

Intégration de stratégies à motifs dans le standard STEP-NC : application à l'usinage trochoïdal

Raphaël LAGUIONIE

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN) – UMR CNRS 6597
1 rue de la Noé, BP92101, 44321 Nantes Cedex 03, France, Raphael.Laguionie@ircryn.ec-nantes.fr

Matthieu RAUCH

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN) – UMR CNRS 6597
1 rue de la Noé, BP92101, 44321 Nantes Cedex 03, France, Matthieu.Rauch@ircryn.ec-nantes.fr

Jean-Yves HASCOET

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN) – UMR CNRS 6597
1 rue de la Noé, BP92101, 44321 Nantes Cedex 03, France, Jean-Yves.Hascoet@ircryn.ec-nantes.fr

Résumé : Le langage actuel de programmation des machines outils à commande numérique est le code G, normalisé au début des années 80. Celui-ci constitue aujourd'hui un frein majeur et crée une rupture de la chaîne numérique au niveau de la fabrication. Pour combler ce manque, un nouveau standard de données, STEP-NC, est en cours de développement. Le fichier STEP-NC comporte l'ensemble des informations de fabrication, à travers la description des entités d'usinage, de la gamme de fabrication, des outils, des stratégies d'usinage, etc. Pour l'ébauche en fraisage, les stratégies normalisées sont des stratégies classiques comme le contour parallèle, spirale ou le zig-zag. Ces travaux ont pour objectif de proposer de nouvelles stratégies dont la construction est basée sur la répétition d'un motif le long d'une courbe guide. Celles-ci présentent de sérieux avantages comme leur rapidité et simplicité de construction. Leur intégration dans le format STEP-NC constitue une étape supplémentaire dans leur développement mais aussi dans l'enrichissement des possibilités du STEP-NC. Le modèle proposé a pu être validé par la réalisation d'une chaîne numérique STEP-NC complète, de la CAO jusqu'à l'usinage des pièces.

Mots clés : STEP-NC, génération de trajectoires, stratégies à motif, usinage trochoïdal

Abstract : The current language for programming machine tools is G code, which was standardized at the beginning of the Eighties. G code has many drawbacks and it creates a break in the numerical chain at the manufacturing step. To fulfil this gap, a new data standard, STEP-NC, is under development. The STEP-NC file contains all the manufacturing information such as: the description of manufacturing entities, work plan, tools, and manufacturing strategies. For rough milling, the already standardised strategies are the classical ones like parallel contour, spiral, and bidirectional. This paper aims to propose new strategies based on the repetition of a pattern all along a guide curve. These strategies present advantages such as the rapidity and simplicity in their construction. Their integration in STEP-NC standard is an additional step in their development but also in the enrichment in STEP-NC possibilities. The model presented here was validated thanks to the realisation of a whole STEP-NC numerical chain, allowing to machine parts from CAD model.

Key words : STEP-NC, toolpaths generation, pattern strategies, trochoidal machining

1 Introduction

Les avancées technologiques de ces dernières décennies ont mené à des cellules de fabrication toujours plus performantes avec un désir permanent d'intégration de la fabrication dans la chaîne numérique complète. L'ensemble de ces avancées a permis la naissance et la démocratisation de l'usinage à grande vitesse, la mise au point d'outils de plus en plus élaborés, la construction de centres d'usinage toujours plus productifs. Cependant, peu de travaux de recherche ont porté sur le format de programmation en lui-même. Celui-ci demeure pourtant un point clé de la transmission de l'information au sein de la chaîne numérique. Le langage actuellement utilisé pour la programmation des machines à commande numérique (MOCN) est le code G. Sa normalisation date du début des années 80 à travers la norme 6983 [1], dont les principes de base s'appuient sur les premières machines à commande numérique programmées à l'aide de cartes perforées. Le code G s'avère aujourd'hui désuet et ne répond plus aux attentes de programmation des machines outils actuelles. Pour combler ce manque, un nouveau standard de données, le STEP-NC, est en cours de développement et pourrait bien révolutionner notre vision de la chaîne numérique en intégrant, par l'implémentation d'un unique fichier, l'ensemble de la chaîne CAO, FAO, DCN. Basé sur le format d'échange Step de la norme 10303, le fichier STEP-NC comporte l'ensemble des informations en vue de la fabrication, comme la description des entités d'usinage, de la gamme de fabrication, des outils, des stratégies d'usinage, etc. L'ensemble de ces paramètres est normalisé dans la norme ISO 14649 [2] et intégré au protocole d'application correspondant ISO 10303-238 [3]. Les travaux de l'IRCCyN présentés dans cet article s'inscrivent dans la génération de trajectoires à partir du format STEP-NC. Une nouvelle façon de construire des trajectoires d'usinage, basé sur la répétition d'un motif le long d'une courbe guide, est en cours de développement et présente une compatibilité particulière avec le standard STEP-NC. Cet article présente une proposition d'intégration de ces stratégies à motifs dans le standard STEP-NC. Après un état de l'art succinct du standard STEP-NC ainsi que des stratégies à motifs, cette proposition sera présentée et validée par l'intégration dans une chaîne numérique complète STEP-NC développée à l'IRCCyN.

