



Optimisation de la fabrication de moule : Une approche globale des procédés de fraisage et de polissage

Laureen Grandguillaume, Yann Quinsat, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

► To cite this version:

Laureen Grandguillaume, Yann Quinsat, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Optimisation de la fabrication de moule : Une approche globale des procédés de fraisage et de polissage. 14eme colloque national AIP Primeca, Mar 2015, La Plagne, France. hal-01122502v1

HAL Id: hal-01122502

<https://hal.science/hal-01122502v1>

Submitted on 4 Mar 2015 (v1), last revised 3 Apr 2015 (v2)

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 de la fabrication de moule :

Une approche globale des procédés de fraisage et de polissage

Laureen Grandguillaume

LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud

F-94235 CACHAN, France

laureen.grandguillaume@ens-cachan.fr

Yann Quinsat

LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud

F-94235 CACHAN, France

yann.quinsat@ens-cachan.fr

Sylvain Lavernhe

LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud

F-94235 CACHAN, France

sylvain.lavernhe@ens-cachan.fr

Christophe Tournier

LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud

F-94235 CACHAN, France

christophe.tournier@ens-cachan.fr

Résumé— Dans le contexte de production de moules et de matrices, la fréquente évolution de formes et l'augmentation de la compétitivité exigent une optimisation de l'ensemble du processus de fabrication. Concernant la fabrication des moules, le procédé est principalement composé d'une opération d'usinage suivi d'une opération de polissage nécessaire pour atteindre la rugosité de surface souhaitée. Cette étude propose une méthode permettant d'améliorer la séquence complète de fraisage de finition et de polissage en prenant en compte les contraintes liées à chacun des deux procédés. L'évolution de la topographie de surface après fraisage permet de trouver le point de fonctionnement pour passer du fraisage au polissage. Grâce à un modèle prédictif de la rugosité, une gamme de polissage et le temps associé peuvent être définis. Ainsi, en jouant sur cet ensemble de paramètres, une réduction du temps total de fabrication peut être réalisée. Afin de valider ces modèles, des essais sont menés sur un moule en aluminium destiné au soufflage de bouteilles en plastique.

Mots-clés— Moule, fraisage, polissage, modèle prédictif

I. INTRODUCTION

La conception et la production de moules jouent un rôle majeur dans le coût et la qualité du produit final. L'augmentation de la compétitivité et les fréquents changements de forme des moules, nécessite d'estimer précisément le coût de production et d'améliorer le processus global de fabrication.

La fabrication d'un moule se décompose généralement en deux étapes : l'usinage et le polissage. A partir d'une pièce brute, le procédé d'usinage permet d'obtenir une forme proche du modèle CAO. Néanmoins, la qualité de la topographie de surface obtenue après fraisage n'est pas suffisante en particulier pour les critères de rugosité. Par exemple, les moules utilisés pour le soufflage de bouteilles en plastique doivent avoir une surface « poli-miroir » afin de garantir la transparence de la bouteille. Par conséquent, un processus d'abrasion est utilisé pour polir la surface issue d'usinage et atteindre cet aspect « poli-miroir ».

Dans la littérature, de nombreuses études améliorent chacun des deux procédés indépendamment.

Concernant le fraisage, plusieurs modèles sont développés pour améliorer la qualité de la surface obtenue. L'objectif est

d'obtenir la meilleure qualité de surface en terme de critères d'états de surfaces pour une erreur de corde donnée [1]. D'un point de vue de la stratégie d'usinage, différentes trajectoires d'usinage ont été développées, comme la stratégie isocrète, dans le but de contenir les écarts géométriques au nominal en dessous d'une tolérance donnée tout en minimisant la distance parcourue [2]. Des études sont également menées pour diminuer le temps d'usinage. L'estimation de la vitesse d'avance pour l'usinage de formes complexes est souvent améliorée grâce à la prise en compte des caractéristiques cinématiques de la machine [3]. Grâce à l'optimisation de la trajectoire et à son exécution par une interpolation en temps réel, la qualité de surface obtenue peut être améliorée.

Concernant le polissage, la modélisation de l'abrasion pour les surfaces de formes complexes reste un obstacle scientifique et technique pour obtenir une optimisation et une automatisation du procédé [4]. La quantification de l'abrasion est principalement donnée par le taux d'enlèvement de matière (TEM) qui correspond à la hauteur de matière enlevée par unité de temps. Pour modéliser le TEM, deux approches différentes existent : les modèles analytiques et les modèles expérimentaux. Les modèles analytiques sont basés sur la modélisation de l'interaction entre l'outil et la pièce au niveau des particules abrasives [5]. Dans le contexte de pièces mécaniques comme les moules destinés au soufflage, les modèles utilisés sont plutôt expérimentaux, issus de l'analyse de nombreux essais. Dans ces modèles, le TEM dépend de la vitesse et de la pression entre l'outil de polissage et la pièce à polir et parfois de constantes à déterminer [6]. La plupart de ces modèles ne prennent pas en compte les caractéristiques géométriques de la surface à polir.

