

Étude de machine mobile pour l'usinage de pièces de grandes dimensions

O. LEGOFF ^a, M. RITOU ^b, C. MAURIN ^c, S. BONNET ^d, B. FURET ^b

a. Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N, UMR CNRS 6004),
Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes – France

olivier.legoff@ec-nantes.fr

b. Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N, UMR CNRS 6004),
Université de Nantes, 2 av. J Rouxel, 44475 Carquefou – France

mathieu.ritou@univ-nantes.fr

c. Naval Group, centre de Nantes Indret, 44620 La Montagne – France

cyril.maurin@naval-group.com

d. Capacités, 26 boulevard Vincent Gâche, 44200 Nantes – France

samuel.bonnet@capacites.fr

Résumé :

L'usinage de pièces de grandes dimensions présente de grandes difficultés quant à la maîtrise de la précision des réalisations et à la manipulation des pièces. Cet article propose une approche originale visant à déplacer des moyens de productions mobiles sur la pièce, afin d'effectuer les usinages. Il est nécessaire de définir un moyen de production permettant de respecter les spécifications locales et dont le repositionnement entre séquences d'usinage assure la précision globale requise. Des essais de faisabilité ont été réalisés avec deux moyens mobiles en suivant un protocole expérimental similaire. Les résultats de ces essais permettent de proposer le moyen de production le plus pertinent et pour chaque moyen sa configuration optimale afin de respecter les spécifications. La modélisation des défauts fabriqués proposée permet d'analyser les défauts générés et de prédire la précision géométrique atteignable en fonction de la précision de repositionnement de la machine mobile.

Abstract :

The machining of large dimension part presents issues of accuracy and of part handling. Machine-tools of large capacity are classically used, but they are very expensive. The paper investigates original solutions with mobile machines for milling operations. A comparative study of a machining robot and of a portable milling machine is performed. Instrumented experiments of face milling operation were carried out and the resulting quality was analyzed. Finally, the possible accuracy for the part is assessed by tolerance stacking, in relation to the positioning accuracy of the mobile machine.

Mots clefs : machine mobile, usinage, grande dimension, précision

1 Introduction

De nombreux secteurs nécessitent la fabrication de pièces précises de grandes dimensions : naval, ferroviaire, nucléaire, aéronautique, énergies renouvelables, etc. Leur usinage est généralement effectué sur machine-outil, ce qui garantit une qualité maîtrisée. Mais des difficultés spécifiques apparaissent :

- le transport et la manipulation des pièces dans l'atelier : limite des infrastructures, durée ;
- le posage de la pièce permettant d'atteindre les zones à usiner et son réglage ;
- l'investissement dans une machine-outil difficile à rentabiliser ;
- les conditions de travail ;
- les coûts qui résultent des points précédents.

Des machines-outils adaptées, à des coûts raisonnables, existent pour l'usinage de grands profilés, ayant une grande dimension (avec un embarreur) ; ou de grandes plaques, ayant deux grandes dimensions (avec un routeur ou une machine à portique). Par contre, si la pièce est grande suivant ses trois dimensions, elle présente alors un très grand volume (par exemple, 12m x 4m x 3m, pesant alors une centaine de tonnes) et les choses sont plus complexes. Des machines-outils de très grandes dimensions, coutant plusieurs millions d'euros, sont alors nécessaires. Il s'agit souvent d'aléuseuse, c'est-à-dire d'une machine-outil avec une colonne mobile supportant un bélier. En outre, des pièces avec de telles dimensions sont généralement produites en de faibles exemplaires, rendant ce lourd investissement difficile à rentabiliser.

Plutôt que d'amener une grande pièce dans une très grande machine, l'alternative est de placer de petites machines dédiées sur cette grande pièce [1]. Toutefois, un moyen mobile proposera souvent des fonctionnalités réduites de par sa structure minimale et une moindre précision, due à une moindre rigidité couplée aux erreurs de repositionnement. On trouve dans la littérature des approches d'aide à la décision pour le choix de moyens de production optimaux au regard de l'équilibre fonctionnalités / spécialisation [2]. D'autre part, ces dernières années, des robots industriels polyarticulés ont été utilisés pour l'usinage de pièces métalliques ou composites [3, 4, 5] et l'on sait que le choix de la structure de la machine va impacter la précision qui peut-être attendue [6].

Cet article présente une étude de faisabilité visant à mettre en place l'usinage par machine mobile pour le surfacage de plans sur des pièces de grande dimension. Nous avons retenu deux machines pour cette étude (un robot et une fraiseuse portative). Nous présentons ensuite le protocole expérimental mis en place pour les essais d'usinage et les résultats qui en découlent. Ces résultats sont ensuite mis en perspective par des simulations géométriques de la qualité atteignable.

