



Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes

Xavier Beudaert

► To cite this version:

Xavier Beudaert. Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes. Autre. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2013. Français. NNT : 2013DENS0023 . tel-00913943

HAL Id: tel-00913943

<https://theses.hal.science/tel-00913943>

Submitted on 4 Dec 2013

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.

**THESE DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

Présentée par

Monsieur Xavier BEUDAERT

**pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

Domaine :
MECANIQUE- GENIE MECANIQUE – GENIE CIVIL

Sujet de la thèse :

**Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour
l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes**

Thèse soutenue à Cachan le 4 Juillet 2013 devant le jury composé de :

Didier DUMUR	Professeur, Supélec – Gif-sur-Yvette	Président
Jean-Yves HASCOET	Professeur, Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
Emmanuel DUC	Professeur, IFMA – Clermont-Ferrand	Rapporteur
Richard BEAREE	Maître de Conférences, ENSAM Lille	Examineur
Christophe TOURNIER	Professeur, ENS Cachan	Directeur de thèse
Sylvain LAVERNHE	Maître de Conférences, ENS Cachan	Co-Encadrant

*À nos thèses, nos thésards,
et ceux qui les soutiennent...*

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mes encadrants qui ont énormément contribué à l'aboutissement de ce travail de thèse. Un grand merci à Christophe Tournier qui m'a pris sous son aile depuis de nombreuses années. Il a eu un rôle fondamental dans tous mes travaux (du Master 1 à la thèse en passant par le Master 2), son encadrement et son investissement m'ont beaucoup apporté. Je remercie vivement Sylvain Lavernhe pour sa grande disponibilité et sa forte implication aussi bien sur les aspects scientifiques et techniques que sur l'aspect humain. Sa présence quotidienne durant ces trois années de thèse a été primordiale. Enfin, je les remercie tous deux de m'avoir proposé ce sujet de thèse adapté à mes goûts et à mes envies, ce qui est particulièrement important pour moi. J'ai vraiment été heureux de travailler avec eux sur ce sujet très intéressant et j'ai du mal à imaginer qu'il soit possible de trouver meilleurs encadrants. Ils ont su supporter et composer avec mon côté tête de mule pour réussir à faire en sorte que je sois toujours motivé par mon « travail » durant toutes ces années. Merci à tous les deux !

Je tiens également à remercier Didier Dumur qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse et qui a contribué au projet PREMIUM en partenariat entre Supélec et le LURPA. J'ai ainsi eu la chance de travailler avec des moyens expérimentaux exceptionnels pour développer la commande numérique ouverte sur la machine 5 axes du laboratoire.

Mes remerciements vont également aux membres du jury : Richard Béarée avec qui j'ai pu avoir des échanges intéressants ; Emmanuel Duc et Jean-Yves Hascoët qui ont consacré du temps à rapporter mes travaux.

Cette thèse a été effectuée au sein du LURPA à l'École Normale Supérieure de Cachan. J'adresse donc également mes remerciements à l'ensemble des membres du Département de Génie Mécanique et en particulier aux enseignants et techniciens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler durant ma mission d'enseignement. Enfin, la bonne ambiance au labo est un élément très important pour mener à bien ce travail de longue haleine. Les pauses au coin café et les différentes activités partagées avec les doctorants sont autant de moments de convivialité qui, à mon avis, font pleinement partie de l'expérience de la thèse. Je ne me lancerai pas dans l'énumération de la longue liste des personnes qui ont été importantes pour moi, mais je remercie chaleureusement les gens du labo.

J'ai évidemment beaucoup travaillé pour réaliser ces travaux, mais le résultat final est pour une grande partie le fruit de rencontres. En effet, j'ai eu la chance de côtoyer de nombreuses personnes de très grande qualité qui m'ont énormément apporté. Merci beaucoup à tous.

Xavier

Remerciements

Table des matières

Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des figures	xi
Introduction	xvii
1 Processus d'élaboration des pièces usinées	1
1 Présentation du processus global d'élaboration des pièces usinées	3
1.1 Présentation du processus global	3
1.2 Rôle de la commande numérique	7
1.3 Mise en évidence des limitations associées aux commandes numériques industrielles	9
2 La commande numérique ouverte	17
2.1 Définition	17
2.2 Les actions industrielles et commerciales	18
2.3 Les actions universitaires	20
2.4 Le projet PREMIUM-OpenCNC	24
3 La commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC	26
3.1 Traitement de la géométrie	26
3.2 Interpolation temporelle de la vitesse d'avance	27
3.3 Contrôle temps réel d'une machine-outil industrielle	28
3.4 Architecture matérielle de la commande numérique ouverte	29
3.5 Domaines d'application des travaux	30
4 Synthèse et problématiques	31
4.1 Synthèse	31
4.2 Problématiques	32
2 Traitements géométriques dans la commande numérique	35
1 Introduction	37
2 Expression mathématique du lien entre la géométrie et la loi de mouvement . .	39
2.1 Équations fondamentales de la thèse	39

2.2	Expression mathématique des contraintes cinématiques	41
2.3	Approximation de la limite supérieure de la vitesse d'avance	41
2.4	Exemple d'utilisation de la limite supérieure de la vitesse d'avance	43
3	Bibliographie sur le lissage géométrique	44
3.1	Lissage global	45
3.2	Arrondissement local	49
4	Arrondissement local des discontinuités	52
4.1	Arrondissement local des discontinuités 3 axes	52
4.2	Arrondissement local des discontinuités 5 axes	54
4.3	Généralisation du problème de connexion de l'orientation	58
5	Résolution du problème de connexion de l'orientation	58
5.1	Définition de l'indicateur de fluidité de l'orientation	59
5.2	Optimisation de la connexion de l'orientation	60
5.3	Analyse de la sensibilité	61
6	Application pour l'arrondissement local des discontinuités	62
6.1	Coin de poche 5 axes avec un grand arrondissement	62
6.2	Pyramide avec un petit arrondissement	65
7	Conclusions	66
3	Interpolation temporelle à jerk limité en 5 axes	69
1	Introduction et bibliographie	71
2	Les contraintes cinématiques - étude de l'influence du jerk	78
3	L'interpolation temporelle VPOp	85
3.1	Discrétisation des contraintes	85
3.2	Approximation des dérivées géométriques	86
3.3	Principe d'intersection des contraintes	88
3.4	Fonctionnement détaillé de l'interpolation temporelle	88
3.5	Algorithme de recherche de solution	90
3.6	Implémentation d'un look ahead	91
4	Simulations et résultats expérimentaux	92
4.1	Trajet 2 axes en B-Spline natif	93
4.2	Trajet 2 axes en G1	95
4.3	Trajet 5 axes en B-Spline natif, application à une machine-outil 5 axes et à un robot anthropomorphe	97
4.4	Difficultés liées à la méthode d'interpolation temporelle	99
4.5	Présentation du logiciel VPOp	101
5	Conclusions	102

4	Passage du monde numérique à la réalisation physique	103
1	Introduction	105
2	Mise en œuvre technique de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC	106
2.1	Cohabitation de la commande numérique Siemens 840D et de la commande numérique ouverte	106
2.2	Architecture de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC	110
3	Contrôle temps réel des axes	117
3.1	Structure d’asservissement avec anticipation	117
3.2	Mesure de la réponse dynamique des axes	120
3.3	Adaptation dynamique des axes	122
3.4	Applications	123
4	Conclusions	127
5	Interpolation de la trajectoire directement sur la surface à usiner	129
1	Introduction et bibliographie	131
2	Étude des écarts géométriques introduits lors du processus de fabrication	136
2.1	Présentation des écarts géométriques	136
2.2	Écarts macro-géométriques introduits dans la chaîne numérique	138
2.3	Écarts micro-géométriques introduits dans la chaîne numérique	138
3	Méthode de calcul de trajectoires DTIS	139
3.1	Définition du trajet d’usinage	140
3.2	Calcul exact du trajet	142
3.3	Interpolation temporelle	144
4	Application	146
4.1	Comparaisons macro-géométriques	147
4.2	Comparaisons cinématiques	149
4.3	Comparaisons micro-géométriques	150
5	Conclusions	154
	Conclusions générales et perspectives	157
	Liste des références	163
	Annexe	I
A	Mesure des surfaces usinées dans le chapitre 5	I

