



**HAL**  
open science

# OPTIMISATION D'UNE GAMME DE POLISSAGE SUR MOCN 5 AXES

Virgile Lacharnay, Christophe Tournier, Gérard Poulachon, Eric Dufour

► **To cite this version:**

Virgile Lacharnay, Christophe Tournier, Gérard Poulachon, Eric Dufour. OPTIMISATION D'UNE GAMME DE POLISSAGE SUR MOCN 5 AXES. *Machines et Usinage à Grande Vitesse*, Oct 2010, Cluny, France. hal-00986143

**HAL Id: hal-00986143**

**<https://hal.science/hal-00986143>**

Submitted on 1 May 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.



## OPTIMISATION D'UNE GAMME DE POLISSAGE SUR MOCN 5 AXES

**Virgile LACHARNAY**

DGM, ENS de Cachan, 61 av. du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex, France  
virgile.lacharnay@ens-cachan.fr

**Christophe TOURNIER**

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

**Gérard POULACHON**

Arts et Métiers ParisTech, LaBoMaP, rue porte de Paris, 71250 Cluny, France  
gerard.poulachon@ensam.eu

**Eric DUFOUR**

Agie Charmilles SAS, 12 Avenue du 1er mai, 91120 Palaiseau, France  
eric.dufour@fr.gfac.com

**Résumé :** L'usinage grande vitesse (UGV) a profondément bouleversé l'industrie de l'outillage mais n'a pas permis de supprimer les opérations manuelles de polissage. Ces opérations sont indispensables pour obtenir les états de surfaces dits «poli miroir» requis sur les moules d'injection plastique ou sur les prothèses médicales. Nous avons développé une méthode pour effectuer le polissage de ces pièces sur centre d'usinage 5 axes. Elle s'appuie sur l'utilisation de disques abrasifs montés sur des supports en élastomère et de trajectoires de polissage trochoïdales. Cependant, la seule donnée de l'état de surface à atteindre ne permet pas de déterminer automatiquement les différentes étapes de la gamme de fabrication qui inclue le fraisage, le pre polissage et le polissage de finition. Nous proposons donc une étude expérimentale sur polisseuse conventionnelle de l'influence des différents abrasifs et de leurs conditions d'utilisation sur des paramètres caractéristiques de rugosité afin d'optimiser l'enlèvement de matière. Une attention particulière est portée sur la rugosité arithmétique  $R_a$  mais également sur le paramètre  $Rpk$  associé à l'étude des courbes d'Abbott-Firestone. Après avoir exposé les résultats expérimentaux, un cas industriel portant sur la réalisation d'une prothèse médicale en acier inoxydable est traité avec pour objectif d'obtenir un état de surface poli miroir. Les essais sont menés sur un centre de fraisage 5 axes Mikron HSM400U.

**Mots clés :** polissage, centre d'usinage 5 axes, UGV, Etats de surfaces

## 1 Introduction

Si l'arrivée de l'usinage grande vitesse (UGV) a profondément bouleversé l'industrie de l'outillage, cette technologie n'a pas permis de supprimer les opérations couteuses de polissage. L'opération de polissage est traditionnellement une opération manuelle, effectuée par des ouvriers spécialisés dans des entreprises sous traitantes. Il s'en suit des coûts additionnels pour l'entreprise et des temps de réalisation beaucoup plus longs, incompatibles avec le contexte international fortement concurrentiel de l'industrie du moule par exemple.

Nous avons validé la possibilité d'effectuer le polissage de moules d'injection plastique et de prothèses médicales sur centre d'usinage 5 axes.

La méthode développée s'appuie sur l'utilisation de disques abrasifs montés sur des supports en élastomère et de trajectoires de polissage trochoïdales [PES 08][PES 09]. L'approche que nous proposons permet aux industriels d'utiliser leurs centres d'usinage 5 axes grande vitesse jusque là dédiés au fraisage des pièces pour effectuer l'opération de polissage et ainsi augmenter les taux de charge et diminuer les coûts.

