



HAL
open science

Méthodologie pour la génération d'opérations d'ébauche 5 axes

Jousselin Baptiste, Quinsat Yann, Christophe Tournier

► **To cite this version:**

Jousselin Baptiste, Quinsat Yann, Christophe Tournier. Méthodologie pour la génération d'opérations d'ébauche 5 axes. Machines et Usinage à Grande Vitesse, Jun 2018, Bordeaux, France. hal-02292471

HAL Id: hal-02292471

<https://hal.science/hal-02292471>

Submitted on 19 Sep 2019

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.



Méthodologie pour la génération d'opérations d'ébauche 5 axes

Baptiste JOUSSELIN^{(a)(b)}, Yann QUINSAT^(a), Christophe TOURNIER^(a)

*(a) LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France.
Mail : prénom.nom@ens-paris-saclay.fr*

*(b) Missler Software, 7 rue du Bois Sauvage, F-91055 Evry, France.
Mail : b.jousselin@topsolid.com*

Résumé : la définition des opérations d'ébauche de formes complexes est un élément clé pour l'amélioration du processus de fabrication des pièces. Ces opérations doivent maximiser le débit de matière retiré et réduire le temps global de fabrication en supprimant les reprises d'ébauches avant les opérations de finition. Dans ce contexte, le recours aux opérations 5 axes permet d'améliorer l'accessibilité de l'outil dans des zones en contre-dépouille, minimisant ainsi le volume de matière restant. Nous proposons donc une étude de différentes techniques de génération des trajectoires d'ébauche en fraisage 5 axes de pièces complexes de l'industrie aéronautique afin d'établir une optimisation des stratégies pour ce type d'opération. Ayant défini l'ébauche comme le balayage d'un volume de matière à retirer de la pièce, une première étape consiste à extraire ce volume à partir de la géométrie des pièces brutes et finies. Chacune des faces du volume extrait est alors analysée puis classée selon qu'elle permette l'accessibilité de l'outil sans collisions ou non. L'étape suivante aborde le partitionnement du volume extrait en sous-volumes afin d'évaluer la stratégie de balayage utilisée. Ce découpage s'appuie sur des surfaces telles que des offsets des bords du volume et des surfaces canoniques (plans, cylindres, etc.) générées par les mouvements articulaires. La dernière étape analyse alors les techniques de balayage d'un sous-volume en intégrant l'accessibilité des faces par l'outil et ainsi définir la solution adaptée en se basant sur des critères tels que le volume restant, la longueur de la trajectoire d'ébauche ou le débit de copeau.

Mots clés : usinage 5 axes, ébauche, partitionnement de volume, génération de trajectoires.

1 Introduction

Les pièces actuellement conçues dans le domaine aéronautique présentent des formes de plus en plus complexes dues, entre autres, à de fortes exigences en termes de poids et de durée de vie. Lors de leur phase de fabrication, ces formes génèrent alors des problèmes d'accessibilité de l'outil, comme les contre-dépouilles, ou nécessitent des longueurs d'outil importantes. L'utilisation d'opérations 3 axes pour la réalisation de ces pièces entraîne alors une baisse notable de la productivité (Gray, 2001). La gestion continue de l'orientation de l'outil sur une machine-outil à commande numérique (MOCN) 5 axes s'impose donc pour améliorer la productivité (Davim, 2016), rajoutant les problèmes de collisions liés à la mise en œuvre de ce type de machines. Cependant, si le recours à l'usinage avec 5 axes continus est fréquent pour les phases de demi-finition et de finition des pièces jugées complexes, il l'est beaucoup moins pour la phase d'ébauche, plus généralement réalisée avec des opérations 3 axes. Cette phase pourrait néanmoins s'avérer décisive vis-à-vis du temps d'usinage puisqu'elle représente 50% à 65% du temps total d'usinage dans le cas de la fabrication de pièces complexes telles que les moules ou les matrices (Fallböhmer, 1996).

L'opération de finition est conçue afin de garantir la qualité de la pièce finale (Olvera, 2012), le respect de la tolérance souhaitée sur la surface finie est donc privilégié par rapport au temps d'usinage, et par conséquent au débit de matière enlevée. À l'inverse, l'ébauche est conçue pour optimiser la productivité et retirer un volume de matière le plus important possible. De fait, si la phase d'ébauche ne permet pas de retirer suffisamment de volume, une phase dite de reprise d'ébauche est alors nécessaire avant de réaliser la finition. Il est ainsi possible de différencier ébauche et finition d'un point de vue géométrique : afin de garantir la qualité de la surface générée, les trajets de finition sont obtenus en considérant le parcours de l'outil sur une surface tandis que l'ébauche s'applique à le faire évoluer dans un volume pour garantir le débit.