Table des matières

Liste des figures

1	Processus de fabrication des pièces usinées	4
2	Chaîne numérique en 5 axes [Tournier <i>et al.</i> , 2006]	5
3	Comparaison du code G standard (ISO 6983) et de la programmation STEP-NC (ISO 14649) [ESPRIT, 2000]	6
4	Principe de la méthode de programmation par trajectoires ICAM [Rauch, 2007]	7
5	Représentation schématique des tâches effectuées par une commande numérique	8
6	Effet de la limite de jerk sur la vibration de la structure	9
7	Association d'une spline aux segments G1 [Langeron <i>et al.</i> , 2004] et [Siemens, 2009]	11
8	L'interpolation polynomiale dans la chaîne numérique d'après [Duc, 1998] . . .	12
9	Pièce test pour étudier le comportement du couple machine-outil / commande numérique [Dugas, 2002]	12
10	Optimisation de l'orientation outil avec prise en compte des contraintes de jerk [Lavernhe <i>et al.</i> , 2008]	13
11	Prise en compte des ralentissements dans la décomposition topologique des sur- faces [Tapie, 2007]	14
12	Optimisation des trajets hors matière [Pateloup, 2011]	15
13	Écarts géométriques introduits dans le processus [Prévost, 2011]	16
14	NX CAM – Siemens Sinumerik Virtual NC Controller Kernel (VNCK)	19
15	Intégration modulaire au sein du système de fabrication [Laguionie, 2010] . . .	21
16	Machine-outil ouverte à l'école centrale de Nantes [FoFdation, 2013]	21
17	Machine-outil 5 axes ouverte à Vancouver [Sencer <i>et al.</i> , 2008]	23
18	Simulations intégrant les efforts de coupe, la structure machine et le contrôleur [Altintas <i>et al.</i> , 2011]	23
19	Machine ouverte à Taiwan [Tsai <i>et al.</i> , 2010]	24
20	Photo de la machine Mikron UCP710 équipée de la commande numérique ou- verte PREMIUM-OpenCNC	25
21	Vue globale des travaux de thèse	32
22	Schéma de principe du passage d'un trajet FAO aux consignes temporelles en- voyées aux axes machine	37

23	Traitement de la géométrie et interpolation temporelle dans la commande numérique	38
24	Exemple en 2D des informations fournies par la limite supérieure du profil de vitesse	43
25	Arrondissement des discontinuités en 3 axes [Siemens, 2009, Yutkowitz et Chester, 2005]	44
26	Tableau récapitulatif de la littérature sur le lissage des trajets 3 et 5 axes	45
27	Lissage global 5 axes par interpolation des quaternions [Ho <i>et al.</i> , 2003]	46
28	Utilisation des B-Splines sphériques pour le lissage de l'orientation [Ge <i>et al.</i> , 2007, Fleisig et Spence, 2001]	46
29	Domaine d'orientation admissible et lissage des axes rotatifs [Castagnetti, 2008]	47
30	Lissage de l'orientation en utilisant la limite supérieure du profil de vitesse [Beudaert <i>et al.</i> , 2011]	48
31	B-Spline native 5 axes [Siemens, 2009] et [Langeron <i>et al.</i> , 2004]	48
32	Intégration d'un critère de fluidité pour l'usinage sur le flanc [Péchar, 2009]	49
33	Différentes méthodes d'arrondissement des trajets 3 axes	50
34	Arrondissement local d'un trajet 3 axes	52
35	Arrondissement local d'un trajet 5 axes	55
36	Courbe de paramétrage pour la connexion de l'orientation outil	57
37	Problème général de connexion en orientation	58
38	Lien entre l'indicateur de fluidité de l'orientation et la limite supérieure de la vitesse d'avance	59
39	Courbe de paramétrage	60
40	Effet de la position du premier point u_{haut1} sur la connexion de l'orientation	61
41	Photo du coin 5 axes arrondi avec une grande tolérance	63
42	Présentation des résultats pour le coin de poche 5 axes. Gauche : paramétrage $u_{haut} = u_{bas}$, droite : paramétrage optimisé	64
43	Comparaison des temps d'usinage pour le coin de poche 5 axes	65
44	Pyramide avec la vitesse d'avance VPOp en couleur	65
45	Présentation des résultats pour la pyramide. Gauche : paramétrage $u_{haut} = u_{bas}$, droite : paramétrage optimisé	66
46	Algorithme d'interpolation temporelle à deux passes	72
47	Profil à jerk limité 7 segments [Erkorkmaz et Altintas, 2001a]	73
48	Algorithme heuristique de recherche de solution d'interpolation temporelle [Erkorkmaz et Heng, 2008]	74
49	Rééchantillonnage des consignes [Erkorkmaz et Altintas, 2001a]	75

50	Intégration de l'erreur de contour dans l'interpolation temporelle d'après [Tsai <i>et al.</i> , 2008]	76
51	Algorithme d'interpolation temporelle 5 axes [Sencer <i>et al.</i> , 2008]	77
52	Schéma global de l'interpolation temporelle VPOp proposée	78
53	Dispositif expérimental permettant de mesurer l'influence du jerk sur les vibrations (MAL Vancouver)	79
54	Modèle Simulink du système	80
55	Oscillations de l'extrémité de la lamelle en fin de trajectoire	81
56	Effet de l'accélération et du jerk sur le déplacement maximum à l'extrémité de la lamelle	82
57	Effet de la vitesse et de l'accélération sur le déplacement maximum à l'extrémité de la lamelle	83
58	Influence du jerk sur les vibrations pour une trajectoire complexe	84
59	Principe d'intersection des contraintes	88
60	Principe itératif de recherche du profil de vitesse	89
61	Points calculés pour atteindre la vitesse programmée sur un trajet linéaire avec une contrainte de jerk	90
62	Exemple d'application du look ahead	92
63	Comparaison des consignes calculées par la commande numérique Siemens 840D et par VPOp.	93
64	Trajet trident format B-Spline	94
65	Vérification des contraintes sur le trajet trident	95
66	Trajet G1 2D en forme de cadenas. (a)trajet, (b) profil de vitesse, (c) vérification des contraintes de jerk	96
67	Look ahead pour le cadena G1	97
68	Profil de vitesse sur le cadenas G1 pour une commande numérique Fanuc et une commande numérique Siemens très dynamique	97
69	Trajet de poche ouverte 5 axes en B-Spline natif	98
70	Vérification des contraintes pour la poche ouverte 5 axes sur la machine Mikron	99
71	Logiciel d'interpolation temporelle VPOp	101
72	Photos de l'armoire électrique de la machine Mikron	107
73	Câblage du variateur 611U	109
74	Description du système modulaire dSPACE	111
75	Boîtiers de duplication des signaux des règles de mesure	112
76	Modèle Simulink / dSPACE de pilotage de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC	113

77	Interface ControlDesk pour le pilotage de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC	114
78	Interface Matlab pour transférer les trajectoires et analyser les mesures	115
79	Photo de l'armoire de commande dSPACE et de la machine-outil Mikron	116
80	Structure cascade avec anticipation [Groß <i>et al.</i> , 2001]	117
81	Structure d'asservissement pour l'anticipation en vitesse [Groß <i>et al.</i> , 2001]	119
82	Implémentation réelle de la structure d'asservissement avec anticipation en vitesse	120
83	Réponses fréquentielle et indicielle des boucles de courant et de vitesse	121
84	Adaptation dynamique des axes [Siemens, 2006a]	123
85	Écarts de contour dus à l'asservissement sur la trajectoire du trident	124
86	Vérification des contraintes cinématiques pour la trajectoire complexe 5 axes	125
87	Écarts de contour sur la trajectoire complexe 5 axes	126
88	Tension de commande sur l'axe A	127
89	Écart de flèche en interpolation linéaire et polynomiale	131
90	Problèmes liés à l'erreur de corde et à l'effet peau d'orange [Lartigue <i>et al.</i> , 1999, Lartigue <i>et al.</i> , 2004]	132
91	Écart causé par la transformation géométrique 5 axes [Bohez, 2002]	132
92	Définition d'un trajet par des courbes paramétriques de la surface d'usinage [Lartigue <i>et al.</i> , 2004]	133
93	Interpolation surfacique 5 axes [Koren et Lin, 1995]	134
94	Implémentation dans STEP-NC de l'interpolation surfacique [Li et Liang, 2011]	135
95	Présentation des écarts géométriques introduits dans le process de fabrication	137
96	Simulation de la surface usinée par Z-buffer [Lavernhe <i>et al.</i> , 2010]	137
97	Définition des hauteurs de crête transversales et longitudinales	139
98	Schéma de création des marques d'usinage liées à la vitesse d'avance	140
99	Diagramme EXPRESS-G relatif aux stratégies "Freeform" [ISO14649-11, 2004]	141
100	Posage d'un outil sur une surface complexe en 5 axes [Lavernhe, 2006]	143
101	Principe l'algorithme de posage exact d'un outil sur une surface complexe	144
102	Photo de la surface usinée avec les 5 stratégies différentes	147
103	Écarts de contour introduits par la FAO et par la CN	148
104	Limites supérieures de la vitesse d'avance pour les deux stratégies B-Spline et la méthode DTIS	149
105	Vitesses d'avance superposées au trajet pour les 5 trajectoires	151
106	Vitesses d'avance en fonction de l'abscisse curviligne et en fonction du temps	151
107	Mise en évidence des défauts visuels	152
108	Principe utilisé pour calculer les écarts micro-géométriques	153
109	Simulation des marques d'usinage pour le trajet G1 10 μm	154