## 2. Problématique

Les prothèses médicales ou les moules d'injection plastique sont généralement obtenus par fraisage mais la qualité géométrique requise par les applications concernées nécessite l'obtention d'états de surfaces « poli miroir » que seul le polissage permet d'atteindre. Les métaux sont des matériaux optiquement homogènes pour lesquels la réflexion de la lumière est un phénomène de « surface ». La rugosité de la surface a donc un rôle très important dans ce phénomène. Une surface parfaitement lisse réfléchit les rayons incidents symétriquement par rapport à la normale, c'est la *réflexion spéculaire*, alors qu'une surface rugueuse diffuse la lumière dans diverses directions, créant un *lobe spéculaire* [BEC 87][WHI 94]. A titre d'exemple, le lobe spéculaire disparaît pour des écarts géométriques des surfaces dont l'amplitude est dix fois inférieure à la longueur d'onde de la lumière visible, soit 50 nm environ, comme le montre la figure 1.

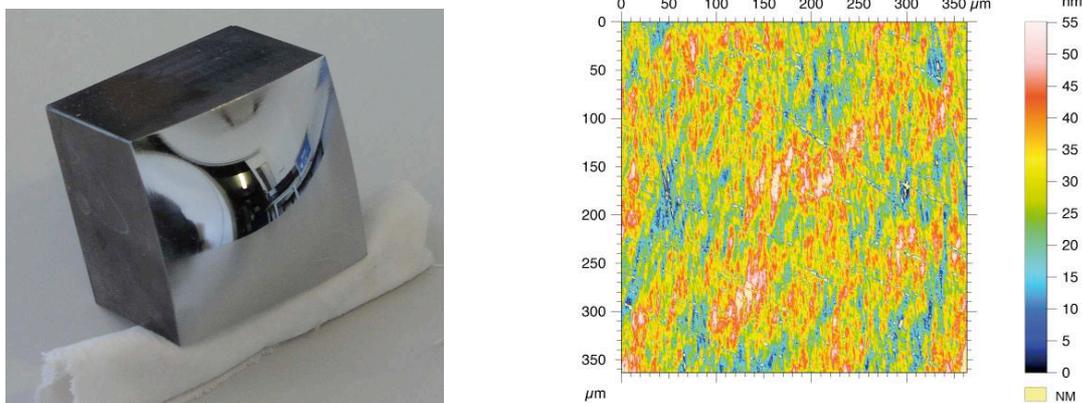


Fig.1 : état de surface poli miroir et écarts géométriques

L'objectif est donc d'obtenir des états de surfaces avec peu de crêtes et de creux et dont l'amplitude est inférieure 50 nm. Cependant, la seule donnée de l'objectif à atteindre ne permet pas de déterminer automatiquement les différentes étapes de la gamme de fabrication qui inclue le fraisage, le pré polissage et le polissage de finition. Des travaux ont déjà été menés pour étudier les paramètres de polissage influents sur la rugosité finale ( $Ra$ ) mais les résultats expérimentaux ne permettent pas de conclure sur la constitution d'une gamme de polissage [HUI 02].

La rugosité d'une surface est communément caractérisée en 2D (ou en 3D) à l'aide du critère  $Ra$  (resp.  $Sa$ ). Cependant ce paramètre « traditionnel » n'est pas suffisant pour caractériser la topographie de la surface étudiée. Ainsi deux topographies différentes peuvent présenter le même  $Ra$  ou  $Sa$ . Nous proposons d'utiliser le taux de portance qui traduit le pourcentage de matière présente à une certaine altitude. Ce paramètre correspond à notre besoin et a déjà été utilisé avec succès dans le cadre du polissage [SAV 09]. La figure 2 illustre une courbe de portance également appelée courbe de Abbott-Firestone. La courbe d'Abbott est divisée en trois zones qui permettent de calculer les paramètres  $Rk$ ,  $Rpk$  et  $Rvk$  significatifs du volume de creux et de bosses et dont les définitions sont données dans la norme ISO/DIS 25178-2.

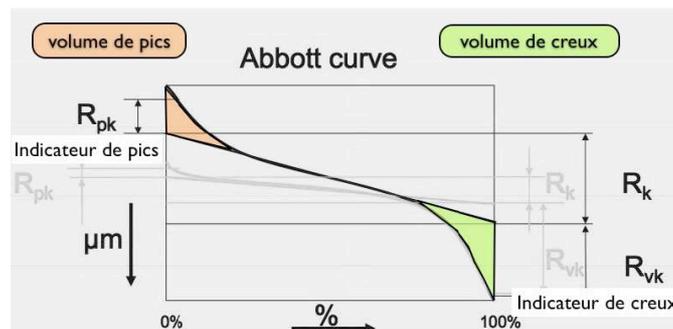


Fig.2 : courbe de portance

Nous proposons donc une étude de l'influence des différents abrasifs et de leurs conditions d'utilisation sur des paramètres caractéristiques de rugosité afin d'optimiser l'enlèvement de matière. Le taux d'enlèvement de matière a fait l'objet de plusieurs études en vue de sa modélisation mais le modèle qui reste encore à l'heure actuelle le plus simple et le plus réaliste et le modèle de Preston [PRE 27]. Le taux d'enlèvement de matière ( $TEM$ ) est donné par la formule suivante :