Cependant, pour optimiser le procédé global de fabrication d'un moule, le fraisage et le polissage ne peuvent pas être améliorés indépendamment. Ils sont étroitement liés par le motif obtenu après fraisage sur la surface, la gamme de polissage dépendant fortement de cette topographie de surface. Peu de travaux portent sur la caractérisation de ce lien entre fraisage et polissage. Souza et al. estiment la rugosité en fonction des différentes trajectoires d'usinage et déterminent le temps de polissage associé à cette rugosité [7]. Boujelbene montre l'impact des tolérances d'usinage et du mode d'interpolation en fraisage sur le temps de polissage [8]. Bien que ces études fournissent des modèles prédictifs de temps de

polissage en interaction avec l'opération de fraisage, la variation de paramètres de fraisage qui génèrent la topographie de surface de finition n'a pas été étudiée. Il est ainsi nécessaire d'étudier plus en détail la relation entre la stratégie d'usinage et la gamme de polissage afin d'optimiser le procédé global de fabrication.

L'objectif de ce papier est donc de proposer une méthode permettant de prédire le temps global du procédé (fraisage + polissage) en prenant en compte des conditions actuellement utilisées industriellement en fraisage et en polissage. Il est possible de trouver un point de fonctionnement optimal entre le fraisage et le polissage. Contrairement aux deux études présentées précédemment [7] [8], la stratégie définissant la trajectoire et les tolérances d'usinage ne varient pas. Pour un mode de parcours par plan parallèles et une hauteur de crête bornée, seule l'influence du pas longitudinal et du pas transversal de la trajectoire est étudiée pour établir leur interaction avec le temps de polissage.

Ce papier se présente de la façon suivante ; la partie 2 traite des relations entre la topographie de surface obtenue en fraisage de finition et le temps réel de fraisage. Ensuite dans une troisième partie, cette topographie de surface est reliée au temps de polissage en fonction des différents disques abrasifs utilisés. Puis, une méthode, destinée à minimiser le temps global de fabrication, est détaillée dans la partie 4. La dernière partie est consacrée à la validation expérimentale sur un cas d'étude de moules destinés au soufflage de bouteilles en plastiques.

II. LIEN ENTRE TOPOGRAPHIE DE SURFACE ET TEMPS DE FRAISAGE

A. Topographie de surface

Les modèles de topographie de surface dépendent des paramètres de la stratégie d'usinage. Deux approches existent : une approche expérimentale et une approche théorique. Expérimentalement, des mesures de topographie de surface permettent d'établir le lien entre l'avance, la direction et l'orientation de l'outil et la topographie 3D obtenue [9]. Malheureusement ce résultat est seulement qualitatif et il ne permet pas d'établir la relation entre les paramètres de fraisage et la topographie obtenue. Avec une approche théorique, il est possible de décrire la surface obtenue en fraisage avec un outil hémisphérique à partir de simulations numériques [10]. De récents travaux ont montré qu'il est possible de prendre en compte les conditions de coupe dans les simulations (pas transversal et vitesse d'avance) [11]. La Figure 1.A représente ainsi la topographie de surface obtenue après fraisage avec un outil hémisphérique. Les effets des paramètres d'usinage (f_z , p) sont facilement identifiables.

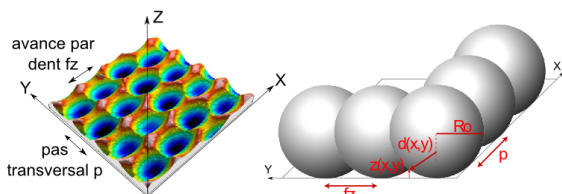


Figure 1. (1.A) TOPOGRAPHIE DE SURFACE (1.B) MODELE

Quinsat et al. proposent une manière simple de déterminer la topographie de surface avec un outil hémisphérique [12]. Chaque passage de dent peut être localement modélisé par une sphère dont le rayon correspond au rayon de l'outil. Le motif généré par la révolution de toutes les dents et le déplacement de l'outil se traduit par la juxtaposition de plusieurs sphères (Figure 1.B). Le motif dépend seulement de l'avance à la dent (f_z), du pas transversal (p), et du rayon de l'outil (R_0). Les tolérances d'usinage sont négligées dans le modèle. Dans le but de caractériser le polissage après le fraisage, le volume de matière restant V est modélisé et évalué. Le volume V laissé après fraisage peut être évalué en considérant la hauteur des marques laissées par les sphères en usinant un plan théorique. En faisant l'hypothèse d'une juxtaposition symétrique des sphères, le volume restant peut être évalué sur un motif de taille (f_z , p) par l'équation (1) :