2 Une nouvelle vision de la fabrication dans la chaîne numérique STEP-NC

Avec l'arrivée de STEP-NC, c'est une nouvelle vision de la chaîne numérique et en particulier de la place de la fabrication dans celle-ci qui est proposée. De nombreux travaux proposent des modèles en relation avec ce désir d'intégration de l'ensemble de la chaîne numérique ([4] et [5]). Les principes de base, en ce qui concerne l'usinage et particulièrement le fraisage, sont regroupés dans la norme ISO 14649. La construction du fichier STEP-NC s'appuie sur la discrétisation de la pièce en entités d'usinage, renvoyant chacune à des informations de géométrie, aux caractéristiques de l'usinage et en particulier aux stratégies d'usinage choisies. L'ensemble des phases d'usinage (*workingSteps*) constitue la gamme de fabrication (*workPlan*) dont l'ordonnancement peut être adapté, indépendamment du fichier STEP-NC [6]. Pour usiner la pièce à partir du fichier STEP-NC, on fait appel à un interpréteur dont le rôle est de lire les fichiers du langage et de générer les commandes pour la machine. Dans le cas d'un fichier en code G (RS274), l'interpréteur exécute ligne par ligne des instructions de bas niveau. Dans le cas du STEP-NC, l'exécution du programme se fait en terme de phases d'usinage (Fig. 1).