$$TEM = dz/dt = K \cdot P \cdot V \quad (1)$$

Où  $P$  représente la pression de contact,  $V$  la vitesse relative et  $K$  une constante fonction de la nature de la matière et de l'abrasif. Ainsi localement la quantité de matière enlevée dépend des paramètres précédents et du temps d'abrasion.

L'influence des trois paramètres (pression  $P$ , vitesse  $V$  et temps  $t$ ) sur les états de surfaces et en particulier sur les paramètres  $Ra$  et  $Rpk$  est étudiée dans la suite.

### 3. Etude expérimentale

Les expérimentations consistent donc à mesurer les caractéristiques de rugosité ( $Ra$  et  $Rpk$ ) à intervalle de temps régulier jusqu'à une valeur limite, lorsque le papier abrasif utilisé n'est plus efficace. Cela permet de définir le temps de polissage optimal pour un type de papier donné et de savoir quels types d'abrasifs utiliser. Les expérimentations sont menées sur des surfaces planes avec une machine à polir (figure 3) et dont la nuance d'acier inoxydable sera utilisée par la suite pour l'application industrielle. Les mesures de rugosité sont effectuées à l'aide d'un rugosimètre 3D (Veeco).

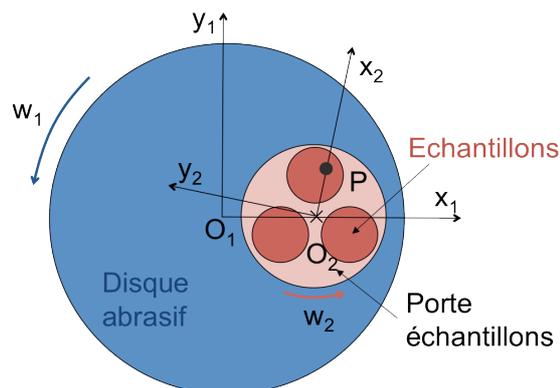
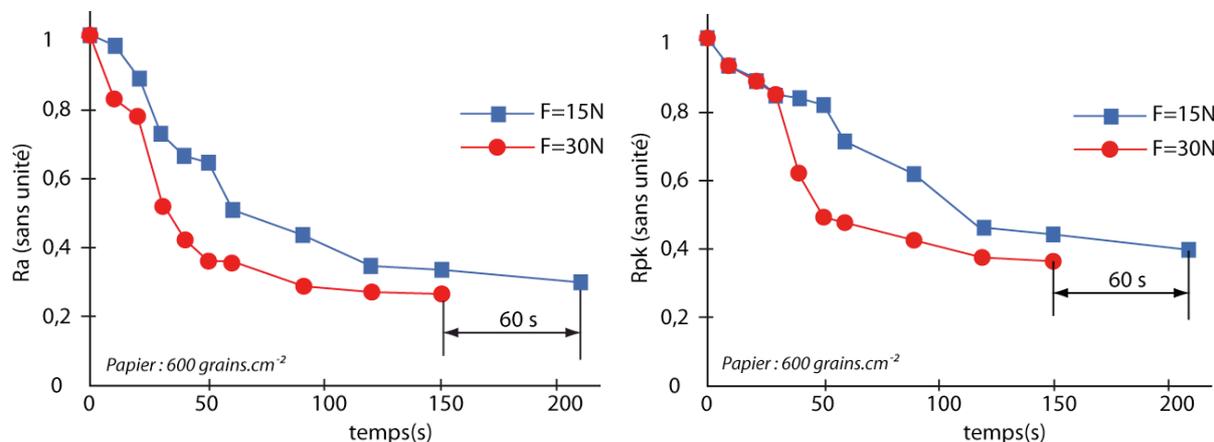