110	Station de mesure STIL et localisation de la zone mesurée	III
111	Pièce usinée à basse et haute vitesses avec les stratégies G1 et B-Spline 10 μm	IV
112	Surfaces mesurées sur la pièce usinée à basse et haute vitesses avec les stratégies G1 et B-Spline 10 μm	V
113	Profils extraits pour les trajectoires à basses et hautes vitesses avec les stratégies G1 et B-Spline 10 μm	VI
114	Mesure de la surface et des profils extraits sur la pièce usinée à haute vitesse avec les 5 stratégies	VII

Introduction

Les machines à commande numérique sont largement utilisées dans l'industrie et sur un marché international fortement concurrentiel, il est important d'améliorer en permanence les outils de production. Ainsi, le processus de fabrication des pièces usinées a fortement progressé aussi bien sur les aspects numériques que sur les aspects physiques. En effet, le développement de la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) facilite beaucoup la planification des trajets d'usinage ; et le développement des machines-outils et des outils de coupe a permis l'apparition de l'Usinage Grande Vitesse (UGV). Cependant, la Commande Numérique (CN) n'a pas encore pleinement bénéficié de la révolution apportée par la FAO et l'évolution de l'informatique. Jusqu'à présent, peu de travaux ont concerné l'amélioration de la Commande Numérique (CN) qui fait le lien entre les parties numériques et physiques du processus de fabrication. En effet, la commande numérique des machines-outils reste pour le monde universitaire un domaine relativement peu développé jusqu'à là du fait de la difficulté de mettre en œuvre les moyens expérimentaux nécessaires à l'avancée des travaux scientifiques.

Après avoir optimisé localement chaque maillon du processus de fabrication, de nombreux travaux de recherche tendent à avoir une vision plus globale et donc à intégrer la commande numérique dans la boucle d'optimisation. Malheureusement, les commandes numériques industrielles rendent cette optimisation globale difficile. Les modes de programmation ont évolué depuis la création des commandes numériques dans les années 50, mais le principe de base de l'interpolation point à point n'a pas vraiment été remis en cause. Les améliorations sont difficiles d'une part, car les données d'entrée interprétables par la CN sont très limitées ; et d'autre part, car la commande numérique est une boîte noire où de nombreux paramètres sont inaccessibles. Ainsi, le travail sur la commande numérique « ouverte » est un enjeu actuel en plein essor.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est d'améliorer le processus de fabrication des pièces usinées grâce à la maîtrise de la commande numérique. En supprimant les contraintes sur les formats de description des trajets d'usinage, des marges importantes de progrès sont rendues accessibles. La création d'une commande numérique ouverte permettrait de lever les verrous associés aux commandes numériques industrielles. Ainsi, une chaîne numérique entièrement sous contrôle offrirait des possibilités d'amélioration du processus de fabrication des pièces usinées. Le développement des briques de base de la commande numérique a pour but de disposer d'une commande numérique dite « ouverte » au sens de la maîtrise du processus allant de la CFAO jusqu'à l'usinage des surfaces. D'un point de vue logiciel, les briques de base d'une commande numérique sont les algorithmes d'interpolation du trajet d'usinage qui permettent

de créer la trajectoire envoyée aux axes de la machine-outil. À ces briques logicielles s'ajoutent des briques matérielles pour réaliser l'asservissement des axes et effectivement commander les moteurs par le biais des variateurs.

Dans ce manuscrit, une distinction est faite entre trajet et trajectoire.

- trajet : mouvement purement géométrique de l'outil, équivalent de "tool path" en anglais.
- trajectoire : mouvement géométrique et temporel de l'outil, équivalent de "trajectory" en anglais.

Cette distinction est importante pour ces travaux de thèse. En effet, certains développements concernent uniquement la géométrie des trajets alors que d'autres touchent à la vitesse de déplacement le long de ces trajets. Pour reprendre les termes du titre de la thèse, l'interpolation est optimisée à deux niveaux pour l'usinage des surfaces complexes. Il est possible d'optimiser l'interpolation géométrique du trajet 5 axes pour mieux définir la géométrie ; et il est également possible d'optimiser l'interpolation temporelle de la trajectoire pour mieux planifier la vitesse d'avance. Ces deux aspects sont liés et la maîtrise complète de la chaîne numérique permet leur amélioration pour les applications d'usinage des surfaces complexes.

Le manuscrit est organisé en 5 chapitres. Le premier chapitre analyse de façon globale le processus d'élaboration des pièces usinées pour mettre en évidence les limitations associées aux commandes numériques industrielles. Cette analyse montre le besoin d'évolution et justifie donc les travaux sur la commande numérique ouverte. En effet, les marges d'optimisation du processus de production se situent principalement aux interfaces entre les différentes activités et la commande numérique est une boîte noire qui, sans collaboration étroite avec les constructeurs de CN, limite ces progrès. Après une étude bibliographique des travaux concernant les commandes numériques ouvertes, une présentation de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC est effectuée. Ce premier chapitre est conclu par la présentation des problématiques traitées dans ce manuscrit.

Le second chapitre permet de poser les bases mathématiques qui feront le lien entre la géométrie et la loi de mouvement associée à l'outil le long des trajets d'usinage. Un état de l'art présente les problématiques liées au lissage géométrique des trajets effectué par les commandes numériques. L'arrondissement local des discontinuités est plus particulièrement étudié, notamment pour des trajets 5 axes qui posent des problèmes au niveau de la gestion de l'orientation. Finalement, les travaux présentés dans ce chapitre permettent d'obtenir une géométrie continue qui sera interpolée temporellement par la suite.

L'interpolation temporelle présentée dans le chapitre 3 a pour but de calculer la loi de mouvement et donc de générer les consignes à envoyer aux moteurs de la machine-outil. Les consignes calculées doivent respecter des contraintes physiques imposées par le procédé et par

la machine-outil utilisée. Après une étude bibliographique, les différentes méthodes d'interpolation temporelle sont analysées. La limitation du jerk des axes est fondamentale pour les applications d'usinage grande vitesse, mais cela accroît fortement la complexité du problème d'interpolation temporelle. Cette difficulté se combine avec les problèmes liés à la gestion des axes linéaires et rotatifs. Ce travail sur l'interpolation temporelle a permis de développer un algorithme itératif performant pour le calcul de trajectoires d'usinage 5 axes grande vitesse. La comparaison avec des mesures effectuées sur la commande numérique Siemens 840D atteste de la qualité des trajectoires générées par les algorithmes développés.

Finalement, les travaux des chapitres 2 et 3 ont donné lieu à la création du logiciel VPOp (Velocity Profile Optimization) qui constitue une brique logicielle fondamentale de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC. Il est alors possible de calculer les consignes à envoyer aux axes, et ce avec un niveau de performance comparable à celui des commandes numériques industrielles.

La validation des travaux sur un moyen expérimental est importante, le chapitre 4 s'intéresse donc à l'implémentation physique de la commande numérique ouverte sur la machine-outil 5 axes du laboratoire. D'abord, les aspects matériels de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sont présentés. Puis, l'étude du contrôle temps réel avec anticipation (feedforward) est détaillée et l'implémentation physique de la structure d'asservissement est réalisée. Finalement, après ce lourd travail d'implémentation sur une machine-outil 5 axes performante, il devient possible d'usiner dans des conditions UGV avec une commande numérique ouverte.