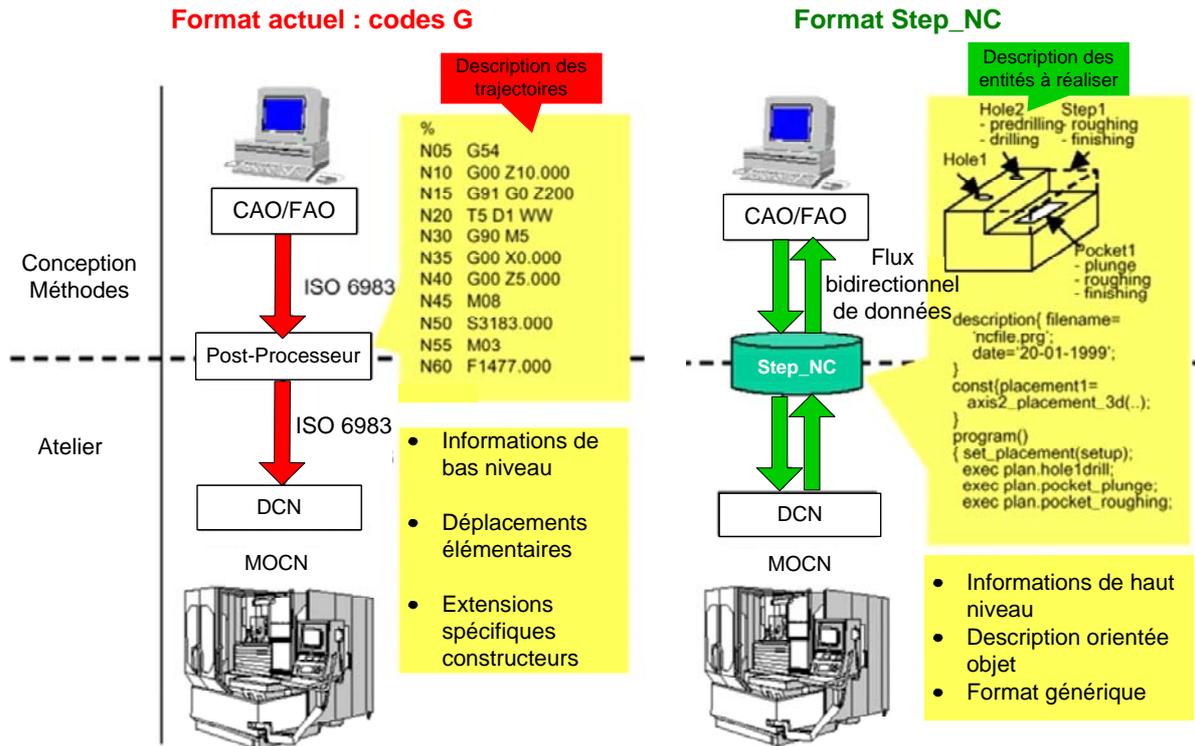


Fig. 1 : Comparaison code G et STEP-NC

L'implémentation d'un unique fichier d'informations de haut niveau permet un flux bidirectionnel des données (feed-back possible du DCN en direction de la FAO/CAO) ainsi qu'une généricité du programme. Celui-ci peut être lu par tous les DCN, indépendamment des caractéristiques machine qui interviennent seulement lors de l'interprétation du fichier STEP-NC par le DCN. Plusieurs interpréteurs et prototypes ont déjà vu le jour. En particulier, un prototype de chaîne numérique complet et totalement intégré a été développé par l'équipe coréenne du Professeur Suh [7]. Celui-ci permet, à partir du fichier CAO, de générer le fichier STEP-NC (PosSFP), d'interpréter le fichier STEP-NC en générant et visualisant les trajectoires d'usinage (PosTPG et PosTPV). La chaîne est complétée par une interface homme/machine, ainsi qu'un module permettant d'envoyer les instructions aux cartes d'axes de la machine, le tout relié par un réseau CORBA. Certains des travaux présentés dans cet article se sont concrétisés par l'implantation du modèle proposé dans le module PosSFP de l'interpréteur coréen [8].

3 Une nouvelle façon de programmer les trajectoires

3.1 La génération des trajectoires dans la chaîne numérique STEP-NC

Le fichier STEP-NC se retrouve au centre de la chaîne numérique et comporte les informations de l'ensemble des acteurs de cette chaîne, la CAO, la FAO, les maquettes de simulation, et le DCN. Ce dernier revêt donc un rôle à part entière dans la chaîne numérique STEP-NC (Fig. 2). Il est en mesure de lire le fichier STEP-NC pour permettre la génération des trajectoires mais aussi la planification des opérations. La commande numérique STEP-NC avancée autorise un feed-back de l'information par estimation des données process en vue de l'usinage conforme de la pièce. Celui-ci peut être adapté en cours d'usinage, en temps réel, ou suite à des mesures de la pièce sur la machine.