2 Proposition de moyens d'usinage mobiles

Pour résoudre le problème de l'usinage de pièces de grandes dimensions, deux solutions de machine mobile ont été envisagées, dans le cadre du projet IRT-JV UBA3M (Figure 1). La première est un robot polyarticulé. Cette solution propose un grand espace de travail, au regard de l'espace nécessaire à son posage, et un dégauchissage facilité par les 6 degrés de libertés de sa structure. L'incertitude qui reste à lever concerne relative flexibilité d'une structure de ce type face aux efforts de coupe à supporter.

Après une recherche de moyens d'usinage mobile auprès de fournisseurs de moyens d'usinage plus traditionnels, nous avons également retenu une machine de fraisage portative qui dispose d'une structure plus rigide, malgré un espace de travail plus restreint et la nécessité d'un dégauchissage plus délicat de sa perpendicularité à la pièce.

La suite de cet article présente le protocole expérimental et les résultats obtenus avec ces deux moyens de production. Pour cette étude de faisabilité, nous nous sommes focalisés sur la mesure des défauts de forme et des états de surface de façon à définir le domaine d'utilisation optimal de chaque moyen. Le repositionnement de chaque machine sur la pièce n'est pas présenté ici mais certaines hypothèses seront faites afin de prédire une « capacité ».

3 Protocole expérimental

L'étude de faisabilité a donné lieu à une campagne d'essais avec les deux machines dont les principales caractéristiques sont :

- Robot d'usinage : robot 6 axes Kuka KR270 (portée de 2,7 m, 1267 kg), équipé d'une électrobroche Fischer 24 000 tr/min - 20kW.
- Fraiseuse mobile : courses X = 1524 mm, Y= 406 mm, Z=101 mm, pour 830 kg, équipé d'une broche hydraulique 500 tr/min.

Pour chaque machine, les surfacages ont été réalisés sur des plaques d'acier S355 de 1000x200x25 mm avec des fraises à surfacer à plaquette carbure et sans lubrification. Les paramètres des essais sont :

- L'outil : 3 outils (différents diamètres et géométries de plaquette).
- La stratégie d'usinage : directions et sens de la vitesse d'avance.
- Les conditions de coupe (engagement axial a_p , avance par dent f_z).

Les réponses observées visent à assurer un niveau de qualité acceptable :

- Mesures vibratoires en usinage : les broches ont été instrumentées pour permettre de mesurer les niveaux vibratoires.
- Contrôle visuel : les vibrations importantes ou mauvais états de surfaces constatés durant certains essais permettent de disqualifier certains jeux de paramètres.
- Mesures géométriques des surfaces usinées : les contrôles de rugosité Ra et de défauts de forme quantifient le niveau de qualité obtenu.



Figure 1. Machines mobiles des essais : robot d'usinage et fraiseuse portative.

4 Résultats

En ce qui concerne l'usinage robotisé, les résultats montrent qu'à partir de certains a_p le broutement et les vibrations mesurés deviennent significatifs et conduisent à des états de surfaces et ressauts entre passe non-acceptables. On observe notamment qu'en usinant en tirant, une instabilité survient en usinage à une fréquence propre structurelle du robot de 13,8 Hz). Ainsi le niveau vibratoire relevé dans les meilleures conditions est $V_{RMS} = 6,5$ mm/s (à droite de la Figure 2, dans les domaines

fréquentiels et temporels) et atteint $V_{RMS} = 68$ mm/s en cas d'instabilité (à gauche de la Figure 2). Néanmoins, un point de fonctionnement a pu être trouvé pour une fraise de diamètre 40 mm, avec à des états de surface acceptables. Ceci conduit à préconiser d'utiliser le robot en usinant exclusivement en poussant, sur une plage restreinte d'engagement a_p ni trop important (sinon vibration structurelle du robot) ni trop faible (sinon vibration liée à un refus de coupe de l'outil). Par ailleurs, l'engagement axial a_p est difficile à maîtriser d'une passe à la suivante, du fait des déflexions quasi-statiques du robot.