Dans la phase d'ébauche, l'objectif est également d'obtenir une surface intermédiaire ayant une surépaisseur la plus constante possible par rapport à la surface finale afin de faciliter la réalisation de l'opération de finition. Ainsi, aux critères technologiques liés aux conditions de coupe, comme la garantie de la durée de vie de l'outil (Toh, 2003), s'ajoutent des critères géométriques (Krimpenis, 2009) liés au volume de matière restante et à sa distribution. Il est en effet nécessaire de minimiser le volume restant en fin d'ébauche et de s'assurer que la distribution volumique de matière restante soit la plus homogène possible le long des surfaces finies pour une meilleure qualité de finition. À l'inverse, une répartition trop hétérogène risque de générer des variations d'efforts importantes risquant de pénaliser la durée de vie de l'outil ainsi que la qualité de la surface finie, et d'induire une perte de productivité si une reprise d'ébauche est nécessaire. Afin de qualifier une opération d'ébauche, il est possible d'établir un critère issu de l'étude statistique des distances locales entre les points de la surface ébauchée et leurs projections sur les surfaces du modèle CAO 3D de la pièce finie (Krimpenis, 2009).

L'objet de ces travaux est de définir une méthodologie de choix de stratégie de génération des trajectoires pour l'ébauche 5 axes de pièces aéronautiques complexes. Leur finalité étant le développement d'une solution logicielle pour la FAO, cette stratégie doit rester au maximum indépendante de la machine. Les trajectoires sont alors calculées dans l'espace associé à la pièce, et la cinématique induite par les trajets générés ne fait donc pas l'objet de ces recherches. Dans une première partie, une synthèse des stratégies proposées pour ébaucher une pièce complexe est présentée. L'analyse de méthodes de découpage du volume de matière à retirer est ensuite exposée et discutée ainsi que la comparaison de plusieurs stratégies d'ébauche 5 axes au moyen de simulations d'usinage d'une pièce test de type rouet de compresseur radial, avant de conclure.

2 Les stratégies d'ébauche de pièces complexes

Le calcul des trajectoires pour une opération d'ébauche se décompose généralement en 3 étapes. La première étape concerne le choix du mode de génération des passes axiales (Figure 1). Classiquement, les différents modes utilisés sont des niveaux perpendiculaires à l'axe Z (Z-level), des niveaux offsets de la surface finie, ou des niveaux parallèles au brut (Dong, 1993), mais d'autres méthodes hybrides existent comme la génération de niveaux issus d'un morphing entre la surface finie et la surface brute (Lauwers, 2006).

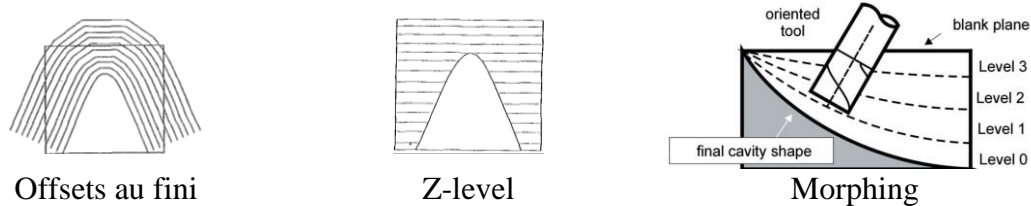


Figure 1 : stratégies principales de passes axiales

Ensuite, pour chacun des niveaux générés, une zone dans laquelle l'outil peut évoluer sans engendrer d'interférences avec le fini est délimitée. Une polygonisation des faces du fini permet alors de simplifier les calculs (Bala, 1991). Enfin, une stratégie de passes radiales pour balayer chaque niveau axial relimité est choisie. Ces stratégies de passes radiales sont le plus souvent des trajets linéaires, en zigzag, ou offsets des courbes frontières (Chen, 2011). D'autres stratégies moins courantes peuvent être appliquées (Figure 2), comme les courbes de remplissage de Hilbert (Makhanov, 2010) ou des combinaisons de solutions diverses (Li, 1994).