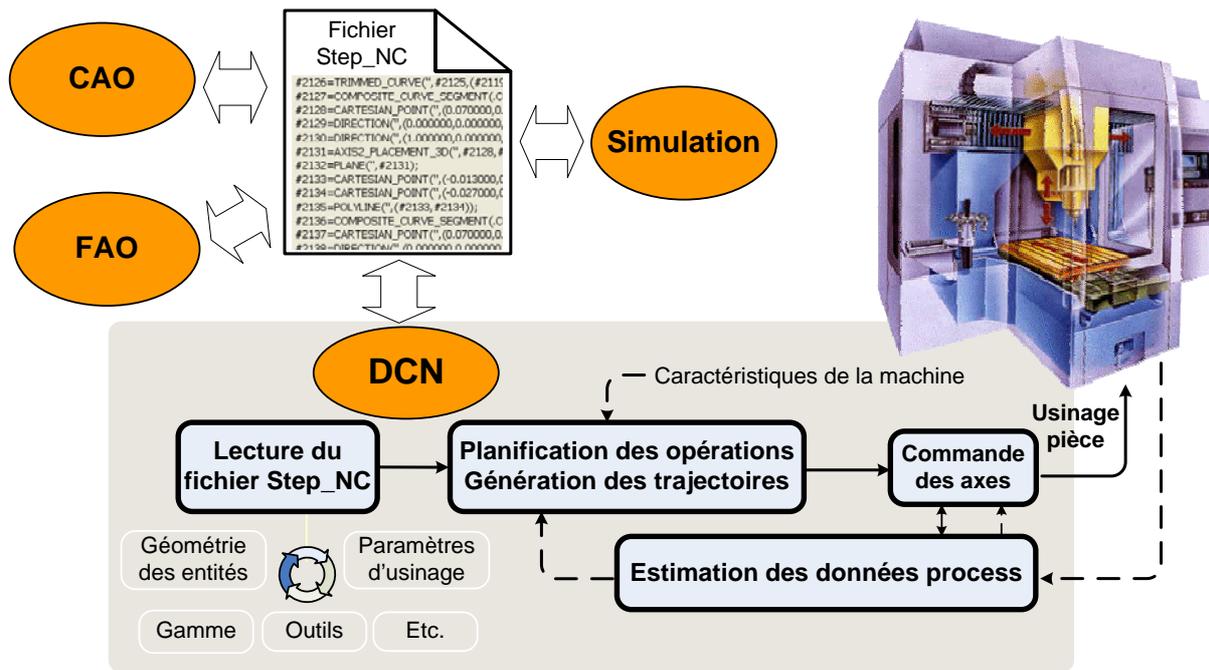


Fig. 2 : Le DCN dans la chaîne numérique STEP-NC

Cette architecture offre de nouvelles possibilités dans tous les domaines de programmation de la cellule d'usinage, et en particulier pour la programmation des trajectoires d'usinage. Actuellement, dans le cas de l'usinage 2D, certaines trajectoires usuelles sont d'ores et déjà présentes dans la norme STEP-NC. On y retrouve l'usinage unidirectionnel, bidirectionnel, contour parallèle et spiral. Toute autre stratégie peut être décrite sous l'attribut *Explicit* en définissant l'ensemble de la trajectoire si celle-ci ne peut être décrite à l'aide de celles déjà normalisées. Ainsi, les stratégies proposées constituent une bonne base de travail permettant de poser les principes de l'implantation des stratégies d'usinage dans le standard STEP-NC mais n'exploitent pas pleinement ses possibilités de gérer des informations de haut niveau. Peu de développements ont été menés dans ce sens et il nous semble intéressant d'enrichir ses possibilités pour le rendre plus attractif et mettre en avant son intérêt. Les trajectoires à motifs apportent une nouvelle approche de la construction des trajectoires outil. La proposition décrite dans ce papier établit les bases de leur définition et de leur implémentation au sein du standard STEP-NC. Elle présente un intérêt tant dans le développement de cette méthode de construction des trajectoires que dans l'enrichissement des possibilités de la programmation STEP-NC.

3.2 Les stratégies à motifs

Une stratégie à motifs peut être définie comme une stratégie construite par répétition d'un motif le long d'une courbe guide. Des travaux sur ces nouvelles manières de construire des trajectoires d'outils sont en cours de développement à l'IRCCyN [9]. Les applications peuvent être le tréflage, l'usinage trochoïdal, ou d'autres procédés comme par exemple le formage incrémental, etc. La courbe guide est construite à partir de l'entité à usiner. Le motif, quant à lui, est indépendant de la géométrie de l'entité. Plusieurs définitions mathématiques des courbes à motifs peuvent être données suivant l'application : définition vectorielle, paramétrique, composition de fonctions, etc. L'exemple traité par la suite de l'usinage trochoïdal se prête particulièrement bien à une définition vectorielle paramétrique des points de la trajectoire [10].

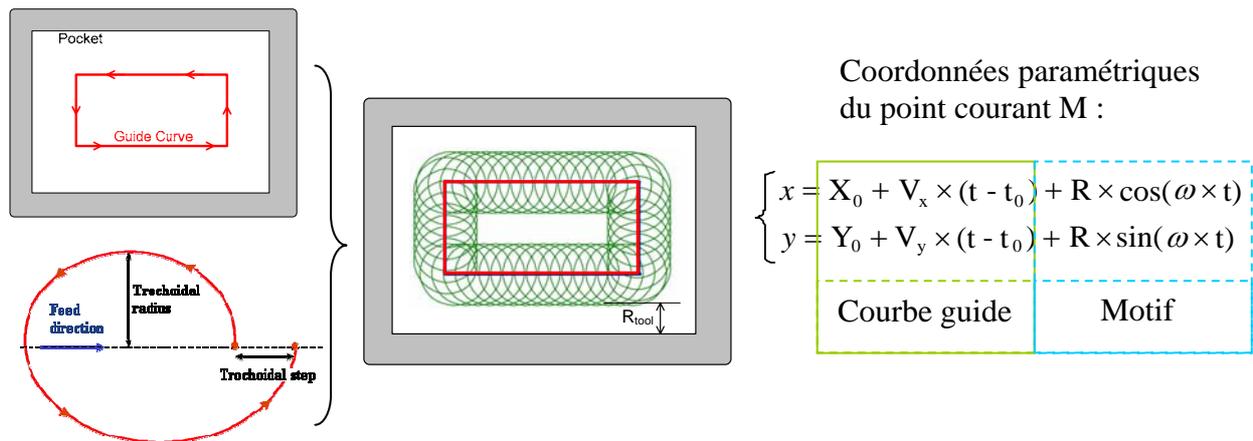


Fig. 3. Composition des mouvements pour la construction de trajectoires trochoïdales

La trajectoire trochoïdale est ici plane, pour un niveau de Z constant. La courbe guide est une suite de segments définis localement par un vecteur directeur $(V_x; V_y)$ et un point de départ $M_0 (X_0; Y_0)$ correspondant à la valeur t_0 du paramètre t . Le cas de l'usinage trochoïdal est intéressant car c'est une stratégie d'usinage nouvelle relativement méconnue et dont la définition est complexe sans l'utilisation des courbes à motifs. Certains logiciels de FAO utilisent une succession d'arcs de cercles (G2 en code G) reliés par des segments de droite (G1). Le problème de cette méthode vient de la discontinuité en accélération qu'elle entraîne en début de chaque arc de cercle. Cela peut poser des problèmes lors de l'usinage aux discontinuités (claquements). La construction de la trajectoire trochoïdale à partir des courbes à motifs nécessite uniquement la connaissance du rayon de trochoïde, du pas de trochoïde et du rayon d'outil. La courbe guide est, quant à elle, construite à partir de la géométrie de l'entité à usiner. Simplicité de construction, rapidité des modifications, et définition à partir d'un nombre restreint de paramètres font des stratégies à motifs une nouvelle manière de programmer, apportant un réel intérêt et une compatibilité particulière avec le standard STEP-NC [11].