Fig.3 : Machine de polissage plan

### 3.1 Evolution des paramètres en fonction de l'effort de polissage

Les premiers essais consistent à étudier l'influence de l'effort de polissage sur les paramètres  $Ra$  et  $Rpk$  en fonction du temps. Deux échantillons issus de la même pièce usinée sont utilisés, ce qui donne des paramètres de départ identiques. Ils sont polis chacun leur tour à vitesse de rotation du plateau constante ( $300 \text{ tr.min}^{-1}$ ) avec trois papiers abrasifs différents (240, 600 et  $1200 \text{ grains.cm}^{-2}$ ). Seul diffère l'effort de polissage qui sera deux fois plus important pour un des échantillons tout au long de l'opération (30 N et 15 N). Pour des raisons de confidentialité, les paramètres d'état de surface sont illustrés sans unités tout en gardant les proportions.

Sur les deux courbes (figure 4) qui ont sensiblement la même allure, la courbe bleue indique l'évolution de la rugosité au cours du temps pour l'échantillon subissant l'effort de polissage le plus faible. Cela paraît alors cohérent que cette courbe reste toujours au dessus de la courbe rouge. Il est intéressant de remarquer que la limite atteinte par le papier reste la même. L'effort de polissage imposé durant cette opération n'a donc pas d'influence sur la rugosité finale. Par contre, l'échantillon le plus fortement sollicité atteindra cette limite 60 s avant l'autre. Augmenter l'effort de polissage permet donc un gain de temps sur l'opération de polissage. Sur cet exemple, pour du papier à  $600 \text{ grains.cm}^{-2}$ , le gain de temps est de l'ordre de 28% ce qui n'est pas négligeable dans l'optique d'une industrialisation de cette technique d'enlèvement de matière. Il faut tout de même noter que lorsqu'un effort de polissage important est exercé, un défaut de forme plus important est susceptible d'apparaître.

Fig.4 : Influence de l'effort de polissage sur  $Ra$  et  $Rpk$  avec papier 600

### 3.2 Evolution des paramètres en fonction de la vitesse de polissage

Pour observer l'influence de la vitesse de rotation du plateau sur la qualité du polissage obtenue, le même protocole expérimental est utilisé avec un effort de polissage constant (20 N). Les deux vitesses de rotation du plateau qui seront utilisées sont  $200 \text{ tr.min}^{-1}$  et  $400 \text{ tr.min}^{-1}$ . La vitesse maximale utilisée donne une vitesse d'abrasion de  $36 \text{ m.min}^{-1}$ . Encore une fois, les courbes ont sensiblement la même allure ce qui montre que l'évolution de  $Ra$  est en fait très similaire à celle de  $Rpk$  (figure 5). La comparaison de la courbe rouge et de la courbe bleue va dans le sens espéré puisque que plus la vitesse de rotation est importante, plus rapide sera le polissage. Ici encore la valeur limite atteinte par le papier est la même dans les deux cas. Sur cette expérience, le gain de temps est encore plus important, la valeur limite du papier est atteinte avec 110 s d'avance pour l'essai à vitesse de rotation rapide. Le gain de temps est ici d'environ 48 %. Une fois de plus, lors de l'application en milieu industriel, cette valeur sera limitée par les risques de projection de pâte à diamant trop importants à haute vitesse de rotation de l'outil.