Le dernier chapitre de cette thèse utilise les travaux des chapitres précédents sur le développement de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC pour améliorer l'usinage 5 axes des surfaces complexes. En effet, l'interpolation des trajectoires peut être optimisée, car la barrière du format de description des trajets est levée sur la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC. Le processus entre la CFAO et l'usinage étant complètement contrôlé, il est possible d'interpoler la trajectoire directement sur la surface à usiner sans introduire les écarts géométriques inhérents aux formats classiques de description des trajets. La meilleure définition des trajets d'usinage permet d'améliorer la qualité géométrique des pièces ainsi que la productivité du processus d'usinage. Des essais d'usinage en commande numérique ouverte démontrent les gains qui peuvent être obtenus grâce à la maîtrise complète de la chaîne numérique.

Chapitre

1

Processus d'élaboration des pièces usinées

Ce premier chapitre présente le contexte d'étude à travers une description du processus de fabrication des pièces usinées. L'analyse détaillée des limites et du rôle des commandes numériques industrielles permet de mettre en évidence l'intérêt des travaux réalisés sur la commande numérique ouverte. Un état de l'art des actions menées autour des commandes numériques ouvertes est effectué puis le projet PREMIUM-OpenCNC est présenté. Finalement, les problématiques scientifiques traitées dans la thèse sont exposées.

1 Présentation du processus global d'élaboration des pièces usinées

L'élaboration d'une pièce usinée nécessite des interactions fortes entre de nombreuses activités et chaque étape doit permettre de garantir la conformité de la pièce et le respect des spécifications. Comme nous allons le voir par la suite, ce processus vu dans son ensemble est particulièrement intéressant parce qu'il combine des activités numériques et physiques sophistiquées.

1.1 Présentation du processus global

L'élaboration de pièces de formes complexes par usinage 5 axes grande vitesse est un processus complexe, constitué principalement des étapes suivantes :

- la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui permet de définir la géométrie de la pièce à produire,
- la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) qui permet de programmer les trajets d'usinage,
- la Commande Numérique (CN) qui génère les consignes de mouvement des axes de la machine,
- la machine-outil qui permet d'effectivement produire la pièce usinée en combinant les mouvements de coupe et d'avance,
- l'usinage qui permet de faire les enlèvements de matière nécessaires à l'obtention de la pièce usinée.

Pour que la pièce usinée respecte les spécifications imposées par le bureau d'étude, chacune des activités doit être maîtrisée. Depuis de nombreuses années, les améliorations importantes de la technologie des machines et des outils ont permis le développement de l'usinage grande vitesse. La compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'usinage a aussi beaucoup progressé ce qui permet de définir des plages de fonctionnement optimum pour les procédés. De l'autre côté de la chaîne, les modeleurs géométriques ont aussi beaucoup évolué pour faciliter la tâche des concepteurs. Les éditeurs de logiciel proposent des environnements unifiés permettant de réaliser les activités de CAO et de FAO.

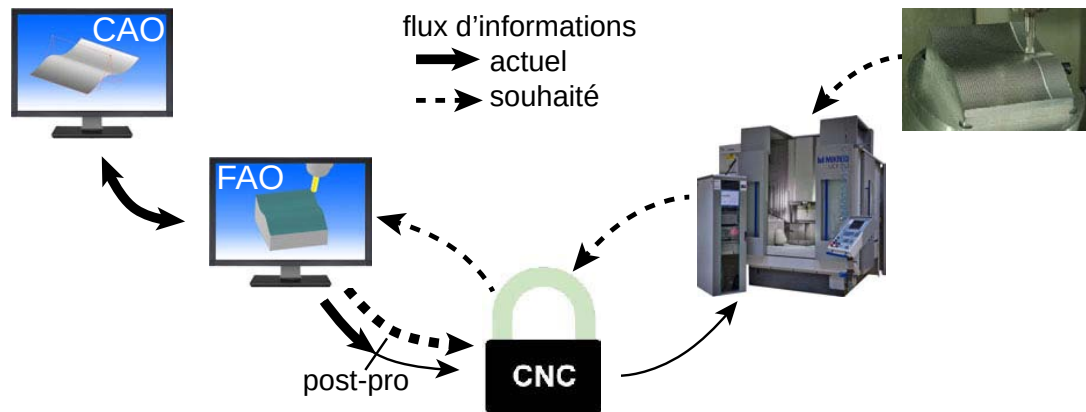


Figure 1 – Processus de fabrication des pièces usinées

Cependant, ces dernières années, comparée aux autres activités du processus de réalisation des pièces usinées, la commande numérique n'a bénéficié que de peu d'améliorations. Ce constat s'explique notamment parce que la commande numérique fait l'interface entre la partie numérique et la partie électromécanique du processus. Ainsi peu de recherches ont pu être menées au vu des difficultés techniques de mise en œuvre. D'autre part, ce processus s'est construit lentement au fil des années et des évolutions de l'informatique. La révolution numérique impose probablement de repenser la place de la commande numérique dans le processus global. Mais, une remise à plat du système entraîne des modifications profondes des façons de travailler ce qui est difficile dans un contexte technico-économique complexe.

La commande numérique est au cœur du processus d'élaboration des pièces usinées et constitue un frein à de nombreuses améliorations si on ne peut la faire évoluer. En effet, maintenant que l'optimisation locale des activités majeures de la chaîne a beaucoup avancé, les marges de progrès se situent principalement aux interfaces entre les différentes activités. Des développements plus globaux s'étalant sur plusieurs maillons du processus sont envisagés depuis longtemps, mais les commandes numériques industrielles restent souvent des boîtes noires qui n'offrent que peu d'opportunité d'évolution.

En s'intéressant au flux d'informations échangées par les différents éléments constitutifs du processus de fabrication, figure 1, on constate qu'actuellement la communication entre les systèmes de CAO et de FAO est relativement bien développée. D'un côté, des formats d'échange standard, comme le STEP (ISO 10303) par exemple, permettent de facilement échanger des données géométriques. D'autre part, les formats propriétaires des logiciels de CFAO permettent d'échanger bien plus que des informations purement géométriques et de lier étroitement les activités de CAO et de FAO. Par exemple, dans l'environnement TopSolid, le modèle FAO (fichier .Cam) contient les informations sur le process avec la gamme d'usinage et les stratégies associées, les informations sur la pièce à usiner ainsi que sur les bruts, et les informations sur les

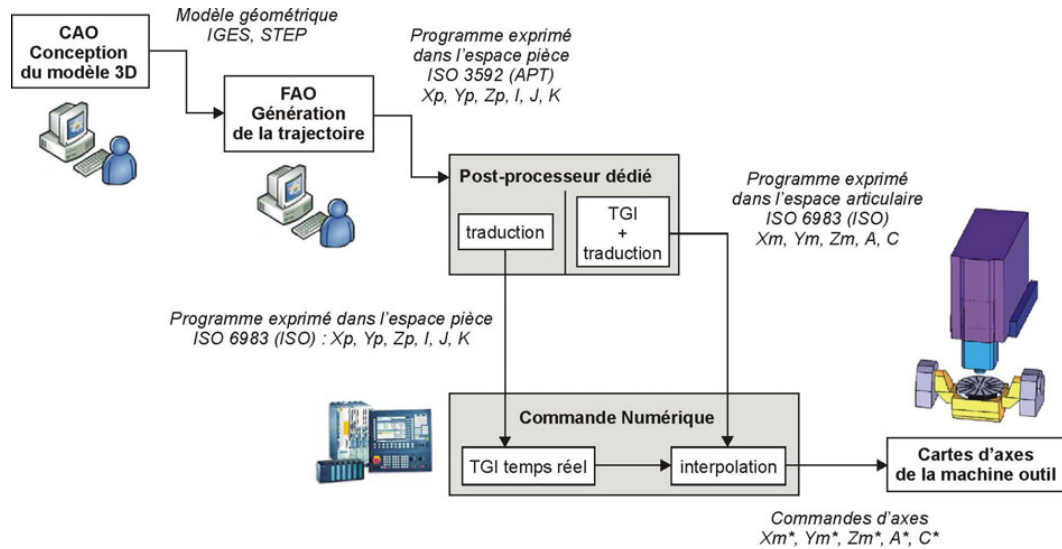


Figure 2 – Chaîne numérique en 5 axes [Tournier et al., 2006]

ressources utilisées (machine, outils...). Les fichiers CAO (.Top) de définition de la pièce et les fichiers FAO (.Cam) de définition du processus d'usinage sont liés ce qui permet de bénéficier de l'ensemble des informations présentes dans la CAO lors des activités de FAO. Dans ce contexte, toutes les informations sont disponibles et peuvent interagir.