$$\text{éq. (1): } V = \int_{-\frac{f_z}{2}}^{\frac{f_z}{2}} \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} z(x, y) dx dy$$

où la hauteur peut être exprimée comme la distance entre un point courant de la sphère (x, y) et le plan (équation (2) et (3)) :

$$\text{éq. (2): } z(x, y) = R_0 - \sqrt{R_0^2 - d(x, y)^2}$$

$$\text{éq. (3): } d(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$$

V est le volume, laissé après l'usinage de finition, qu'il sera nécessaire d'enlever par la suite pendant l'opération de polissage. Ainsi, la valeur de V a un impact déterminant sur le temps de polissage (voir partie 3). La surface usinée est localement approximée par un plan. Cette approximation est pertinente dans les zones à faibles courbures. Ce volume peut évidemment être diminué en réduisant les paramètres d'usinage (f_z et p), mais cela conduit à une augmentation du temps de fraisage. Ainsi, il est nécessaire de définir une relation entre le volume restant V et le temps de fraisage t pour choisir par la suite les paramètres permettant une optimisation globale du procédé.

B. Estimation du temps de fraisage de finition

Le temps de fraisage dépend de la stratégie utilisée, des conditions de coupe comme l'avance à la dent f_z , le pas transversal p , mais aussi des performances de la machine-outil utilisée. La vitesse, l'accélération et le jerk sur chaque axe sont limités ce qui peut entraîner des diminutions de la vitesse d'avance par rapport à celle initialement programmée. À cause de ces limites cinématiques et de la géométrie de la trajectoire, en particulier au niveau des discontinuités et des fortes courbures, la vitesse d'avance réelle varie au cours de l'exécution de la trajectoire. Ainsi, une estimation du temps d'usinage basée une distance parcourue par l'outil ne serait pas pertinente.

Le temps de fraisage est donné par l'évolution de la vitesse d'avance réelle le long de la trajectoire s (équation (4)).

$$\text{éq. (4): } t_{\text{fraisage}} = \int_{s=0}^L \frac{1}{s} ds$$

En notant $\mathbf{q}$ les positions des axes, pour une abscisse curviligne s , la vitesse pour chacun des axes $\dot{\mathbf{q}}$ est fonction de la géométrie $\mathbf{q}_s$ multipliée par des éléments de la loi de mouvement $\dot{s}$ (équation (5)). Cette formule est valable pour chaque axe de la machine (X, Y, Z). L'accélération $\ddot{\mathbf{q}}$ et le jerk $\dddot{\mathbf{q}}$ pour chacun des axes sont obtenus de la même manière (équation (6) et équation (7)).

$$\text{éq. (5): } \dot{\mathbf{q}}(s) = \frac{d\mathbf{q}(s)}{dt} = \frac{d\mathbf{q}(s)}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \mathbf{q}_s(s) \dot{s}$$

$$\text{éq. (6): } \ddot{\mathbf{q}}(s) = \mathbf{q}_{ss}(s) \dot{s}^2 + \mathbf{q}_s(s) \ddot{s}$$

$$\text{éq. (7): } \dddot{\mathbf{q}}(s) = \mathbf{q}_{sss}(s) \dot{s}^3 + 3\mathbf{q}_{ss}(s) \dot{s} \ddot{s} + \mathbf{q}_s(s) \dddot{s}$$

Une approximation de la vitesse d'avance respectant les contraintes cinématiques est donnée par l'équation (8). Une description plus détaillée de cette détermination de vitesse maximale atteignable est présentée dans [13].

$$\text{éq. (8): } \dot{s} \leq \min_{i=1 \text{ à } 3} (F_{prog}, \frac{\dot{q}_{max}^i}{|q_s^i|}, \sqrt{\frac{\ddot{q}_{max}^i}{|q_{ss}^i|}}, \sqrt[3]{\frac{\dddot{q}_{max}^i}{|q_{sss}^i|}})$$

- où :
- i représente chaque axe X, Y , et Z
 - F_{prog} : vitesse d'avance programmée
 - $\dot{q}_{max}, \ddot{q}_{max}, \dddot{q}_{max}$: vitesse, accélération et jerk maximaux des axes
 - q_s, q_{ss}, q_{sss} dérivées géométriques

Une fois la relation entre le temps de fraisage $t_{fraisage}$ et le volume restant V établie, il est possible d'étudier l'influence des paramètres d'usinage f_z, p , et Ro sur le procédé suivant. Dans ce but, une caractérisation du procédé d'abrasion entre le matériau du moule et les disques abrasifs doit tout d'abord être effectuée.

