bosse et du plan polis automatiquement et du plan poli manuellement.

Selon les critères de [17-18], le Sku de la surface plane polie manuellement est cohérent avec le relevé puisque la surface semble tendue, sans trop de pics et de rayures, contrairement aux deux autres. Par contre, concernant le paramètre Ssk , il est difficile de conclure.

On observe que la pièce de type bosse polie automatiquement présente des écarts géométriques et un Sa plus élevés que pour la surface plane. Autrement dit, le taux d'enlèvement de matière n'est pas aussi bon que sur le plan alors que les trajectoires sont les mêmes dans l'espace paramétrique. Tout d'abord, le motif de polissage utilisé, généré dans l'espace paramétrique est le même que celui de la surface plane alors que l'aire de la pièce convexe est plus grande. Il en résulte un taux de couverture plus faible. Cela s'explique aussi par le comportement cinématique de la machine lors du polissage pour chacune des pièces. La surface plane est polie avec une cinématique 3 axes alors que la surface convexe requiert l'interpolation des 5 axes de la machine. On observe que la vitesse d'avance relative entre l'outil et la pièce chute à cause de la lenteur des axes rotatifs dans le cas d'un usinage 5 axes pour la surface convexe. Il en résulte une trajectoire plus lente et légèrement saccadée qui donne de moins bons résultats. Finalement, la pièce exhibe bien un état de surface poli miroir mais avec un aspect laiteux (figure 9). Les deux surfaces planes quant à elles montrent à l'œil les mêmes qualités de réflexion de la lumière.

Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une solution pour obtenir des surfaces polies miroir sur des machines normalement dédiées au fraisage des moules. L'outillage passif utilisé est simple à mettre en oeuvre. Un étalonnage préliminaire nous permet de corréliser l'effort de polissage et l'écrasement de l'outil. Nous avons également développé des trajectoires de polissage particulières afin d'éviter la présence de marques sur les pièces polies et d'imiter au mieux le travail des polisseurs manuels. L'obtention de surfaces aux caractéristiques poli

miroir par polissage sur machine outil 5 axes à grande vitesse est donc possible. La qualité de polissage est comparable à la méthode manuelle et les temps de polissage sont comparables. Pour l'application qui nous intéresse, les surfaces sont plutôt planes que complexes. Cependant, pour les formes complexes, les performances cinématiques de la machine-outil sont très importantes afin de pouvoir garantir une vitesse d'avance de l'outil la plus grande possible et un comportement fluide, propice à un bon taux d'enlèvement de matière. En particulier, les axes rotatifs de la machine doivent être très rapides.

Par ailleurs la mesure des états de surface des pièces poli miroir reste un problème car il est difficile de mesurer une pièce entière compte tenu du temps de mesure et de la taille des données à traiter. Enfin, nous travaillons sur la caractérisation des états de surfaces polies miroir à partir des paramètres normalisés afin de formaliser concrètement ce qu'est un état de surface poli miroir et sa fonction.

Ce travail est conduit sous l'égide du groupe de travail Manufacturing21 qui comprend 13 laboratoires français. Les thèmes abordés sont la modélisation du processus de fabrication, la fabrication virtuelle et le développement de nouvelles méthodes de fabrication.

Références

- [1] J.J. Marquez, J.M. Perez, J. Rios, A. Vizan, 2005, *Process modeling for robotic polishing*, Journal of Materials Processing Technology, N°159, p. 69-82.
- [2] B-S. Ryuh, S.M. Park, G. R. Pennock, 2006, *An automatic tool changer and integrated software for a robotic die polishing station*, Mechanism and Machine Theory, N°41, p. 415-432.
- [3] H-Y. Tam, O.C Hang Lui, A.C.K. Mok, 1998, *Robotic polishing of free-form surfaces using scanning paths*, Journal of Materials Processing and Technology, N°95, p. 91-200.
- [4] X. Wu, Y. Kita, K. Ikoku, 2007, *New polishing technology of free form surface by GC*, Journal of Materials Processing Technology, N°187-188, p. 81-84.
- [5] S-C. Lin, M-L. Wu, 2002, *A study of the effects of polishing on material removal rate and non-uniformity*, International Journals of Machine Tools and Manufacture, N°42, p. 99-103.
- [6] Y. Mizugaki, M. Sakamoto, 1990, *Development of a Metal-Mold Polishing Robot System with Contact Pressure Control*, Annals of the CIRP, N°39(1), p. 523-526.
- [7] Y. Mizugaki, M. Sakamoto, 1992, *Fractal Path Generation for a Metal-Mold Polishing Robot System and Its Evaluation by the Operability*, Annals of the CIRP, N°41(1), p. 531-534.
- [8] M. J. Tsai, J. F. Huang, 2006, *Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, N°30, p. 817-827.
- [9] F. Nagata, Y. Kusumoto, Y. Fujimoto, K. Watanabe, 2007, *Robotic sanding system for new designed furniture with free-formed surface*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, N°23, p. 371-379.
- [10] J.P. Huissoon, F. Ismail, A. Jafari, S. Bedi, 2006, *Automated Polishing of Die Steel Surfaces*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, N°44, p. 101-107.
- [11] F. Preston, *The theory and design of plate glass polishing machine*, Journal of the Society of Glass Technology, N°11, p. 214-256.
- [12] J.G. Griffiths, *Toolpath based on Hilbert's curve*, 1994, Computer-Aided Design, N°26, p. 839-844
- [13] A. Y. Suh, A. A. Polycarpou, T. F. Conry, 2003, *Detailed surface roughness characterization of engineering surfaces undergoing tribological testing leading to scuffing*, Wear, N°255, p. 556-568.
- [14] I. Hilerio, T. Mathia, C. Alepee, 2004, *3D measurements of the knee prosthesis surfaces applied in optimizing of manufacturing progress*, Wear, N°257, p. 1230-1234.