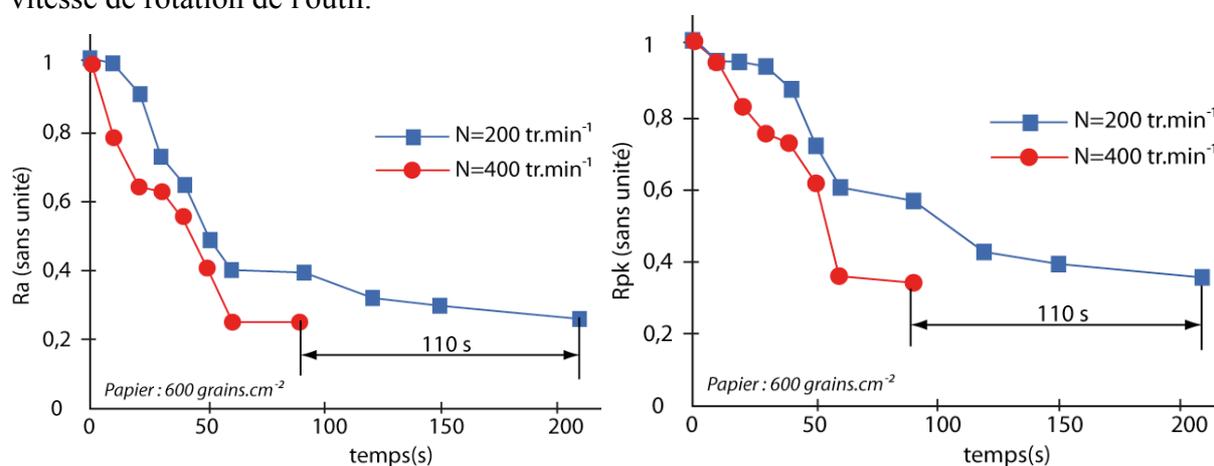


Fig.5 : Influence de la vitesse de polissage sur  $Ra$  et  $Rpk$  avec papier 600

Enfin, il est important de préciser que les temps de polissage pour atteindre des valeurs asymptotiques identiques sont cohérents avec les durées de vie des abrasifs, estimées à 3 à 4 minutes selon le fournisseur de ces abrasifs. Il est aussi probable que les valeurs atteintes sont dues aux caractéristiques des papiers et à leur usure.

### 3.2 Evolution des paramètres au cours d'une gamme complète de polissage

Il s'agit maintenant d'observer l'évolution des deux paramètres  $Ra$  et  $Rpk$  durant une gamme de polissage type (tableau 1). L'effort de polissage imposé est de 20N et la vitesse de rotation du plateau de  $300 \text{ tr.min}^{-1}$ .

Tableau 1: Gamme de polissage type

Pré polissage			Polissage finition		
Abrasif P240	Abrasif P600	Abrasif P1200	Pâte diamant D $9 \mu\text{m}$	Pâte diamant D $3 \mu\text{m}$	Pâte diamant D $1 \mu\text{m}$ (non testé)

Plusieurs points intéressants sont à remarquer sur les deux courbes (figure 6) qui ont une évolution plutôt similaire. Tout d'abord, il est évident que la valeur des paramètres de rugosité décroît lorsque le temps de polissage augmente. Ils vont diminuer jusqu'à atteindre une asymptote qui représente la limite de ce que peut produire le papier utilisé. C'est lorsque cette stabilisation est atteinte que le papier est remplacé pour passer sur un abrasif plus fin. A la date de changement d'abrasif, il se produit un pic sur ces courbes.

Cela signifie que le nouveau papier va tout d'abord dégrader l'état de surface obtenu

précédemment avant de l'améliorer. Au vu de cette dégradation, il n'est donc pas nécessaire lors d'une opération de polissage d'aller jusqu'à la limite du papier ; il est donc possible de réduire le temps de chaque opération en notant la valeur de la dégradation obtenue et en s'arrêtant à cette dernière lors de l'opération précédente (gain de temps total d'environ 30 %). Lors du passage à la pâte à diamant, il n'y a pas de dégradation de la rugosité ce qui montre bien que ces pâtes à diamant sont bien adaptées à ces opérations de super finition de polissage.

Un disque abrasif usé a donc un pouvoir d'abrasion plus faible que l'abrasif neuf de granulométrie inférieur. Les courbes montrent donc l'efficacité des abrasifs ainsi que leur usure.