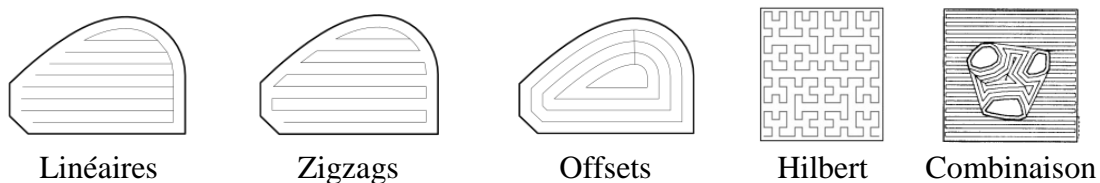


Figure 2 : stratégies principales de passes radiales

La stratégie privilégiée pour ébaucher une pièce reste l'ébauche 3 axes puisqu'elle permet une mise en œuvre aisée ainsi que des calculs simplifiés grâce à une orientation constante de l'outil au cours de l'usinage (Kim, 2013). Dans ce cadre, la stratégie de

passes axiales généralement utilisée est alors le Z-level, qui est plus efficace que les stratégies d'offsets de surfaces non planes et de morphing puisqu'elle permet l'utilisation d'outils cylindriques qui favorisent l'optimisation du débit de matière enlevée (Li, 1994), (Lee, 1991). Associées à cette stratégie de passe axiale, des stratégies de passes radiales en zigzag pour les surfaces planes et les cavités à géométrie simple (Toh, 2003), ou des passes offsets pour les cavités complexes (Hatna, 1998) sont utilisées. Bien que ces solutions soient très efficaces en termes de programmation et de réalisation de l'opération d'usinage pour des pièces simples, elles ne respectent pas les critères de qualité attendus pour l'ébauche de pièces présentant des géométries complexes comme des cavités composées de surfaces non planes et de contre-dépouilles par exemple. La quantité de matière restante peut être importante dans les zones en contre-dépouille, et la répartition est souvent très hétérogène.

Afin de répondre aux problèmes d'accessibilité, certains travaux s'intéressent à l'utilisation de stratégies en fraisage 5 axes positionnés. L'apport de ces derniers porte sur la détermination des posages nécessaires, avant d'appliquer pour chacun les stratégies d'ébauche 3 axes. Dans le cas de l'ébauche d'un canal inter-aube de rouet de compresseur radial, Heo *et al.* (Heo, 2008) déterminent les posages qui maximisent la quantité de matière enlevée en initialisant la première orientation sur le bord d'attaque de la surface de compression. Les posages suivants sont ensuite calculés de proche en proche en s'appuyant sur les isoparamétriques des surfaces de suction et compression pour imposer la normale de chaque posage. Le volume de matière à retirer est ainsi partitionné en zones, chacune étant associée à un posage particulier. Cette méthode est bien adaptée dans le cadre de l'usinage des rouets pour lesquels elle a été développée, néanmoins entre deux posages successifs elle peut générer des décalages conséquents pénalisant vis-à-vis du critère d'homogénéité de la distribution volumique de matière restante (Figure 3).

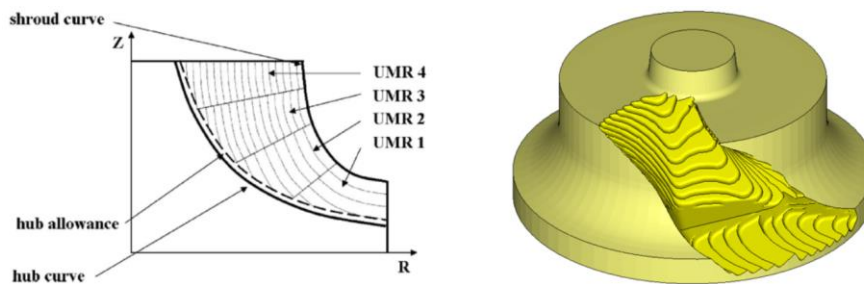


Figure 3 : méthode d'ébauche avec 5 axes positionnés

Une voie d'amélioration conséquente des procédés d'ébauche serait l'utilisation de stratégies 5 axes continues permettant d'accéder aux zones en contre-dépouille et de réduire les variations de matière restantes par orientation de l'outil. Dans la littérature, des techniques associant des stratégies 3 et 5 axes sont proposées. Ainsi des méthodes gardent une stratégie axiale par Z-level et utilisent localement une stratégie 5 axes à la rencontre de zones non accessibles par l'outil dans le cadre d'un fraisage 3 axes (Figure 4). Il est alors possible d'améliorer la distribution de matière restante en supprimer les escaliers sur des plans inclinés (Thompson, 2005) ou limiter les surépaisseurs en contre-dépouille (Shao, 2016) en inclinant l'outil lorsqu'il rencontre ces zones. Ces solutions permettent

de mieux respecter les critères de répartition volumique et de quantité de matière restante grâce à l'intégration du fraisage 5 axes. Cependant, elles reviennent à faire une ébauche 3 axes puis une reprise pour supprimer les surplus de matière. Il aurait été préférable d'intégrer plus globalement le 5 axes dans la génération de trajectoire par niveau de façon à éviter des augmentations brusques de l'engagement axial de l'outil lors du changement d'orientation.