III. CARACTERISATION DU POUVOIR ABRASIF DE DISQUES ABRASIFS

Dans le processus de polissage des moules de soufflage, souvent en aluminium de série 7000, des disques constitués de particules abrasives en Al_2O_3 sont utilisés. Pour ce couple outil-matière, une démarche expérimentale identique à celles menées par Lacharnay et al. [14] est réalisée. A l'aide d'une polisseuse automatique, plusieurs papiers sont utilisés pour polir des surfaces planes présentant différentes topographies initiales. Le choix de la pression et de la vitesse relative est basé sur les travaux de Lee et al. [15] afin d'être proche des conditions utilisées actuellement par les opérateurs. Pour ces essais, 3 grades de papiers différents sont utilisés (150, 240, 400). Pour chaque expérience, le polissage automatique est interrompu toutes les deux secondes afin de mesurer la rugosité arithmétique surfacique S_a (ISO 25178-2). La Figure 2 montre la diminution de S_a en fonction du temps. Ainsi, à partir d'une valeur initiale de S_a , obtenue après usinage de la surface avec un outil hémisphérique de diamètre 8, il est possible de déterminer la valeur la plus faible réalisable par un papier et le temps nécessaire pour l'obtenir. Quel que soit le papier utilisé,

S_a décroît de manière similaire en fonction du temps jusqu'à atteindre une valeur limite pour ce couple outil-matière.

Comme l'aspect « poli-miroir » ne peut pas être obtenu avec un procédé d'abrasion deux corps, il est nécessaire d'ajouter une opération d'abrasion trois corps avec de la pâte à diamant. Cependant, cette dernière opération n'est pas étudiée dans ces travaux. L'usure des abrasifs, principalement par encrassement, n'est également pas évaluée.

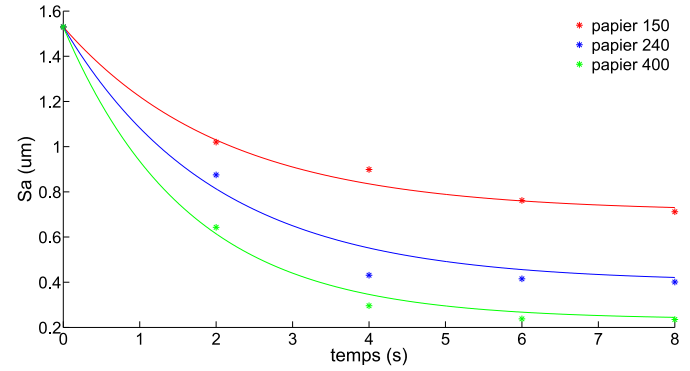


Figure 2. EVOLUTION DE S_a EN FONCTION DU TEMPS

A partir de l'analyse des évolutions du S_a (Figure 3) pour le premier papier, celles-ci peuvent s'approximer par une courbe exponentielle décroissante (équation (9)). Ainsi, dans l'équation (9), B est la valeur limite atteignable par le papier et $A+B$ est la valeur initiale.

$$\text{éq. (9): } S_a = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + B$$

Par conséquent, en faisant varier le pas transversal p , il est possible d'estimer l'impact du changement de volume V sur le temps de polissage pour le premier papier. Les résultats pour différentes valeurs initiales de S_a sont donnés pour un papier abrasif. La Figure 3 montre que pour chaque hauteur de crête programmée expérimentalement (variation de p), la même valeur finale de S_a est atteinte, mais des valeurs de τ différentes sont obtenues.