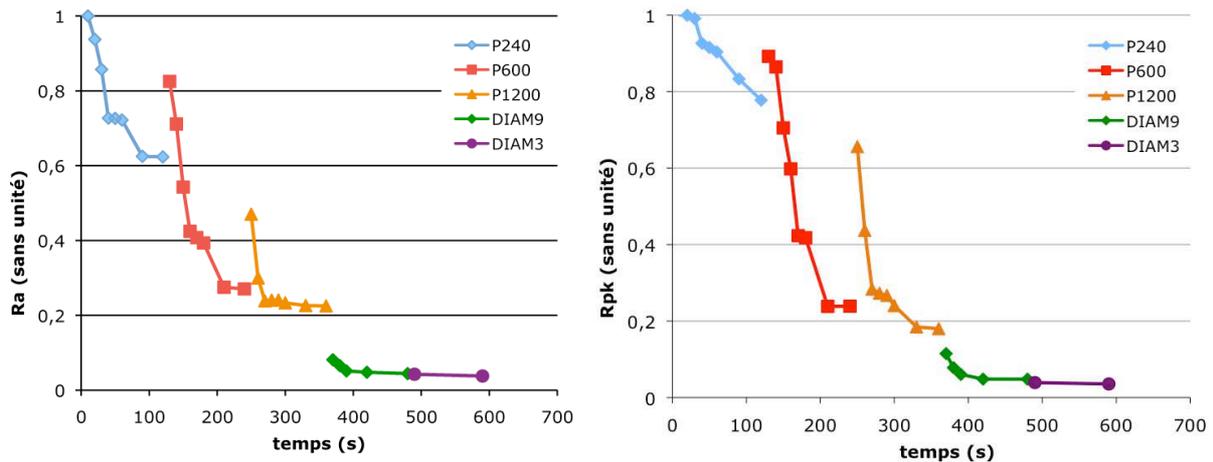


Fig.6 : Evolution des paramètres  $Ra$  et  $Rpk$  sur une gamme complète

#### 4 Application

L'application proposée porte sur le polissage de la partie tibiale de la prothèse articulaire de cheville AKILE de chez I.CERAM en acier inoxydable (X4CrNiMnMoN 21-9-4) (figure 7). De cette pièce a été extraite la surface fonctionnelle principale sur laquelle porteront les tests. La zone à polir est la restriction d'une surface paramétrée de type Nurbs. Industriellement, l'opération de polissage manuelle dure 20 minutes, la pièce polie présente un défaut de forme de l'ordre du dixième de millimètre et un état de surface poli miroir.

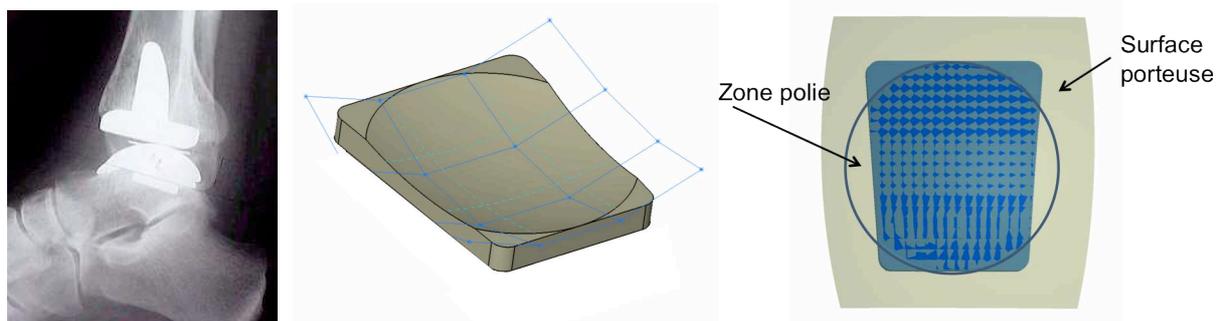


Fig.7 : Prothèse AKILE et surface à polir

L'opération de fraisage de finition est effectuée avec un outil hémisphérique de diamètre 6 mm. Les résultats des expériences que nous avons menées précédemment ont permis de trouver une gamme de polissage de référence qui comprend 5 opérations de polissage et une opération de nettoyage (tableau 2). En particulier, les courbes expérimentales de la figure 6 ont été exploitées. En effet, la mesure de l'état de surface de la pièce en fin de fraisage est caractérisée par  $Ra = 0,8$  et  $Rpk = 0,87$  (sans unité). L'opération de pré polissage avec l'abrasif P240 est donc inutile et l'on peut commencer directement avec l'abrasif P600. Le

temps « FAO » de chaque opération est 175 s en théorie mais compte tenu de la complexité de la trajectoire et des limites cinématiques de la machine, la durée réelle d'une opération est de 215s pour une dure totale de 21 min 30 s sur un centre d'usinage Mikron HSM 400U. A l'issue de la gamme, l'état de surface obtenu est poli miroir.