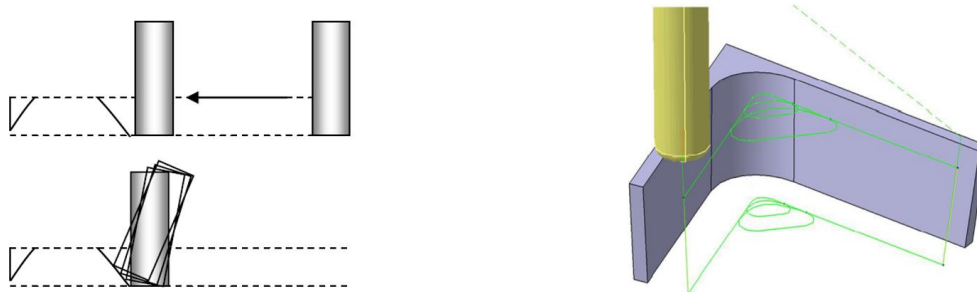


Figure 4 : méthodes hybrides 3/5 axes pour l'ébauche

Dans le cas d'une ébauche 5 axes simultanés, on peut reprendre la méthodologie de génération de trajectoires pour l'ébauche 3 axes, mais cette fois les possibilités de génération de passes axiales sont plus étendues grâce à la capacité de dépincer l'outil le long de ces surfaces. Il est alors possible de s'appuyer sur des surfaces plus complexes pour les passes axiales, par exemple les surfaces issues d'un morphing 3D entre surface brute et finie (Lauwers, 2006). Cependant cette technique ne permet pas de garantir un engagement axial constant de l'outil. Pour l'usinage d'un canal inter-aube, Young *et al.* proposent d'identifier et de regrouper les zones des surfaces de suction et compression pouvant être usinées par le flanc à égale profondeur de passe pour un outil hémisphérique évoluant le long de courbes isoparamétriques de ces surfaces (Young, 2004). Un engagement axial constant est alors garanti lors de l'usinage de chacune des zones définies. L'adaptation des stratégies de passes radiales sur les surfaces complexes est toutefois plus compliquée, notamment lors du calcul des dépinçages nécessaires. Qi *et al.* suggèrent alors, toujours dans le cas d'un canal inter-aubes, de choisir pour passes radiales des courbes isoparamétriques du moyeu, puis de calculer les dépinçages de l'outil par rapport à ce dernier selon les orientations des surfaces de compression et suction (Qi, 2009). C'est généralement ce type de stratégie qui est développé par les logiciels de FAO qui offrent une fonction d'ébauche 5 axes de rouets : après avoir choisi le type de passes axiales et les conditions de coupe, un balayage isoparamétrique de la surface du moyeu à l'outil hémisphérique est généré. Mais ces méthodes sont spécifiques aux pièces de type rouets et l'utilisation d'outils hémisphériques n'est pas pertinente pour une ébauche du point de vue de la maximisation du débit de matière.

3 Choix de stratégie à partir de l'étude du volume de matière à retirer du brut

La première étape nécessaire afin de comparer les stratégies d'ébauche consiste à déterminer le volume de matière à enlever. C'est à partir de cette étude qu'il sera possible d'orienter la recherche de stratégies d'usinage pertinentes en vue de le vider et finalement

de définir les trajectoires d'ébauche associées. Cette approche basée sur la définition du volume à retirer et non sur la géométrie de la pièce finie permet de limiter les *a priori* quant au choix de la stratégie d'ébauche. Le risque que des solutions ne soient éliminées ou privilégiées prématurément par rapport à d'autres est ainsi réduit. Cependant la seule connaissance de ce volume est insuffisante, il est aussi nécessaire de connaître quelles-sont les faces du volume que l'outil peut franchir sans engendrer de collisions avec la pièce finie (Figure 5). Dans une deuxième étape, les faces franchissables de ce volume sont donc identifiées ce qui permet également de gérer les orientations admissibles de l'outil et la planification des prises de passes axiales. Il reste ensuite dans un troisième temps à déterminer une stratégie de vidage de ce volume. Nous proposons pour cela de le découper en sous-volumes, plus simples à étudier. Dans les travaux présentés, cinq stratégies de découpe sont étudiées. La première stratégie de partitionnement envisagée est inspirée des stratégies de passes axiales présentées en partie 2, en réalisant des offsets d'une surface sélectionnée parmi les surfaces franchissables, ou en vis-à-vis de surfaces franchissables, du volume extrait. Le volume coupé par ces offsets successifs permet d'obtenir des sous-volumes pour lesquels il faut appliquer une stratégie de vidage, ou les redécouper à leur tour s'ils restent trop complexes à balayer. Chaque sous-volume est alors étudié indépendamment des autres dans cette première approche.