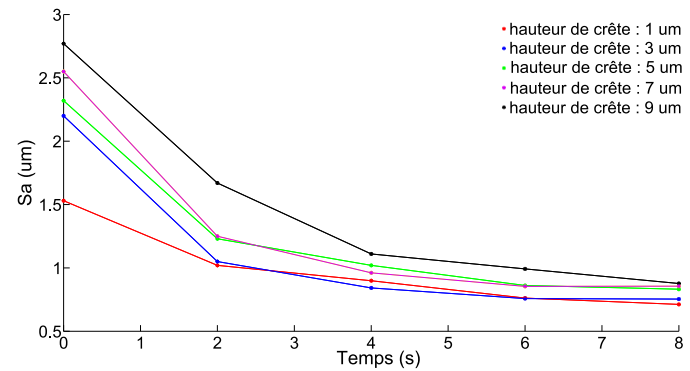


Figure 3. EVOLUTION DE S_a POUR PAPIER 150

La Figure 4 permet de déterminer l'évolution de τ en fonction du volume laissé après le fraisage réalisé par un outil hémisphérique de diamètre 8 mm. Pour chaque papier, τ dépend de V et son évolution peut être approximée par une courbe polynomiale de degré 2.

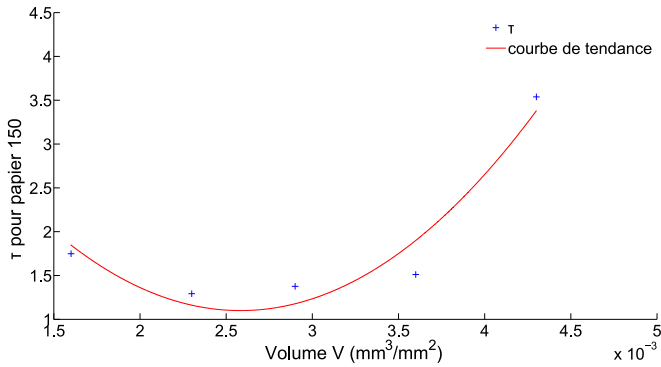


Figure 4. EVOLUTION DE τ EN FONCTION DU VOLUME

En résumé, S_a dépend du papier utilisé et du volume laissé en fraisage V . Son évolution peut être modélisée par l'équation (10). Finalement, l'équation (11) donne une estimation du temps de polissage.

$$\text{eq. (10): } S_a = (S_a^{\text{ini}} - S_a^{\text{papier}}) \cdot e^{\frac{-t}{a \cdot V^2 + b \cdot V + c}} + S_a^{\text{papier}}$$

$$\text{eq. (11): } t = -\ln \left(\frac{S_a^{\text{souhaité}} - S_a^{\text{papier}}}{S_a^{\text{ini}} - S_a^{\text{papier}}} \right) \cdot (a \cdot V^2 + b \cdot V + c)$$

Ainsi, plus τ est grand, plus il sera long d'usiner. La Figure 4 montre qu'il y a un volume minimal V défini par le point le plus bas de la courbe. Quand le volume V est trop faible, le papier abrasif commence par détériorer l'état de surface avant de finir par l'améliorer. En effet, avoir un volume V petit requiert un temps d'usinage plus long et aucun temps de polissage ne serait gagné.

Dans cette partie, nous avons proposé une méthode afin d'estimer le temps de polissage du premier papier utilisé dans la gamme de polissage. Ce temps dépend du volume V laissé après le fraisage de finition. Ce volume V est donc aussi lié au temps d'usinage notamment à travers les paramètres f_z et p .

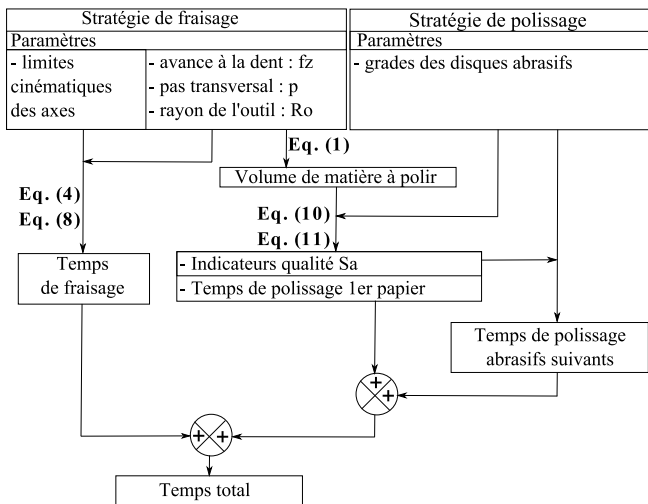


Figure 5. RESUME DE LA METHODE D'ESTIMATION DU TEMPS D'USINAGE ET DE POLISSAGE

IV. MISE EN PLACE D'UN POINT DE FONCTIONNEMENT ENTRE FRAISAGE ET POLISSAGE

Les deux parties précédentes ont permis de montrer que les temps de polissage et d'usinage dépendent de paramètres communs : l'avance à la dent f_z , le pas transversal p et le rayon de l'outil R_o . Ainsi, ces parties ont permis de mettre en évidence le lien entre le temps de fraisage de finition et le temps de polissage. La méthode mise en place est résumée sur la Figure 5.

V. APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL

La méthodologie présentée précédemment est appliquée à un moule (Figure 7) utilisé dans le soufflage de bouteilles en plastique.

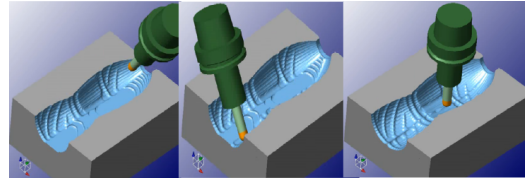


Figure 6. FRAISAGE D'UN MOULE

Le fraisage du moule est réalisé par un outil hémisphérique de diamètre 8 mm sur une machine 4 axes, avec 3 orientations différentes pour un demi-moule et une stratégie d'usinage par plans parallèles (Figure 6). Étant donné la géométrie complexe du moule (présence de nombreuses cannelures), la méthode présentée dans cet article est appliquée dans un premier temps sur la zone centrale du moule définie sur la Figure 7 avant d'être mise en place sur l'ensemble d'un demi-moule.

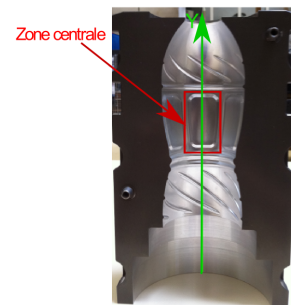


Figure 7. ZONES ETUDIEES : ZONE CENTRALE ET DEMI MOULE

A. Zone centrale

1) Estimation du temps d'usinage

Les parties précédentes ont permis de construire une méthode pour estimer le temps de fraisage en fonction de 4 paramètres : l'avance à la dent f_z , le pas transversal p , le rayon de l'outil R_o et les limites cinématiques des axes.

A partir de l'équation (8), la prédiction de la vitesse d'avance maximale peut être calculée grâce à la connaissance de la géométrie de la surface à usiner et des limites cinématiques de la machine-outil. Les résultats donnés en Figure 8 sont évalués pour une passe le long de l'axe Y . Les vitesses de la zone centrale correspondent à la partie encadrée. En utilisant cette méthode, il est possible d'estimer le temps d'usinage pour les paramètres utilisés industriellement ($f_z = 0.35/2$ mm/tr, $p = 0.4$ mm, $R_o = 4$ mm), et les limites cinématiques des axes du centre

d'usinage DMG HSV 75V linear utilisé. Avec le modèle, l'estimation la plus faible du temps de fraisage pour couvrir toute la zone centrale est d'environ 2 minutes et 31 secondes. Dans le but de valider ce modèle, la trajectoire a été exécutée, et le temps d'usinage mesuré est de 2 minutes et 41 secondes. Ainsi, l'estimation proposée est validée.

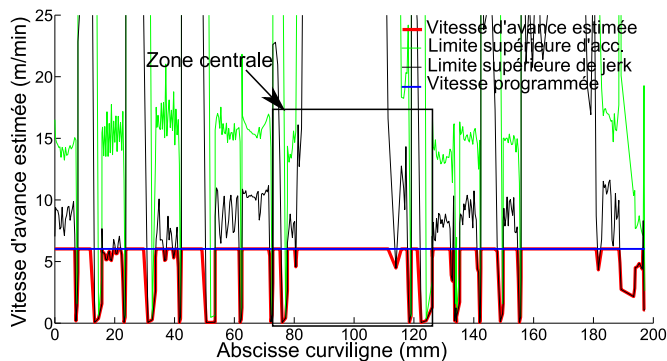


Figure 8. TEMPS D'USINAGE : ZONE CENTRALE

2) Estimation du temps de polissage

Pour les paramètres industriels ci-dessus, le temps de polissage pour la zone centrale est estimé à 2 minutes 43 secondes pour le premier papier (P150). Ce résultat est en accord avec les temps de polissage effectifs observés.

3) Choix d'un point de fonctionnement entre fraisage et polissage

Pour choisir la gamme complète de fabrication, les temps de fraisage et de polissage peuvent être estimés pour différents paramètres. ($p = 0.1$ à 0.5 mm avec un pas de 0.1 mm, $R_o = 2$ à 6 mm avec un pas de 1 mm et $f_z = 2.R_o/45$). Les valeurs de f_z sont celles classiquement recommandées par les fabricants d'outils. Les différentes possibilités obtenues sont données sur la Figure 9.