Tableau 2: Gamme de polissage initiale

Pré polissage		Polissage finition			
Abrasif P600	Abrasif P1200	Pate diamant d9 $\mu$ m (tissus)	Pate diamant d3 $\mu$ m (tissus)	Pate diamant d1 $\mu$ m (feutre)	Nettoyage (feutre)
Trajectoires : Trochoïdes sur plans //		Trajectoires : Trochoïdes sur fractales			
$V_f = 2\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$					

Afin de diminuer le temps global et aux vues des courbes de la figure 6, il a été décidé de supprimer les opérations de pré polissage avec l'abrasif P1200 et de polissage à la pâte à diamant de 3  $\mu$ m. En effet, la valeur ajoutée de ces deux opérations ne paraît pas significative. La vitesse d'avance programmée a également été augmentée ( $V_f = 3\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) ainsi que le pas des trochoïdes (20%) pour réduire la longueur à parcourir [PES 09]. Après optimisation (tableau 3), la pièce obtenue est similaire à la pièce de référence précédente. Le temps de polissage final est de 12 min, le défaut de forme mesuré sur machine à mesurer tridimensionnelle est de 0.01 mm et l'état de surface est poli miroir.

Tableau 3 : Gamme de polissage optimale

Pré polissage	Polissage finition		
Abrasif P600	Pate diamant d9 $\mu$ m (tissus)	Pate diamant d1 $\mu$ m (feutre)	Nettoyage (feutre)
Trajectoires : Trochoïdes sur plans //	Trajectoires : Trochoïdes sur fractales		
$V_f = 3\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$			



Fig.8 : Pièces polies

## 5. Conclusion et perspectives

Nous avons proposé dans cet article une étude permettant de mieux comprendre les paramètres influents sur les états de surface lors d'une opération de polissage. L'étude préliminaire sur machine à polir a permis de mieux cerner l'action de chaque abrasif d'une gamme de polissage type en fonction des paramètres opératoires.

L'influence de la pression et de la vitesse de polissage est conforme à nos attentes et montre que les mêmes états de surfaces sont atteignables plus rapidement. Cependant, les conditions d'utilisation plus sévères pourraient réduire la durée de vie des abrasifs de telle sorte qu'il faille en changer avant d'avoir entièrement couvert la surface à polir.

L'étude de l'influence du temps d'abrasion sur la gamme complète constitue une véritable « signature » de notre matériau et est un élément essentiel pour optimiser la gamme, à la manière d'un couple outil-matière.

Finalement, les gains par rapport à l'opération de polissage manuelle sont très significatifs. En ce qui concerne le temps de polissage, les performances dynamiques des axes de rotation du centre HSM400U ont permis d'atteindre des vitesses d'avance élevées malgré la complexité de la trajectoire 5 axes. De plus, l'approche automatique proposée garantira la répétabilité et le respect du défaut de forme contrairement au polissage manuel.

A l'avenir, il sera nécessaire de caractériser l'état de surface poli miroir requis par les applications en termes de paramètre de rugosité. Le paramètre Rpk (2D) qui traduit la portance a été utilisé dans notre étude mais d'autres paramètres 3D comme le gradient moyen quadratique qui traduit la moyenne des pentes entre pics et vallées semble également pertinent.

*Nous remercions la société I.CERAM avec laquelle nous avons collaboré pour mener à bien cette étude.*

*Ce travail est conduit sous l'égide du groupe de travail **Manufacturing21** qui comprend 16 laboratoires français. Les thèmes abordés sont la modélisation du processus de fabrication, la fabrication virtuelle et le développement de nouvelles méthodes de fabrication.*

## 6 Références

- [BEC 87] P. BECKMANN, A. SPIZZICHINO, 1987, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Artech House Publishers.
- [HUI 02] J. HUISSOON, F. ISMAIL, A. JAFARI, AND S. BEDI, *Automated polishing of die steel surfaces*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19(4), 2002, p. 285–290.
- [PES 08] X. PESSOLES, C. TOURNIER, 2008, Polissage automatique de moules d'injection plastique sur centre d'usinage 5 axes, Assises MUGV, Nantes, 10 p., 5-6 juin.
- [PES 09] X. PESSOLES, C. TOURNIER, 2009, *Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center*, Journal of Materials Processing Technology, 209(7), p. 3665-3673.
- [PRE 27] F. PRESTON, 1927, *The theory and design of plate glass polishing machine*, Journal of the Society of Glass Technology, 11, p. 214-256.
- [SAV 09] G. SAVIO, R. MENEGHELLO, G. CONCHERI, 2009, *A surface roughness predictive model in deterministic polishing of ground glass moulds*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(1), 2009, p. 1-7.
- [WHI 94] D.J. WHITEHOUSE, D.K. BOWEN, V.C. VENKATESH, P. LONARDO, C.A. BROWN, *Gloss and Surface Topography*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 43(2), 1994, p. 541-549.