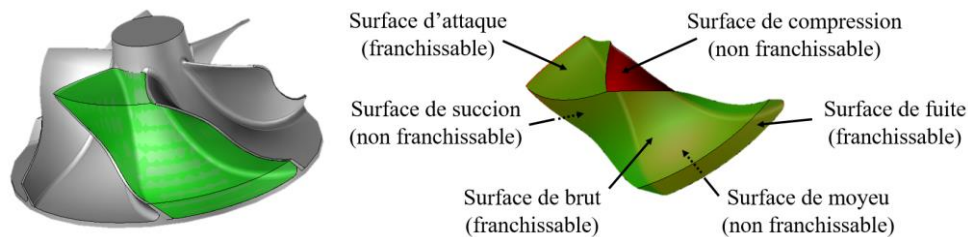


Figure 5 : Extraction du volume et identification des faces franchissables par l'outil

Lors de l'application de cette méthode sur un rouet, le volume extrait présente 6 faces, dont 3 sont franchissables (attaque, fuite, et brut) et 1 est non franchissable, mais est en vis-à-vis d'une surface franchissable (moyeu). Ces 4 faces permettent alors de définir 4 des 5 stratégies de découpe illustrées en Figure 6. De fait, la *Stratégie 1* découpe le volume selon des plans parallèles à la surface d'attaque qui est plane, la *Stratégie 2* selon des cylindres concentriques à la surface de fuite qui est cylindrique, et les *Stratégie 4* et *Stratégie 5* découpent le volume respectivement selon des offsets aux surfaces de brut et de moyeu. À ces stratégies est ajoutée la *Stratégie 3* qui découpe le volume selon des plans parallèles à un plan de posage calculé par la méthode de Heo *et al.* (Heo, 2008). Ces 5 stratégies de découpe ont été comparées grâce à des simulations d'usinage réalisées à l'aide du logiciel de CFAO TopSolid développé par Missler Software. Chaque sous-volume issu des découpes évoquées est usiné en appliquant des passes radiales de type « offset aux frontières » (Chen, 2011) sur la surface qui a servi à réaliser la découpe du sous-volume en question. L'outil parcourt alors ce trajet avec des dépinçages fixés et nuls par rapport à la surface de découpe considérée. L'axe outil reste alors normal aux surfaces de partitionnement (illustrées en Figure 6). Les stratégies utilisant des offsets de plans

sont par conséquent équivalentes à des fraisages 3 axes (stratégies 1 et 3), la *Stratégie 4* s'appuyant sur des cylindres coaxiaux est quant à elle équivalente à un usinage 4 axes, et les stratégies appliquées sur des surfaces quelconques (stratégies 4 et 5) impliquent un usinage 5 axes continus. Lors de ces simulations nous utilisons un outil torique FRAISA de diamètre 8mm et de rayon de coin de 1mm. Les conditions de coupe utilisées sont proches des conditions de rainurage proposées par le constructeur (engagements axiaux et radiaux de 100% du diamètre outil). Nous avons choisi un engagement radial programmé de 70% du diamètre outil afin d'éviter qu'il ne reste de la matière non usinée entre deux passes radiales successives, notamment à cause du rayon de coin de l'outil. L'engagement axial est programmé à 100% du diamètre outil. Les paramètres observés et comparés (Tableau 1) sont le pourcentage de volume de matière restante par rapport au volume initial (V_r), les longueurs de trajectoires (L_{trajet}) et leur pourcentage de trajet en matière (L_{travail}), ainsi que les longueurs sorties d'outils nécessaires pour parcourir les trajets sans risquer de collisions entre porte-outil et matière restante (L_{outil}). Cette longueur doit être la plus courte possible afin de minimiser le porte-à-faux en bout d'outil. Les simulations d'usinage pour chacune des stratégies sont représentées à la Figure 7.