4 Proposition d'intégration des stratégies à motifs dans le standard STEP-NC

La proposition d'intégration des stratégies à motif dans le format STEP-NC s'appuie sur les stratégies déjà normalisées pour la construction de la courbe guide. La démarche consiste par la suite à valider cette proposition en recréant une chaîne numérique complète basée sur le STEP-NC. Dans le cas particulier de l'usinage trochoïdal, ceci permettra de montrer l'efficacité de l'utilisation des trajectoires à motifs en partant du modèle CAO jusqu'à la pièce usinée sur des moyens de production actuels. En reprenant le formalisme Express G de la fonction Two5DmillingStrategy ([3]) relative à la définition des paramètres et attributs des stratégies d'usinage, l'intégration des stratégies à motifs peut être schématisée de la manière suivante (Fig. 4):

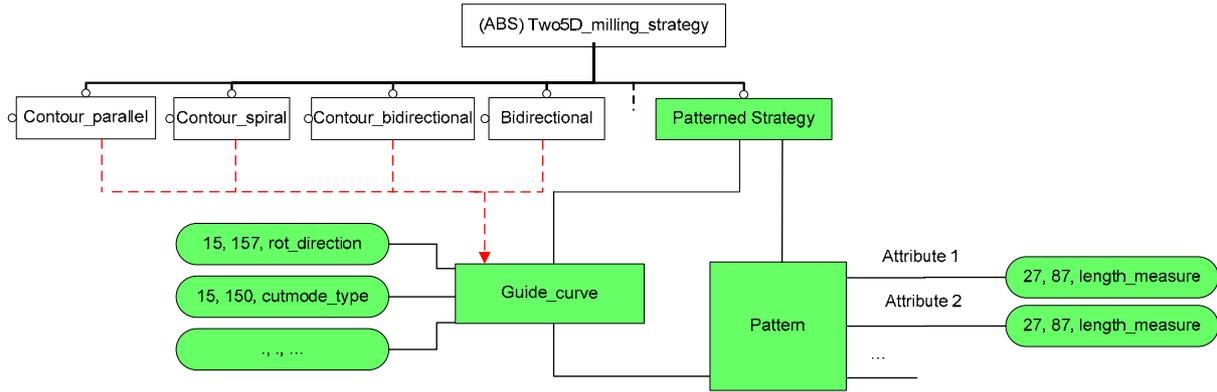


Fig. 4 : Diagramme ARM avec proposition d'intégration des stratégies à motifs

La construction du motif fait appel à un certain nombre d'attributs dont la nature peut être différente : longueur, direction, attributs, etc. Dans le cas de l'usinage trochoïdal, les paramètres du motif sont le rayon de trochoïde et le pas de trochoïde. À partir de ces deux paramètres, l'interpréteur est en mesure de construire le motif. Ce motif peut alors être répété le long de la courbe guide qui donne la direction support d'usinage. La construction de la courbe guide se fait à partir des données de géométrie de l'entité à usiner, de la stratégie support sélectionnée, ainsi que de paramètres du motif et des caractéristiques de l'outil. Ces informations se retrouvent sous forme littérale dans le fichier STEP-NC avec la syntaxe suivante :

```
#Ref=STRATEGY(overlap,allow_multiple_passes,#guide_curve,pattern parameters)
```

Overlap et *allow_multiple_passes* sont des paramètres communs à toutes les stratégies. Suivent la définition de la courbe guide et les paramètres du motif. La définition de la stratégie sur laquelle s'appuie la courbe guide (*#guide_curve*) peut être renvoyée à une autre