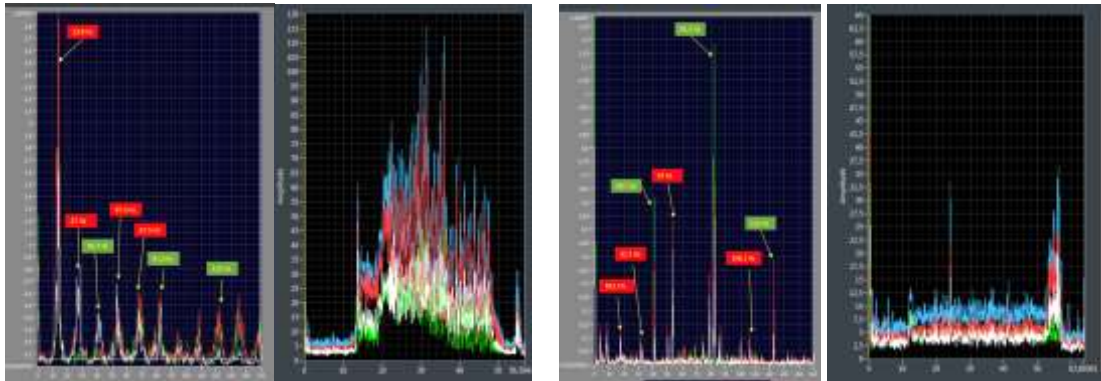


Figure 2. Vibrations en usinage robotisé en tirant (à gauche, instable), en poussant (à droite, stable).

Les usinages avec la fraiseuse portable se sont globalement bien passés et ont conduit à de bons états de surface sur la pièce ; en particulier avec une fraise de diamètre 80 mm. Nous avons observé que le comportement de la broche hydraulique varie selon la température d'huile (sa vitesse de rotation augmente lorsque la température d'huile augmente) et que des vitesses de rotation au-delà de 500 tr/min génèrent d'importantes vibrations, incompatibles avec les usinages à réaliser. De même, à partir d'un a_p de 2 mm, le niveau vibratoire élevé ($V_{RMS} = 60$ mm/s contre 14 mm/s dans de bonnes conditions) conduit à préconiser de rester en-deçà.

En se plaçant pour chaque moyen dans une configuration favorable (outil, stratégie, N), le Tableau 1 propose un comparatif entre les deux machines mobiles avec trois niveaux de qualité afin de définir le domaine d'utilisation possible ('0' = non acceptable, '+' = acceptable, '++' = recommandé).

Condition	Engagement a_p (mm)					Direction d'usinage			
	0,1	0,5	1	1,5	2	X+	X-	Y+	Y-
Robot	0	+	0	0	0	+	0	0	0
Fraiseuse	++	++	++	+	0	++	++	+	++

Tableau 1. Résultats en fonctions de la stratégie d'usinage et de l'engagement.

Dans la configuration optimale de chaque machine, les résultats de mesure des surfaces usinées sont donnés dans le Tableau 2 en terme de défaut de premier, deuxième et troisième ordre.

	Planéité Pt (mm)	Ondulation/ressaut Wt (μ m)	Etat de surface Ra (μ m)
Robot	0,8	7,3	1,1
Fraiseuse	0,4	3,3	3

Tableau 2. Qualité des surfaces usinées.

Ainsi, le robot permet d'atteindre une qualité acceptable mais dans des configurations trop restrictives ; alors que la fraiseuse portable donne toujours de bons résultats, ouvrant à davantage de possibilités.

5 Qualité géométrique

La précision intrinsèque des machines a été étudiée dans la section précédente. Les défauts liés au repositionnement des machines mobiles vont également influencer sur la précision des usinages. Or, du fait de leur cinématique et espace de travail très différents, de mêmes défauts de dégauchissage vont avoir des conséquences différentes au niveau de la pièce usinée. C'est le bien cumul de ces deux défauts qui donne la précision pouvant être obtenue au final sur la pièce de grandes dimensions.

Sur la base des modèles proposés par Legoff et al. [7][8], le graphe compacté de la Figure 3 représente la production sur la pièce P où deux lots de plans $\{p_{10}, p_{11}, p_{12}\}$ et $\{p_{20}, p_{21}, p_{22}\}$ doivent être surfacés, en deux posages M_1 et M_2 .

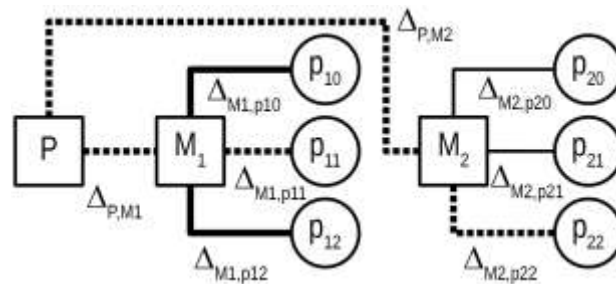


Figure 3. Graphe compacté d'usinage mobile de la machine M sur la pièce P.