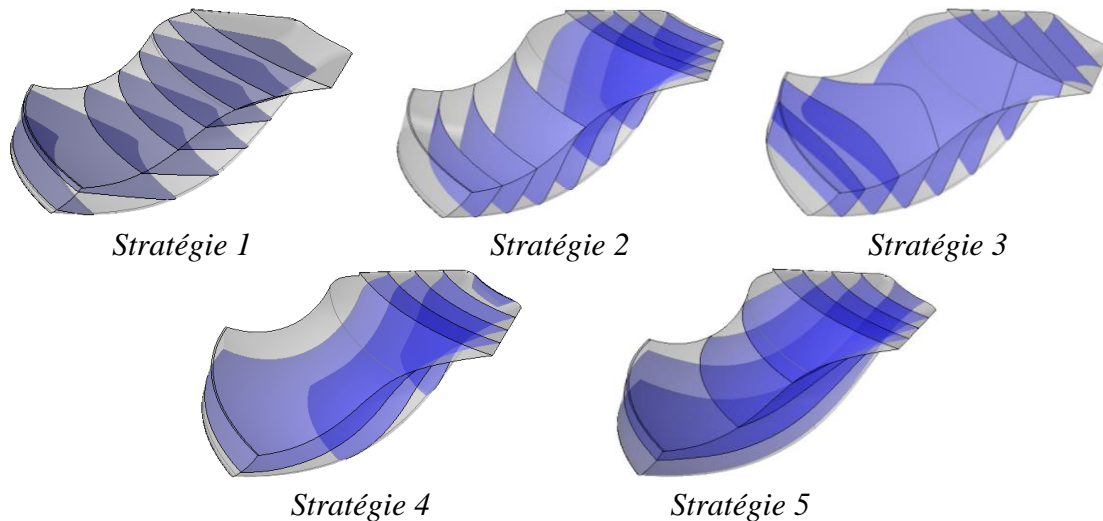


Figure 6 : Stratégies de découpe du volume étudié

4 Discussion

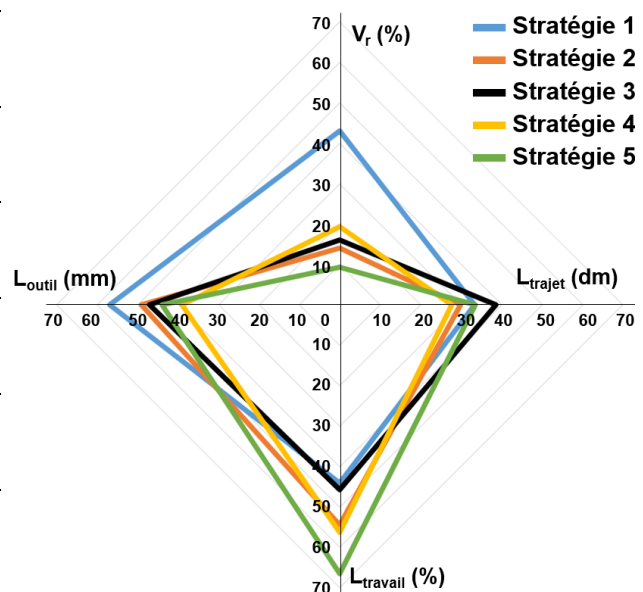
D'après les valeurs reportées dans le Tableau 1, la *Stratégie 1* est la moins pertinente, elle présente les résultats les moins bons pour chacun des critères étudiés. D'autre part la distribution de matière restante le long des surfaces finies est très hétérogène. Les résultats obtenus avec la *Stratégie 3* montrent qu'un usinage 5 axes positionnés peut être très efficace vis-à-vis du volume restant dans le cas où des posages adaptés aux formes de la pièce ont été déterminés. Néanmoins il faut veiller avec cette stratégie à minimiser le nombre de posages nécessaires pour éviter les hétérogénéités de répartition de matière restante à la jonction entre deux posages successifs. Ces deux stratégies, équivalentes à un fraisage 3 axes, présentent les plus longs trajets, avec la plus faible proportion de trajet en matière pénalisant ainsi fortement leur productivité.

L'ajout d'un 4^{ème} axe (*Stratégie 2*), permet d'atteindre plus de matière et réduit de façon considérable la longueur de trajet parcouru par l'outil par rapport aux stratégies 3 axes. Le même type de répartition de matière restante est toutefois observé, sous forme d'escaliers plus ou moins espacés les uns des autres en fonction de la variation de courbure de la surface finie entre deux passes axiales successives.