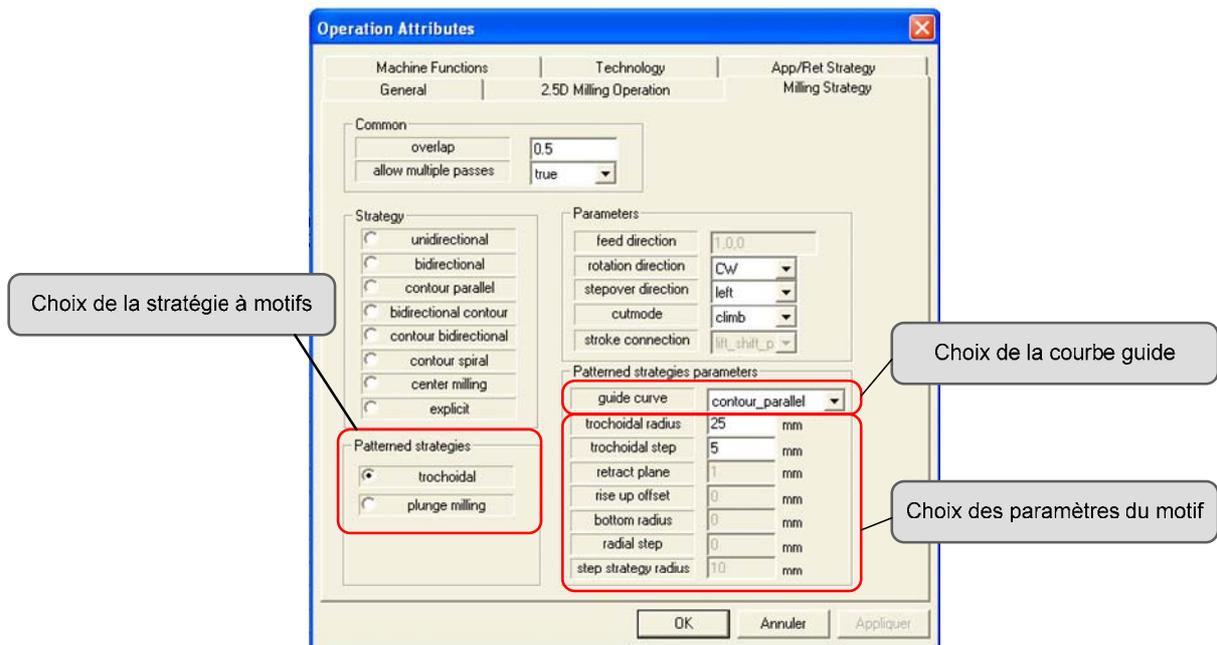


Fig. 5 : Implantation des stratégies à motifs dans PosSFP

ligne du programme dans un souci de clarté. La stratégie support de la courbe guide est décrite à partir des stratégies présentes dans la norme. La courbe guide peut alors être construite de la même façon que les trajectoires bidirectionnel, contour parallèle, spiral, etc. Par une simple modification de cet attribut, un ensemble de stratégies trochoïdales peuvent ainsi être proposées. Ce modèle a été implémenté dans le logiciel coréen PosSFP qui permet, à partir du fichier CAO et après avoir reconnu les entités géométriques, de générer le fichier STEP-NC. Cette extension a été réalisée dans le cas de deux stratégies à motifs particulières : l'usinage trochoïdal et le tréflage (Fig. 5). Dans ce papier, seul le cas de l'usinage trochoïdal est traité. Ainsi, pour l'usinage trochoïdal, l'ensemble des paramètres nécessaires à la construction de la trajectoire est regroupé dans le programme STEP-NC sous la forme :

TROCHOIDAL(overlap, allow_multiple_passes, guide_curve_support_strategy ,parameters of guide curve, trochoidal radius, trochoidal step)

L'interpréteur est en mesure, à partir de ces données ainsi que des d'autres données du fichier STEP-NC comme la géométrie et les caractéristiques de l'outil, de construire les trajectoires de l'outil. L'implémentation des stratégies à motifs d'usinage trochoïdal constitue une première étape dont la validation dans l'environnement de la chaîne numérique STEP-NC est importante. Les étapes suivantes visent à remplir cet objectif.

5 Validation de la proposition de chaîne numérique STEP-NC développée à l'IRCCyN

Une chaîne numérique STEP-NC complète a été développée pour pouvoir tester la génération du programme, ainsi que son interprétation jusqu'à l'usinage d'une pièce test dans le cas de l'usinage trochoïdal. La chaîne numérique STEP-NC simplifiée s'appuie sur 3 principaux modules :

- le premier module, principalement constitué d'une évolution du logiciel coréen PosSFP offrant le choix des stratégies à motifs, a pour objectif de générer le fichier STEP-NC à partir du fichier CAO. Il s'appuie sur une reconnaissance des entités d'usinage et permet la sélection de tous les paramètres de fabrication qui seront présents par la suite dans le fichier STEP-NC. L'implantation des stratégies à motifs dans le logiciel coréen PosSFP a été réalisée à partir des sources aimablement prêtées pour l'occasion par l'équipe du Professeur Suh de l'université de Postech en Corée du Sud.

- le second module, développé à l'IRCCyN, permet la lecture du fichier STEP-NC généré à l'étape précédente ainsi que la génération et visualisation des trajectoires outil. A partir des données de géométrie de l'entité à usiner, des caractéristiques de l'outil et des paramètres des stratégies à motifs, le module est en mesure de générer la trajectoire par construction successive de la courbe guide et répétition du motif. Il renvoie en sortie un fichier de points de passage de l'outil.

- le troisième module traite le fichier de points pour permettre la lecture et l'exécution des trajectoires par le moyen de production.