Pour des opérations de surfacages où les surfaces usinées, de posage et de références sont des plans nominalement parallèles, chaque défaut peut être quantifié par deux angles et un déplacement normal. Les défauts de forme entre plans usinés considérés en zone commune (ZC) ne se cumulent pas, ils sont confondus, seul leur écarts de positions relatif augmentent ce défauts. Ainsi, dans notre modèle de défauts nous considérons :

- Défaut de dégauchissage du posage machine / repère de référence pièce : $\Delta P, M_i$
- Défaut de réglage de la machine (étalonnage, palpage) : $\Delta M_i, p_j$
- Défaut de forme de la surface usinée (dû aux déflexions machine en usinage) : DF

En faisant l'hypothèse que les moyens mis en œuvre pour le dégauchissage de la machine sur la pièce permettent d'obtenir une précision $\Delta P, M_i \leq \pm 0,5$ mm, et que la répétabilité de la machine est estimée à $\Delta M_i, p_j \leq \pm 0,2$ mm on peut alors prévoir les précisions obtenues par rapport au référentiel de la pièce ou entre plans tel que proposé dans le Tableau 3.

Localisation d'un plan par rapport au repère pièce	$\Delta P, p_{10} = \Delta P, M_1 + \Delta M_1, p_{10} + DF$
Planéité de n plans réputés coplanaires dans le même posage	$\Delta p_{10}, p_{12} = \Delta M_1, p_{10}/2 + \Delta M_1, p_{12}/2 + DF = \Delta M_i, p_j + DF$
Planéité de n plans réputés coplanaires issus de k posages	$\Delta p_{11}, p_{22} = \Delta P, M_1/2 + \Delta P, M_2/2 + \Delta M_1, p_{11}/2 + \Delta M_2, p_{22}/2 + DF = \Delta P, M_i + \Delta M_i, p_j + DF$

Tableau 3. Simulation de la qualité pièce en fonction des posages des machines mobiles.

Les tolérances géométriques que l'on peut associer à ces simulations en fonction des défauts de formes mesurés sur chaque machine lors des essais sont données dans le Tableau 4.

Tolérance	Fraiseuse DF = 0,4	Robot DF = 0,8
Localisation d'un plan par rapport au repère pièce	\oplus 1,8 P	\oplus 2,4 P
Planéité de n plans réputés coplanaires dans le même posage	\square 0,8 CZ	\square 1,2 CZ
Planéité de n plans réputés coplanaires issus de k posages	\square 1,8 CZ	\square 2,4 CZ

Tableau 4. Estimation des tolérances géométriques atteignables.

Le modèle que nous proposons ici permet d'estimer les tolérances fabricables moyennant des estimations raisonnables des capacités de réglages et de répétabilité en usinage.

6 Conclusion

Lors de cette étude de faisabilité, une centaine d'essais ont été réalisés sur deux machines mobiles envisagées pour l'usinage de pièce de grandes dimensions. Un point de fonctionnement a pu être trouvé pour le surfacage robotisé de pièce en acier. Néanmoins, les restrictions sont trop importantes, du fait du manque de rigidité d'un robot polyarticulé. Le second moyen envisagé, la fraiseuse mobile, est donc la machine préconisée même si son dégauchissage lors des changements de posage est être plus contraignant.

La précision intrinsèque des deux machines mobiles a été quantifiée par mesures géométriques des surfaces usinées. Une modélisation a été proposée afin de prédire les précisions atteignables compte tenu des défauts intrinsèques et de re-positionnement des machines mobiles.

La suite de cette étude de faisabilité consistera à valider que les repositionnements et réglages nécessaires lors des différents posages seront compatibles avec les précisions envisagées ici.

Références

- [1] L. Uriarte, M. Zatarain, D. Axinte, J. Yagüe-Fabra, S. Ihlenfeldt, J. Eguia, et A. Olarra. « Machine tools for large parts ». *CIRP Annals* 62/2 (2013) 731-50.
- [2] M. R., Abdi, « Fuzzy multi-criteria decision model for evaluating reconfigurable machines ». *International Journal of Production Economics* 117/1 (2009) 1-15.
- [3] A. Brunete, E. Gambao, J. Koskinen, T. Heikkilä, KB Kaldestad, I. Tyapin, G. Hovland, et al. Hard material small-batch industrial machining robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 54 (2018) 185-99.
- [4] W. Ji, L. Wang. « Industrial Robotic Machining: A Review ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (April 2019).
- [5] C. Dumas, A. Boudelier, S. Caro, S. Garnier, M. Ritou, B. Furet, Development of a robotic cell for trimming of composite parts, *Mechanics & Industry*, 12/6 (2011) 487-494
- [6] H. Chanal, E. Duc, et P. Ray. « A study of the impact of machine tool structure on machining processes ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46/2 (2006) 98-106.
- [7] O. Legoff, S. Tichadou, J-Y Hascoët. Manufacturing Errors Modelling: Two Three-Dimensional Approaches. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 218/12 (2004) 1869-1873.
- [8] S. Tichadou, O. Legoff, Geometric Manufacturing Simulation. In *Geometric Tolerancing of Products*, 275-304. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.