Comme il pouvait être attendu, les stratégies 5 axes continus (stratégies 4 et 5) ont l'avantage de réduire la longueur sortie d'outil nécessaire pour réaliser l'usinage grâce à la possibilité d'orienter l'outil pour éviter les collisions entre pièce et porte-outil : une réduction de presque 2 cm sur ce paramètre a pu être réalisée entre les stratégies 1 et 4. De plus, les stratégies 5 axes continus maximisent la proportion de trajets réalisés dans la matière. Un élément distingue toutefois ces deux stratégies, l'une offre la longueur de trajet la plus courte (*Stratégie 4*) quand l'autre fait partie des plus longues (*Stratégie 5*). Elles se différencient aussi largement pour la répartition volumique de matière restante sur les différentes surfaces. En effet, la *Stratégie 4*, obtenue par offsets du brut, permet une bonne homogénéité de matière restante sur les surfaces de suction et de compression, mais présente des hétérogénéités conséquentes sur la surface de moyeu : le phénomène d'escaliers est d'autant plus marqué que le nombre de passes axiales est faible. À l'inverse, issue d'offsets de la surface du moyeu, la *Stratégie 5* présente une répartition homogène le long de la surface finie du moyeu. Cependant, le balayage d'une surface complexe, comme le moyeu, avec un outil torique induit de nombreux risques d'interférences locales, et notamment le talonnement par l'arrière de l'outil. La détermination des dépinçages doit être alors menée de façon plus approfondie afin d'éviter ces interférences tout en s'assurant de ne pas en engendrer d'autres entre corps de l'outil et brut. De surcroît, une étude plus poussée doit être menée à propos des conditions de coupe de l'outil utilisé afin de valider les trajets proposés d'un point de vue technologique.

Tableau 1 : comparaison de méthodes de découpe du volume extrait

	V_r (%)	L_{trajet} (mm)	$L_{travail}$ (%)	L_{outil} (mm)
Stratégie 1 (3 axes)	43.1	3332	44.1	57
Stratégie 2 (4 axes)	14.1	2987	54.4	49
Stratégie 3 (5 axes pos.)	16.0	3863	45.6	47
Stratégie 4 (5 axes cont.)	19.4	2758	56.2	39
Stratégie 5 (5 axes cont.)	9.3	3343	66.5	44



5 Conclusion

Ces travaux ont pour but de déterminer une méthodologie de génération de trajectoires pour les opérations d'ébauche 5 axes afin d'améliorer la productivité globale des phases d'usinage. Nous proposons une approche en plusieurs étapes, s'appuyant sur le volume à retirer du brut, l'identification des faces franchissables par l'outil, le tranchage du volume extrait par des offsets de surfaces remarquables, et la décomposition en sous-volumes. L'application sur un rouet de compresseur radial montre que les stratégies 5 axes continues se révèlent alors plus efficaces bien qu'elles impliquent la manipulation de surfaces complexes à balayer avec des outils toriques.

Une étude plus poussée sur la réalisation des trajectoires proposées en termes de conditions de coupe est nécessaire afin d'établir un critère de validation des stratégies combinant les attentes géométriques et technologiques. Aussi, d'autres stratégies existantes n'ont pas été simulées ici : un intérêt particulier a été porté sur des stratégies d'usinage en bout, mais il serait intéressant d'intégrer dans les comparaisons des méthodes d'usinage par le flanc, induisant des possibilités de découpe du volume différentes.