Les second et troisième modules font partie intégrante du DCN STEP-NC, aujourd'hui traité sur une base PC, mais de façon transparente pour l'utilisateur. Les moyens de production actuels ne lisant exclusivement que du code G, le troisième module permet de traduire les trajectoires pour l'usinage. Dans un DCN totalement intégré STEP-NC, les trajectoires seraient directement exécutées sur les cartes d'axes machine. Dans l'exemple de vidage de poche en usinage trochoïdal (Fig. 6), plusieurs géométries de poche ont pu être usinées avec différentes courbes guide. L'exemple montre une poche rectangulaire vidée en usinage trochoïdal et dont le support de la courbe guide est, dans un cas un contour parallèle, dans l'autre un Zig-zag. La seule différence visible au niveau du fichier STEP-NC est le

paramètre #guide_curve. Une modification de cet attribut entraîne une régénération complète de la trajectoire dans le directeur de commande numérique. Dans le cas de l'utilisation du code G, l'ensemble du fichier aurait dû être modifié et régénéré. La troisième pièce test montre une poche quelconque usinée directement à partir des données issues de la CAO présentes dans le fichier STEP-NC ainsi que des attributs de fabrication sélectionnés par l'utilisateur en amont, elles-mêmes présentes dans le fichier STEP-NC.

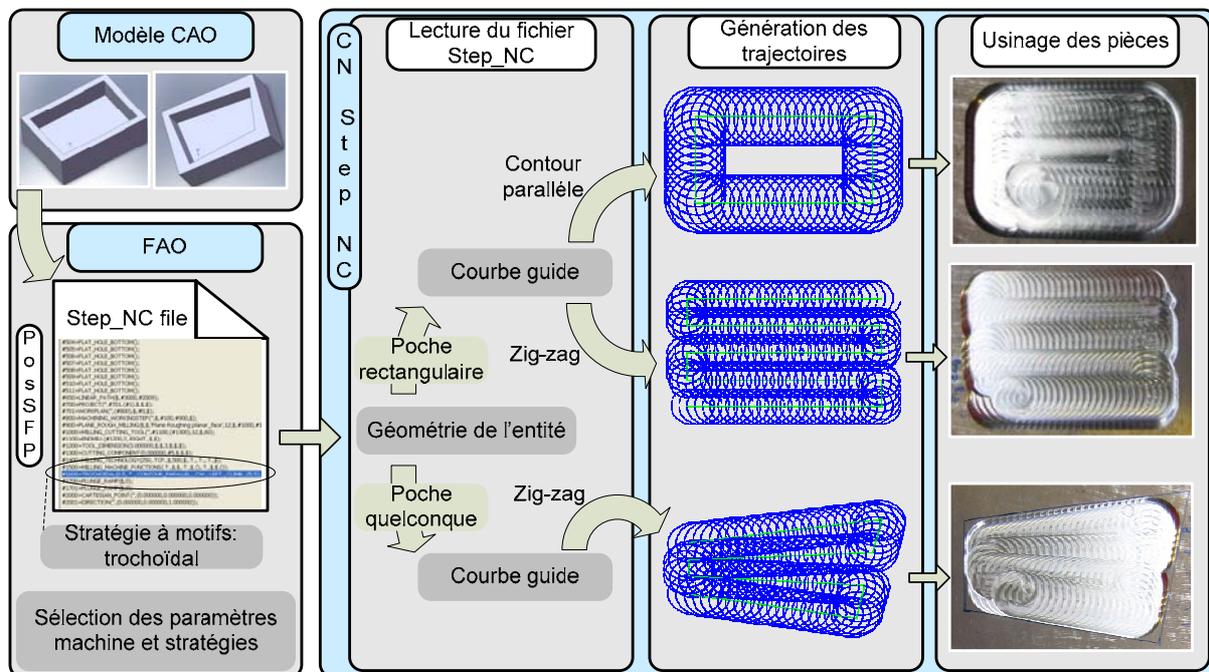


Fig. 6 : Vidage d'entités poches en usinage trochoïdal dans la chaîne numérique STEP-NC

6 Résultats et développements futurs

L'objet de ces travaux est de proposer un modèle d'implémentation des stratégies à motifs dans le standard STEP-NC. La validation de ce modèle est réalisée dans le cas particulier de l'usinage trochoïdal, dont la description se prête bien à une définition par courbes à motifs. Une chaîne numérique STEP-NC complète a été développée et permet de traiter des pièces de la CAO jusqu'à l'usinage. L'interpréteur IRCCyN génère automatiquement toutes les opérations jusqu'à la pièce usinée à partir de la lecture du fichier STEP-NC. Seule l'adaptation au code G nécessaire à la production sur les moyens de production actuels nécessite encore une intervention extérieure, ce qui, à terme, sera supprimé. Le choix de définition des stratégies à motifs a pu être testé ainsi que l'intérêt qu'elles présentent par leur simplicité de construction et l'automatisation qui peut être rapidement mise en place à partir de leur définition. Plusieurs pièces ont pu être usinées en faisant varier la géométrie des poches, la courbe guide et le motif. Cela a permis de valider l'adaptabilité des outils développés en évaluant leur réponse suite à des modifications de l'entité à usiner ainsi que des paramètres technologiques. Le standard STEP-NC offre donc de nouvelles possibilités qui mettent en avant l'intérêt des stratégies à motifs et, de manière plus générale, des nouvelles stratégies d'usinage, qui trouvent leur intérêt dans la prise en compte de la géométrie de l'entité, des performances grandissantes des machines outils et des technologies nouvelles d'outil. Réciproquement, l'implantation de ces stratégies innovantes apporte au STEP-NC une