Par contre, les informations qui arrivent à l'entrée de la commande numérique sont fortement appauvries. Le postprocesseur a pour rôle de transformer les informations générées par les systèmes de FAO en informations interprétables par la commande numérique. En effet, chaque constructeur de commande numérique utilise un langage dédié de très bas niveau et faiblement standardisé. Ainsi dans cette traduction, certaines données sont perdues ou au dégradées au moment où elles arrivent à la commande numérique. Par exemple, la géométrie de la pièce à usiner n'est pas décrite dans le programme CN. Sur la figure 1, le postprocesseur est dissocié du système de FAO pour mettre en valeur la perte sur le flux d'informations. Mais, il peut également faire partie intégrante des solutions logicielles de CFAO. Dans ce manuscrit, on appelle «post-processeur» les algorithmes qui transforment les informations de haut niveau présentes dans le modèle FAO en informations bas niveau contenues dans le programme CN.

La figure 2 présente les formats d'échanges utilisés pour faire le lien entre la FAO et la commande numérique. Les normes utilisées ont été élaborées bien avant les progrès fulgurants de l'informatique. Ainsi les informations transmises à la commande numérique sont très simples, voire simplistes, compte tenu des possibilités actuelles des calculateurs. En effet, les programmes d'usinage sont essentiellement constitués d'instructions basiques de déplacement alors qu'il est maintenant possible de stocker et de traiter énormément plus de données.

Pour aller plus loin dans l'amélioration globale du processus, il est évidemment souhaitable de pouvoir avoir des flux d'informations allant de la commande numérique vers la FAO

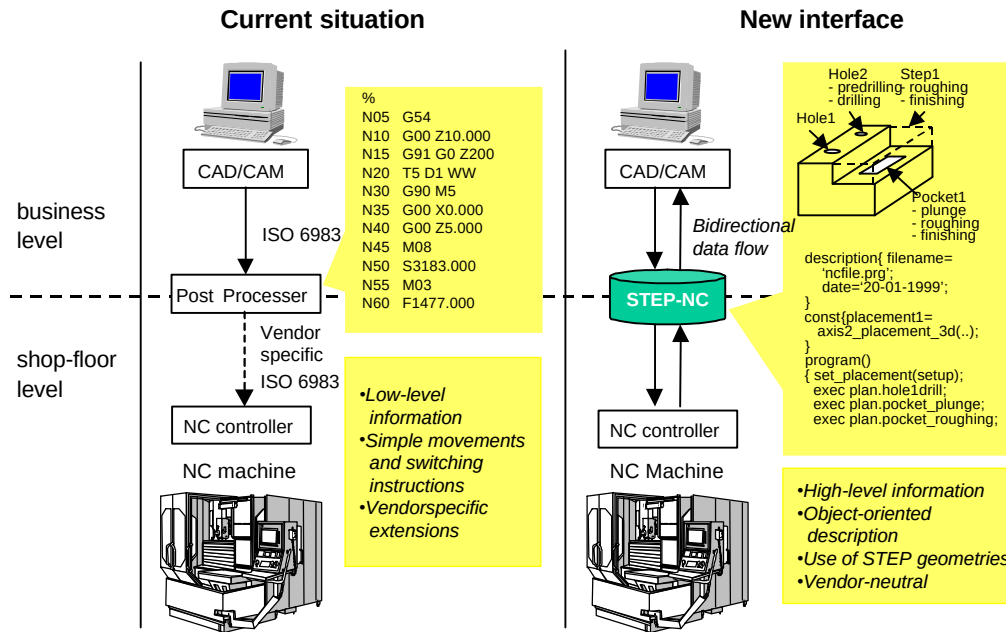


Figure 3 – Comparaison du code G standard (ISO 6983) et de la programmation STEP-NC (ISO 14649) [ESPRIT, 2000]

ainsi que du process physique vers la commande numérique. De même, la barrière du post-processeur doit être levée. Les travaux actuels sur STEP-NC (ISO 14649) visent à offrir un format d'échange standardisé contenant des informations de plus haut niveau et permettant des échanges bidirectionnels. Dès les années 2000, le consortium STEP-NC présente une chaîne numérique repensée, figure 3. Le code G actuellement utilisé par tous doit laisser place à une nouvelle façon de programmer basée sur STEP-NC. Ainsi un flux bidirectionnel d'informations de haut niveau peut être mis en place entre la CFAO et la commande numérique. Malgré de nombreux efforts, aujourd'hui aucune machine-outil utilisée industriellement n'intègre STEP-NC. Cependant, la compétition économique toujours plus intense poussera probablement un jour les industriels à aller chercher les marges de progrès disponibles grâce à cette intégration plus poussée des différentes activités de la chaîne numérique.

Finalement, comme nous l'avons vu plus haut, le flux d'informations unidirectionnel est très limitant et la gestion des postprocesseurs reste un problème non négligeable et coûteux. L'expérience des opérateurs qui constatent des problèmes et adaptent certains paramètres ne peut pas être traduite directement dans le fichier d'entrée. Entre la CAO et la FAO, le flux d'informations peut par exemple permettre de recalculer automatiquement une trajectoire si on change la géométrie CAO initiale. Cependant, si on change la position d'une bride ou la vitesse d'avance au pied de la machine, il est bien plus délicat de répercuter ces changements sur le reste du processus et de faire remonter les informations.

La figure 3 illustre plus particulièrement la partie numérique du processus d'élaboration des pièces usinées. De l'autre côté de la chaîne, de nombreux travaux cherchent également à

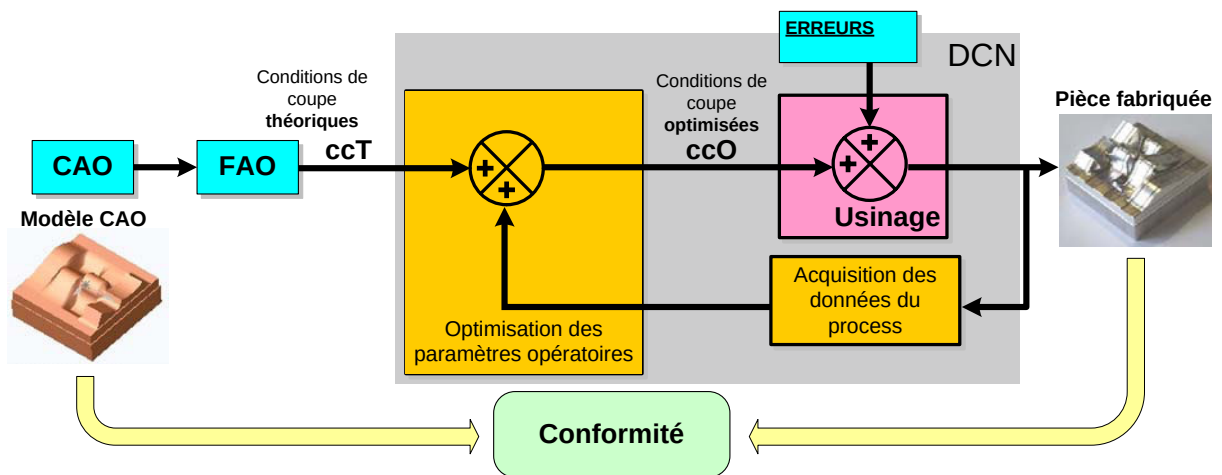


Figure 4 – Principe de la méthode de programmation par trajectoires ICAM [Rauch, 2007]

optimiser le processus en intégrant les connaissances physiques acquises sur les procédés dans la commande numérique. Par exemple, la méthode ICAM développée à l'IRCCYN, figure 4, a pour but de récupérer des informations sur le processus physique pour optimiser les paramètres opératoires à l'intérieur de la commande numérique. Cette approche basée sur les capteurs et actionneurs déjà présents sur les machines-outils peine à se développer à cause du manque d'interactions possibles avec la commande numérique. Un autre point bloquant important est le manque de possibilité d'action temps-réel. Il est quasiment impossible d'interfacer un nouveau capteur qui permettrait d'adapter les consignes de déplacement en fonction d'une grandeur physique mesurée, l'accélération ou l'effort par exemple.