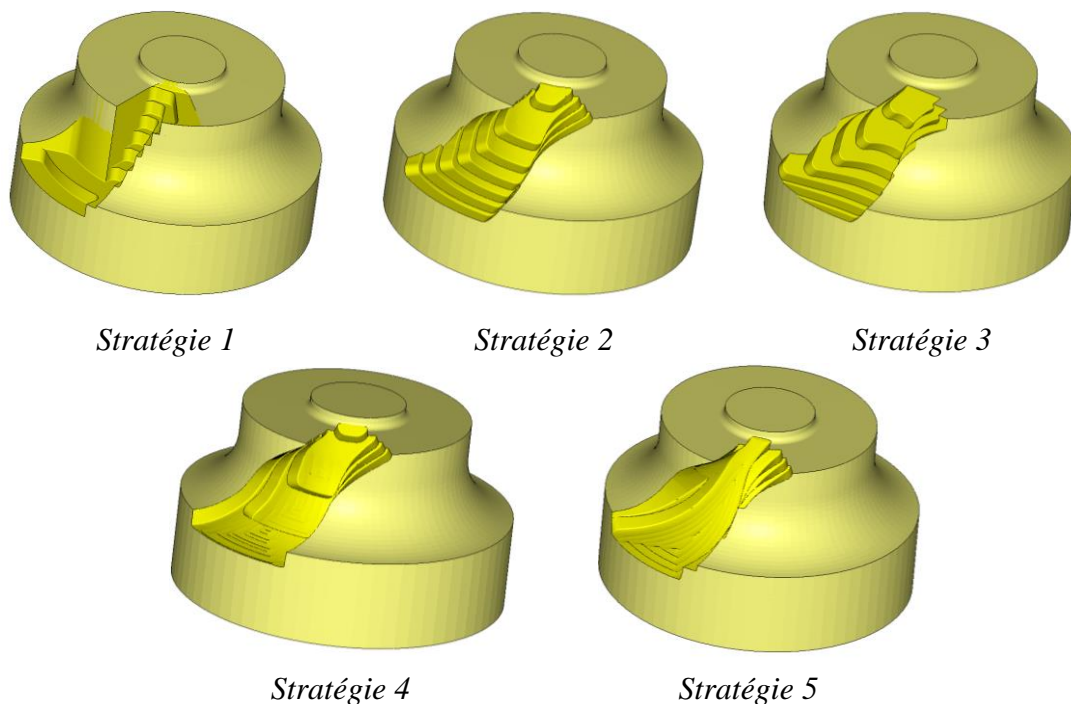


Figure 7 : Simulations de matière restante en fin d'usinage

Remerciements

Ces travaux de recherche sont menés dans le cadre du partenariat « CAMLAB » entre Missler Software et le LURPA de l'Ecole normale supérieure Paris-Saclay. Ils s'inscrivent dans les activités du groupe de travail national « Manufacturing 21 ».

References

- M. Bala, T.-C. Chang (1991) Automatic cutter selection and optimal cutter path generation for prismatic parts, *The International Journal of Production Research*, Vol29(11), pp2163-2176.
- Z. C. Chen, Q. Fu (2011) An optimal approach to multiple tool selection and their numerical control path generation for aggressive rough machining of pockets with free-form boundaries. *Computer-Aided Design*, Vol43(6), pp651-663.
- Z. Dong, H. Li, G. W. Vickers (1993) Optimal rough machining of sculptured parts on a CNC milling machine, *Journal of engineering for industry*, Vol115(4), pp424-431.
- J. P. Davim (Ed.) (2016) *Machining of Complex Sculptured Surfaces*, Springer, DOI 10.1007/978-1-4471-2356-9.
- P. Fallböhmer, T. Altan, H.-K. Tönsh, T. Nakagawa (1996) Survey of the die and mold manufacturing industry - practices in germany, japan, and the united states, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol59(1), pp158-168.
- P. Gray, S. Bedi, F. Ismail, N. Rao, G. Morphy (2001) Comparison of 5-axis and 3-axis finish machining of hydroforming die inserts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol17(8), pp562-569.
- A. Hatna, R. J. Grieve, P. Broomhead (1998) Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol11(4), pp309-330.
- E.-Y. Heo, D.-W. Kim, B.-H. Kim, D.-K. Jang, F. Frank Chen (2008) Efficient rough-cut plan for machining an impeller with a 5-axis NC machine, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol21(8), pp971-983.
- D.-W. Kim, M. A. Suhaimi, B.-M. Kim, M.-H. Cho, F. F. Chen (2013) Rough Cut Machining for Impellers with 3-Axis and 5-Axis NC Machines, *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems: 23rd International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing*, pp609-616.
- A. Krimpenis, G.-C. Vosniakos (2009) The uniformity of remaining volume on rough-machined sculptured surface parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol43(9), pp896-906.
- B. Lauwers and P. P. Lefebvre (2006) Five-axis rough milling strategies for complex shaped cavities based on morphing technology, *CIRP Annals*, Vol55(1), pp59-62.
- Y.-S. Lee, T.-C. Chang (1991) CASCAM: an automated system for sculptured surface cavity machining, *Computers in Industry*, Vol16(4), pp321-342.
- H. Li, Z. Dong, and G. W. Vickers (1994) Optimal toolpath pattern identification for single island sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis, *Computer-Aided Design*, Vol26(11), pp787-795.
- S. S. Makhanov (2010) Adaptable geometric patterns for five-axis machining: a survey, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol47(9), pp1167-1208.
- D. Olvera, A. Calleja, L. N. López de Lacalle, F. Campa, A. Lamikiz (2012) Flank milling of complex surfaces, In *Machining of Complex Sculptured Surfaces*, pp1-31.
- R. Qi, W. Liu, H. Bian, L. Li (2009) Five-axis rough machining for impellers, *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Vol4(1), pp71-76.
- W. Shao, Y. Li, C. Liu, X. Hao (2016) Tool path generation method for five-axis flank milling of corner by considering dynamic characteristics of machine tool, *Procedia CIRP*, The 9th International Conference on Digital Enterprise Technology - Intelligent Manufacturing in the Knowledge Economy Era, Vol56(Supplement C), pp155-160.
- Michael Blaine Thompson (2005) Development of a five-axis machining algorithm in flat end mill roughing.
- C. K. Toh (2003) Tool life and tool wear during high-speed rough milling using alternative cutter path strategies, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol217(9), pp1295-1304.
- H.-T. Young, L.-C. Chuang, K. Gerschwiler, S. Kamps (2004) A Five-axis rough machining approach for a centrifugal impeller, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol23(3-4), pp233-239.