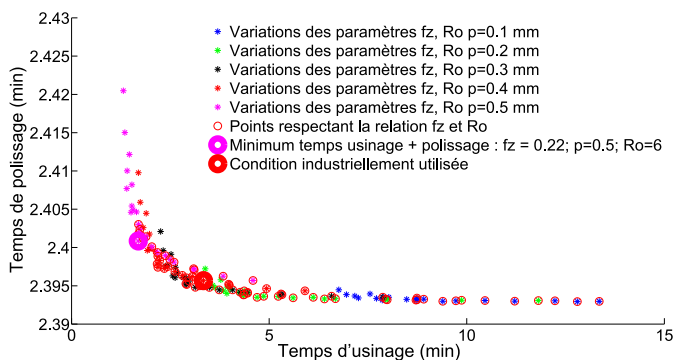


Figure 9. TEMPS D'USINAGE ET DE POLISSAGE : ZONE CENTRALE

Plus le pas transversal p est élevé, plus le temps d'usinage est faible. Le temps de polissage devient plus élevé, mais son augmentation est faible comparativement à l'augmentation du temps de fraisage si on diminue p . La Figure 10 montre que toutes les possibilités ne conviennent pas car l'avance ne peut pas excéder une certaine valeur en fonction du rayon de l'outil.

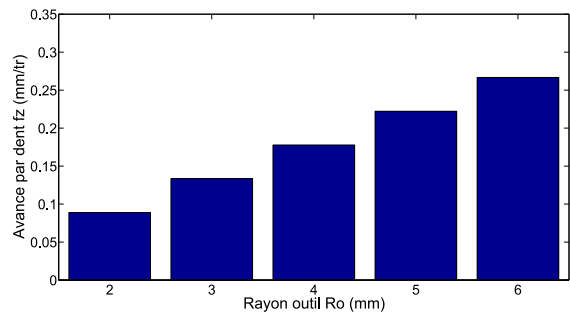


Figure 10. CONTRAINTES RAYON OUTIL ET AVANCE

Les paramètres qui minimisent le temps total de fabrication, sans favoriser le temps d'usinage ou le temps de polissage, permettent de faire un gain d'environ 50% par-rapport à ceux utilisés industriellement. Il y a plusieurs points qui donnent pratiquement le même temps total, l'opérateur peut ainsi choisir les paramètres selon ses besoins en ayant une estimation du temps pour chacun des deux procédés.

B. Zone 2 : demi-moule

1) Estimation du temps d'usinage

Les résultats présentés sur la Figure 8 sont évalués pour une passe suivant Y . En effectuant une estimation sur un demi-moule complet pour les conditions choisies avant optimisation ($f_z = 0.35/2$ mm/tr, $p = 0.4$ mm et $R_o = 4$ mm), le temps de fraisage est d'environ 20 minutes et 30 secondes et expérimentalement le temps est d'environ 21 minutes. Ainsi, l'estimation semble être correcte pour le demi-moule.

2) Estimation du temps de polissage

Le moule étudié est une surface complexe, non plane avec de nombreuses cannelures (Figure 7). Ainsi, pour estimer le temps de polissage sur le demi-moule, il est nécessaire d'ajouter le temps supplémentaire nécessaire pour réaliser ces cannelures. Les polisseurs manuels passent environ 25 secondes à polir une cannelure, ce temps doit donc être ajouté à l'estimation du temps de polissage.

De plus, une autre hypothèse de cette étude consiste à ne pas tenir compte de l'usure du papier abrasif. Pourtant, les polisseurs manuels changent le papier abrasif environ toutes les 50 secondes et chaque changement dure environ 10 secondes. Ce temps doit également être ajouté au temps de polissage. En prenant en compte ces remarques, le temps de polissage pour les paramètres définis précédemment est d'environ 18 minutes avec le papier 150.

3) Choix d'un point de fonctionnement entre fraisage et polissage

La répartition du temps d'usinage et de polissage est donnée sur la Figure 11. Les temps d'usinage et de polissage sont quasiment similaires pour $p = 0.5$ mm. Cependant, l'étendue des valeurs est moins importante en polissage. Ce comportement est dû aux hypothèses qui considèrent constante l'usure du papier abrasif quel que soit le volume V laissé en fraisage. De plus, le temps pour polir les cannelures est le même pour différents V . Une étude supplémentaire pourrait être menée pour prendre en compte l'usure, mais il est possible de gagner environ 50% de temps d'usinage sur un demi-moule en considérant que le temps de polissage varie très peu.