Dans cette première partie, nous avons vu que le flux d'informations à l'intérieur du processus global d'élaboration des pièces usinées est perturbé par les formats d'entrée des commandes numériques ainsi que par l'impossibilité de faire remonter les informations. Nous allons maintenant présenter le rôle de la commande numérique et les principales fonctions qu'elle doit remplir.

1.2 Rôle de la commande numérique

La commande numérique est au cœur de ces travaux de thèse, le schéma bloc de la figure 5 présente les principales tâches effectuées par la commande numérique ainsi que les informations internes échangées. Ces tâches constituent les briques de base de la commande numérique. L'attention est principalement portée sur les aspects liés aux instructions géométriques, étant entendu que le programme CN contient également d'autres instructions (vitesses de broche, changement outil...). Dans cette thèse, la fonction principale étudiée est la fonction «relier la géométrie et le temps en intégrant les limitations physiques de la machine-outil». Les autres

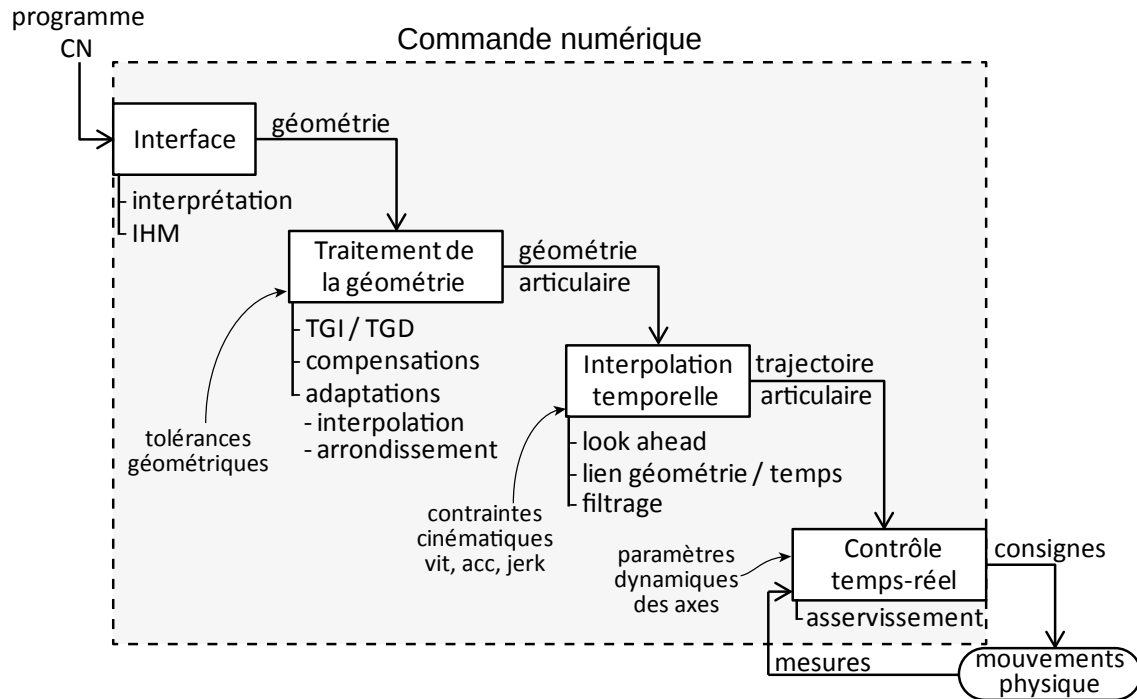


Figure 5 – Représentation schématique des tâches effectuées par une commande numérique

tâches de la CN par exemple l'interface homme/machine, l'interprétation, l'automate programmable industriel ne sont pas étudiées.

En entrée de la CN, on trouve un programme d'usinage définissant la géométrie de la trajectoire, la vitesse de parcours souhaitée, la vitesse de broche... Les instructions sont interprétées par la CN pour extraire notamment la géométrie des trajets d'usinage.

Le découpage entre le traitement de la géométrie et l'interpolation temporelle n'est pas forcément si clair dans les commandes numériques industrielles. On peut cependant considérer que la géométrie subit différents traitements : transformation géométrique, gestion des redondances cinématiques, compensation géométrique, interpolation ou approximation spline (compactage [Siemens, 2009])... Ces opérations ne font pas l'objet d'études particulières dans le cadre de cette thèse. Par contre, les arrondissements permettant de supprimer la discontinuité en tangence entre deux déplacements linéaires seront étudiés en détail dans le chapitre 2, notamment pour les trajectoires 5 axes.

À partir de la géométrie articulaire représentant le trajet des axes machine, l'interpolation temporelle consiste à calculer un profil de vitesse respectant les contraintes cinématiques de la machine. En effet, la vitesse d'avance programmée est une vitesse maximale souhaitée. Dans l'idéal, on aimerait que le mouvement d'avance s'effectue à vitesse constante, mais des ralentissements sont inévitables à cause des limites physiques des axes machine. Suite à l'interpolation temporelle, la trajectoire articulaire est obtenue. Les consignes de déplacement des moteurs sont échantillonnées, le lien entre la géométrie et le temps est donc fait.

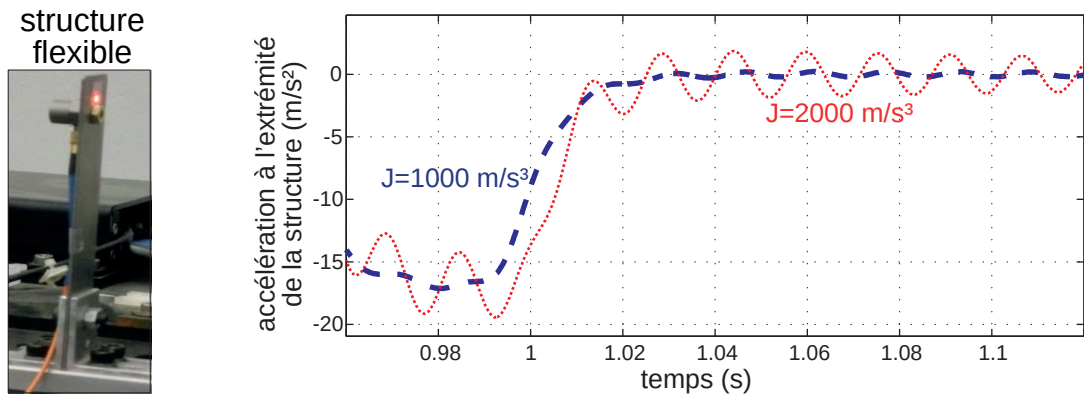


Figure 6 – Effet de la limite de jerk sur la vibration de la structure

La dernière étape est le contrôle temps-réel à proprement parler, un correcteur permet de corriger les écarts entre les consignes et le processus physique mesuré par les capteurs.

Finalement, on obtient le mouvement des axes machine qui, avec la structure physique de la machine-outil, génère le mouvement d'avance de l'outil. Les éléments constitutifs de la machine-outil pilotée (moteur, entraînements, architecture...) jouent un rôle prépondérant sur le temps d'usinage. En effet, l'interpolation temporelle prend en compte les contraintes en vitesse, accélération et jerk (dérivée de l'accélération) de chacun des axes machine qui sont directement liés aux composants physiques.

Le jerk est en général le paramètre qui limite la vitesse d'avance atteignable le long d'un trajet, de nombreuses études ont montré la nécessité de limiter ce paramètre [Béarée, 2005, Groß *et al.*, 2001]. Des explications détaillées de l'influence de la rigidité de la structure sur la contrainte de jerk seront données dans le chapitre 3 mais on peut déjà voir sur la figure 6 que le niveau de jerk imposé lors d'un déplacement joue un rôle prépondérant sur les oscillations à l'extrémité de la structure flexible mise en mouvement. Chaque axe ayant une rigidité différente, on comprend pourquoi des limites de jerk différentes sur chacun des axes doivent être respectées.

Dans la suite, on mettra particulièrement en évidence les limitations rencontrées lors des travaux de recherche réalisés sur la chaîne numérique FAO — postprocesseur — commande numérique. En effet, c'est le point de vue adopté pour aborder ces travaux de thèse.