légitimité par rapport au code G, ne le restreignant pas seulement à des stratégies très communes mais en montrant sa force à travers des stratégies plus évoluées et souvent peu utilisées car difficiles à mettre en œuvre avec le code G. Ainsi, l'ensemble des travaux menés a permis de vérifier la validité de cette approche de construction des trajectoires basées sur les stratégies à motifs ainsi que leur implantation et intérêt au sein du standard STEP-NC

La démarche exposée dans cet article montre qu'il est possible de réaliser des travaux de développement du format STEP-NC en faisant appel, de manière concrète, à des validations sur des moyens de production actuels non directement compatibles avec le STEP-NC et n'acceptant que le code G. Cela est rendu possible en traduisant les résultats de l'interpréteur STEP-NC en code G dont la lecture et l'exécution sont alors possibles sur des machines de production communes. Cette façon de procéder est suffisante dans une partie des développements comme c'est le cas de la génération des trajectoires en STEP-NC. Cependant, cela peut rapidement devenir un handicap majeur car le feed-back interne à l'interpréteur est rendu impossible par le passage en G-code. Les applications plus avancées, comme la correction temps réel de la trajectoire ou la gestion de l'événementiel, vont se heurter, dans leur partie développement, à ce problème et nécessiteront certainement une commande numérique interpréteur STEP-NC totalement intégrée. Cette seconde étape de programmation intégrée STEP-NC constituera alors un socle solide vers la programmation avancée des machines outils, intégrant l'adaptation temps réel des paramètres de coupe et des trajectoires d'usinage aujourd'hui bridées par l'utilisation du code G. Ainsi, le STEP-NC n'est pas destiné à égaler le code G mais à le surpasser en proposant des possibilités nouvelles et innovantes. Dans cette optique, de futurs travaux seront menés au sein de l'IRCCyN, tant concernant le développement de ce nouveau standard que l'exploitation des nouvelles possibilités offertes.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du professeur Suh de l'université de Postech en Corée pour avoir eu la gentillesse et la confiance de mettre à disposition leurs outils de développement et en particulier le module PosSFP.

Ce travail a été conduit dans le cadre du groupe de travail Manufacturing 21 qui regroupe 13 laboratoires de recherche français. Les thèmes étudiés sont la modélisation du processus de fabrication, l'usinage virtuel et le développement de nouvelles méthodes de fabrication.

Références

- [1] ISO_6983, *International Standard Organization. Numerical control of machines - Program format and definition of adress words*,
- [2] ISO_14649-10, *International Standard Organization. Industrial automation systems and integration - physical device control - data model for computerized numerical controllers - Part 10 : general process data*, ISO TC 184/SC1/WG7/FDIS
- [3] ISO_10303-238, *Norme ISO 10303-238 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration. Représentation et échange de données de produits. Partie 238: Protocole d'application : Modèle d'application interprété pour les directeurs de commande numérique*, ISO TC 184/SC4/WG3 N1534
- [4] X. W. XU, Q. HE, 2004, *Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 20 n°2, p. 101-109
- [5] X. W. XU, H. WANG, J. MAO, S. T. NEWMAN, T. R. KRAMER, F. M. PROCTOR, J. L. MICHALOSKI, 2005, *STEP-compliant NC research: The search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration*, International Journal of Production Research, Vol. 43 n°17, p. 3703-3743
- [6] S. H. SUH, S. U. CHEON, 2002, *A Framework for an Intelligent CNC and Data Model*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 19 n°10, p. 727-735
- [7] S. H. SUH, B. E. LEE, D. H. CHUNG, S. U. CHEON, 2003, *Architecture and implementation of a shop-floor programming system for STEP-compliant CNC*, Computer-Aided Design, Vol. 35 n°12, p. 1069-1083
- [8] R. LAGUIONIE, 2007, *Programmation avancée des machines outils : implémentation de l'usinage trochoïdal et du tréflage dans la chaîne numérique STEP-NC*, Thèse de Master, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes
- [9] M. RAUCH, 2007, *Optimisation de la programmation des MOCN - Application aux machines à structure parallèle*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes
- [10] J. Y. HASCOET, M. RAUCH, 2006, *Trochoïdal milling and plunging strategies in rough pocket milling of aluminium alloys*, International Conference on High Speed Milling, Metz (France), p. 649-661
- [11] J. Y. HASCOET, M. RAUCH, S. H. SUH, 2007, *Relevance of Step-Nc standard for high level toolpaths generation*, International Conference on High Speed Milling, San Sebastian (Spain), March 21-22, CD-Rom