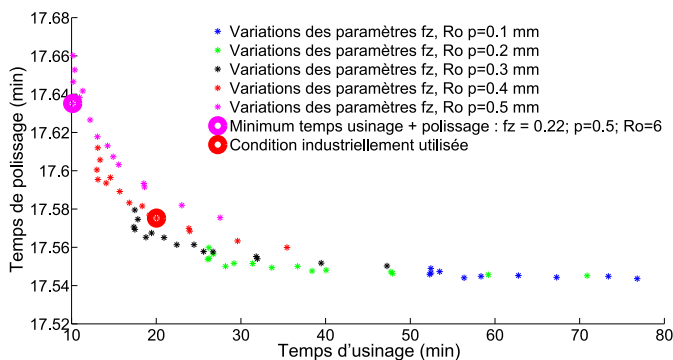


Figure 11. TEMPS D'USINAGE ET DE POLISSAGE POUR UN DEMI-MOULE

VI. CONCLUSION

L'augmentation de la compétitivité dans la production de moules et de matrices exige une optimisation du processus global de fabrication incluant le fraisage et le polissage. Par conséquent, l'objectif de cet article est d'optimiser ces deux procédés simultanément par la définition d'un point de fonctionnement entre les deux. Des indicateurs sur le temps de fraisage et le temps de polissage ont été proposés. Comme les temps de fraisage et de polissage dépendent des mêmes paramètres, il est possible d'estimer leur influence relative. Grâce à des mesures expérimentales, un modèle pour estimer le temps de polissage a été mis en place pour différents papiers abrasifs. En faisant varier ces paramètres, il a été possible d'estimer les différents temps associés et les temps globaux de fabrication. Cette méthode peut permettre à une entreprise de choisir les paramètres les plus appropriés en fonction des dispositions du matériel. Cette méthode a été mise en place sur un moule de soufflage de bouteilles en plastiques, et les estimations de temps sont proches de la réalité, en particulier dans les endroits où il n'y a pas trop de cannelures. La méthode pour estimer le temps de polissage pourrait être améliorée en prenant en compte les cannelures et l'usure des disques abrasifs.

VII. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été menés au sein du groupe de travail « Manufacturing 21 », regroupant 18 laboratoires de recherche français où les thèmes abordés sont la modélisation des interactions outil matière, le comportement mécanique des structures articulées, l'usine numérique et les procédés innovants et durables.



VIII. REFERENCES

- [1] A. Flutter and J. Todd. A machining strategy for toolmaking. *Computer-Aided Design*, 33(13):1009–1022, November 2001.
- [2] C. Tournier and E. Duc. A Surface Based Approach for Constant Scallop Height Tool-Path Generation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(5):318–324, 2002.
- [3] X. Beudaert, S. Lavernhe, and C. Tournier. Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57(0):73–82, 06 2012.
- [4] X. Pessoles and C. Tournier. Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7):3665–3673, April 2009.
- [5] S. Oh and J. Seok. An integrated material removal model for silicon dioxide layers in chemical mechanical polishing processes. *Wear*, 266(7-8):839–849, March 2009.
- [6] F. Klocke and R. Zunke. Removal mechanisms in polishing of silicon based advanced ceramics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1):491–494, 2009.
- [7] A. Fagali de Souza, A. Machado, S. Fischer Beckert, and A. Eduardo Diniz. Evaluating the Roughness According to the Tool Path Strategy When Milling Free Form Surfaces for Mold Application. *Procedia CIRP*, 14(0):188–193, 2014.
- [8] M. Boujelbene, A. Moisan, N. Tounsi, and B. Brenier. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(1):101–107, January 2004.
- [9] D.A. Axinte and R.C. Dewes. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(3):325–335, October 2002.
- [10] B.H. Kim and C.N. Chu. Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method. *Computer-Aided Design*, 31(8):485–494, July 1999.
- [11] I. Buj-Corral, J. Vivancos-Calvet, and A. Dominguez-Fernández. Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53(1):151–159, February 2012.
- [12] Y. Quinsat, L. Sabourin, and C. Lartigue. Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness parameter. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3):135–143, 01 2008.
- [13] X. Beudaert, P-Y. Pechard, and C. Tournier. 5-axis tool path smoothing based on drive constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(12):958–965, December 2011.
- [14] V. Lacharnay, C. Tournier, and G. Poulachon. Design of experiments to optimise automatic polishing on five-axis machine tool. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 12(1):76–87, 2012.
- [15] H. S. Lee, M.S. Park, M.T. Kim, and C. N. Chu. Systematic finishing of dies and moulds. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(9):1027–1034, July 2006.