1.3 Mise en évidence des limitations associées aux commandes numériques industrielles

Un aperçu des problématiques rencontrées lors de thèses récemment soutenues en France permet de mettre en évidence les limitations liées aux commandes numériques standards. Cette partie bibliographique est volontairement centrée sur des thèses, car les problèmes sont plus mis en valeur dans les manuscrits de thèses que dans les articles de revue. D'autre part, l'étude

des travaux du groupe Manufacturing 21¹ suffit déjà à montrer les limitations majeures associées à la commande numérique. Une première limitation vient tout simplement des formats mathématiques permettant de définir les trajets d'usinage. Une seconde contrainte est liée à la méconnaissance des algorithmes internes de la commande numérique. Enfin, la dernière limitation présentée concerne le manque de possibilité d'action en temps réel sur la commande numérique.

1.3.1 Limitations au niveau des formats de description des trajets

Tout d'abord, une limitation importante est due aux formalismes interprétables par les commandes numériques. En effet, les formats de description géométrique utilisables dans la commande numérique sont très limités. Les modèles mathématiques utilisés dans la CAO pour décrire des courbes ne peuvent pas être retranscrits dans un code CN. Ainsi pour les courbes, la géométrie doit être dégradée et il est tout simplement impossible de définir une surface.

Les courbes sont donc souvent discrétisées pour s'adapter au format linéaire classiquement utilisé pour la programmation des machines-outils. Cette discrétisation pose d'une part des problèmes de qualité géométrique, et d'autre part, des problèmes au niveau de la vitesse d'avance atteignable. Ainsi, on verra par la suite que les discontinuités créées par l'interpolation linéaire sont très pénalisantes pour la productivité.

Pour pallier à ce problème majeur, les constructeurs de commande numérique utilisent des algorithmes d'interpolation polynomiale à la volée, comme sur la figure 7. Ce processus est assez contradictoire puisqu'une courbe parfaitement connue en FAO est dégradée pour être transmise à la commande numérique. Et ensuite, une spline est réinterpolée à partir des points discrétisés, l'objectif étant de recréer au mieux la courbe initialement connue en FAO. Les étapes de discrétisation et de réinterpolation introduisent des écarts géométriques importants et sont très couteuses en temps de calcul dans la commande numérique. Cette procédure assez paradoxale est classiquement utilisée dans le monde entier pour l'usinage de formes complexes. Ceci montre à quel point les flux d'informations doivent être repensés dans la chaîne numérique.

Même si la majorité des usinages de surfaces complexes sont effectués en utilisant la procédure de réinterpolation présentée ci-dessus, il est possible de programmer directement un trajet polynomial. En effet, les commandes numériques peuvent également interpréter des instructions de déplacement exprimées dans un format polynomial. Cependant, ce besoin n'est pas couvert par les normes spécifiant les formats d'entrée de la commande numérique donc chaque constructeur propose sa propre syntaxe. Ce manque d'homogénéité complique évidemment la tâche et nécessite l'adaptation des postprocesseurs. La commande numérique Siemens 840D est, par exemple, capable d'interpréter des courbes polynomiales de degré 5 et des courbes B-Splines cubiques. Il est ainsi possible d'éviter les étapes inutiles de discrétisation et réinterpola-

1. Groupe de travail national en fabrication regroupant 18 laboratoires. Les thèmes abordés sont la modélisation du processus de fabrication, la fabrication virtuelle et le développement de nouvelles méthodes de fabrication.

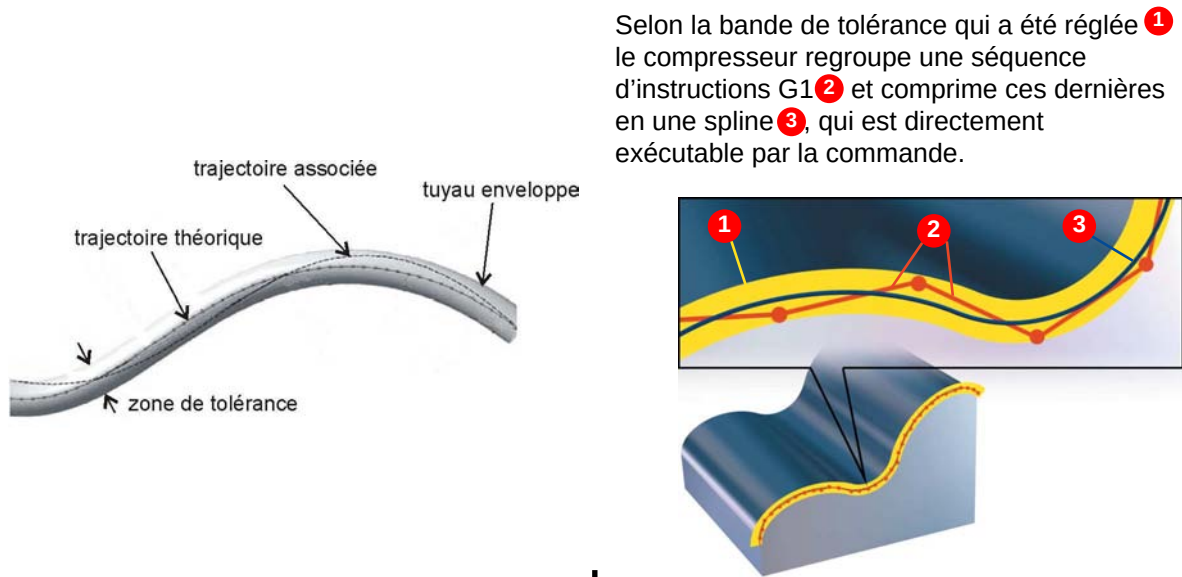


Figure 7 – Association d'une spline aux segments G1 [Langeron *et al.*, 2004] et [Siemens, 2009]

tion. Cependant, ce format est tout de même limité et les courbes de degré élevé ne peuvent pas être interprétées directement. Si la B-Spline est d'un degré supérieur à 3, on se retrouve encore une fois dans une situation où les blocages dans la transmission des informations entraînent une dégradation de la géométrie à usiner. La figure 8 récapitule les différentes situations et les possibilités d'utilisation d'un format polynomial. La dernière situation doit être préférée puisque toute transformation de la géométrie est source de défauts géométriques.

Le développement d'une commande numérique ouverte va permettre de remédier à tous ces problèmes historiques. En effet, en supprimant la barrière du code CN, toutes les informations sur la géométrie des trajets pourront être directement envoyées à la commande numérique sans transformation. Ainsi, on évite les pertes liées aux formats de description limités et on peut mieux utiliser les données géométriques dans la CN.

1.3.2 Limitations au niveau de la simulation de l'exécution du code CN

Dans tous les laboratoires français travaillant sur l'optimisation des trajets dans la chaîne FAO-CN-machine, des modèles prédictifs de la vitesse d'avance réelle ont été réalisés [Dugas, 2002] et [Terrier, 2005] à Nantes, [Lavernhe, 2006] et [Tapie, 2007] à Cachan, [Pessoles, 2010] à Toulouse, [Pateloup, 2005] et [Pateloup, 2011] à Clermont-Ferrand. Ce travail est rendu nécessaire par la méconnaissance des algorithmes utilisés dans les commandes numériques industrielles. En effet, il est naturel d'optimiser le trajet outil/pièce pour minimiser le temps d'usinage et ce n'est possible qu'en utilisant un modèle prédictif puisqu'on ne peut pas connaître le temps d'usinage ni la vitesse d'avance réels avant de lancer le premier usinage.

CAO	FAO	Post-pro.	CN	
			interpolation linéaire	Cas le plus répandu
	interpolation linéaire	interpolation linéaire	interpolation polynomiale	Interpolation à la volée par la CN
surface NURBS	interpolation polynomiale	interpolation polynomiale	interpolation polynomiale	Courbe native postprocesseur
		interpolation polynomiale	interpolation polynomiale	Courbe native FAO

Figure 8 – L'interpolation polynomiale dans la chaîne numérique d'après [Duc, 1998]

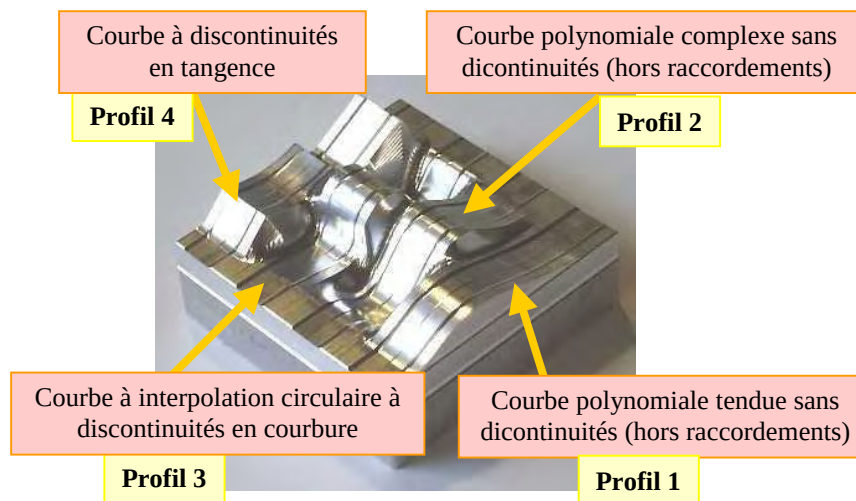


Figure 9 – Pièce test pour étudier le comportement du couple machine-outil / commande numérique [Dugas, 2002]

Dans sa thèse [Dugas, 2002], Arnaud Dugas a proposé un modèle pour prédire la vitesse de passage dans les discontinuités introduites à la transition entre les blocs de code G1 (interpolation linéaire). Un outil de simulation intégrant des comportements réels a été réalisé notamment pour prédire et compenser la flexion outil. De nombreux modèles ont été développés pour prédire le comportement de la commande numérique et faire le lien entre les activités de FAO et le processus d'usinage physique. Ainsi, la modélisation des asservissements permet de prédire les écarts de contour alors que la modélisation des efforts de coupe fournit les données nécessaires à la prise en compte de la flexion outil. L'ensemble de ces travaux permet d'obtenir un simulateur du processus global d'usinage. Enfin, une étude intéressante est effectuée sur la pièce test de la figure 9 pour étudier l'influence du format de description du trajet ainsi que de la vitesse d'avance sur la qualité géométrique de la pièce usinée.

Vincent Pateloup a lui aussi étudié le passage des discontinuités liées à l'interpolation li-

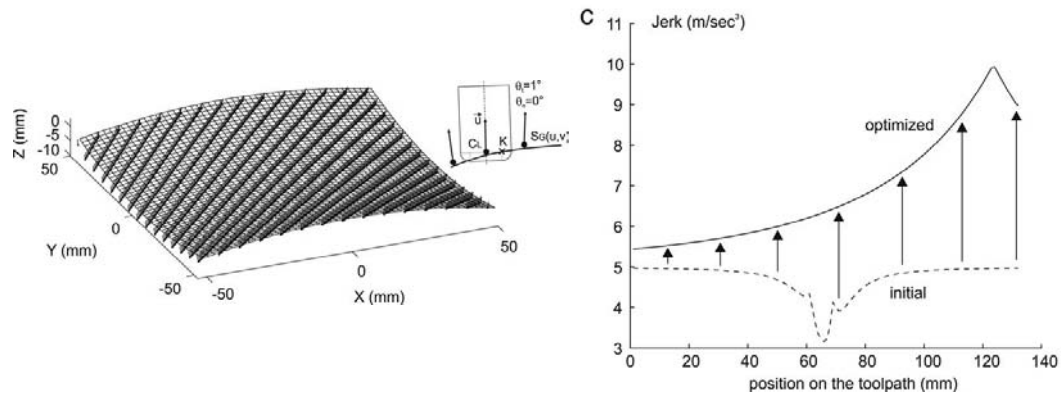


Figure 10 – Optimisation de l'orientation outil avec prise en compte des contraintes de jerk [Lavernhe *et al.*, 2008]

néaire et a également développé un modèle prédictif de la vitesse d'avance [Pateloup, 2005]. L'optimisation du vidage de poche aéronautique est effectuée pour minimiser le temps d'usinage tout en respectant les contraintes associées au procédé. Ce travail permet d'une part de faire ressortir des règles de bonne pratique à adopter lors de la planification des trajets, par exemple de privilégier une continuité C^2 des trajets. D'autre part, une approche différente de la planification des trajets FAO est envisagée avec l'utilisation d'algorithmes d'optimisation sous contraintes. Cela montre que pour optimiser davantage les activités de FAO, il est nécessaire de connaître le comportement et les contraintes associées aux maillons suivants du processus de fabrication.

Dans la même optique d'optimisation des trajets FAO, Sylvain Lavernhe a également modélisé le comportement de la commande numérique pour prédire la vitesse d'avance réelle pour des trajets 5 axes [Lavernhe, 2006]. L'introduction des axes de rotation a nécessité d'étudier en détail les problèmes liés à la transformation géométrique ainsi que de trouver une solution permettant de prédire la vitesse d'avance en mélangeant les contraintes venant des axes de translation et de rotation. Pour cela, un formalisme en inverse du temps qui permet de savoir quelle contrainte limite la vitesse d'avance a été utilisé. Cette modélisation a permis d'optimiser l'orientation d'un outil torique pour un usinage 5 axes en utilisant le concept de surface d'usinage, figure 10. L'importance des contraintes liées à la limitation du jerk sur chacun des axes machines est également mise en évidence dans ces travaux.

Xavier Pessoles a lui aussi étudié en détail le comportement de la commande numérique dans les discontinuités pour des trajets 3 et 5 axes [Pessoles, 2010]. Cette étude a permis de réaliser un simulateur prédisant la vitesse d'avance. Enfin, une optimisation du posage de la pièce est proposée pour des trajets 5 axes. Il est intéressant de voir qu'en plus d'optimiser le trajet dans l'espace pièce, pour les machines 5 axes, il est aussi possible d'optimiser le trajet dans l'espace machine. Cette optimisation est d'autant plus pertinente que les contraintes associées à la commande numérique sont maîtrisées, mais dans le même temps, le bon niveau de

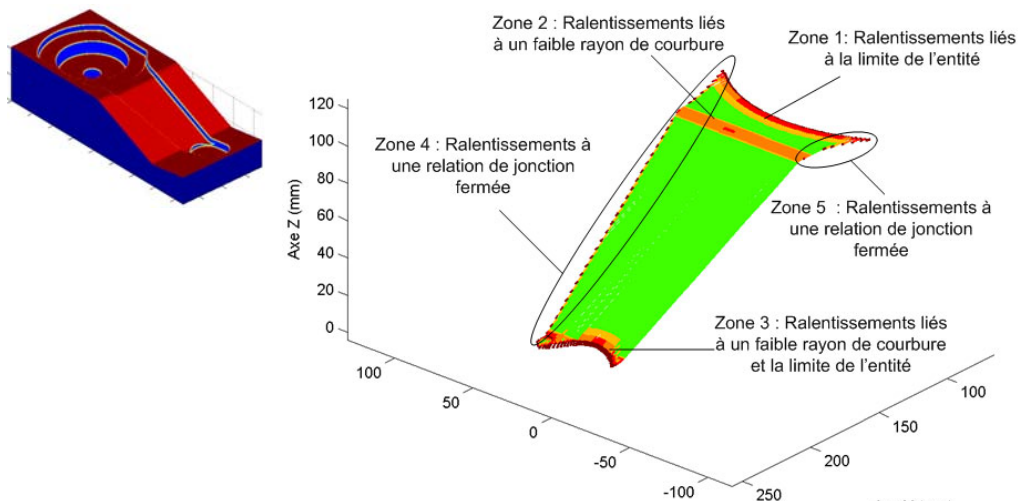


Figure 11 – Prise en compte des ralentissements dans la décomposition topologique des surfaces [Tapie, 2007]

modélisation doit être trouvé en fonction du besoin. Ainsi, au lieu d'utiliser le modèle prédisant finement le temps d'usinage, Xavier Pessoles utilise un critère d'optimisation beaucoup moins précis, mais beaucoup plus simple pour l'optimisation du posage. En effet, même si un modèle qui prédit très finement le comportement de la commande numérique est disponible, un modèle plus simple peut être plus pertinent et mieux adapté au besoin.

En restant sur cette thématique de prise en compte des contraintes liées à la commande numérique dans l'activité de FAO, Laurent Tapie utilise également un modèle permettant de prédire les zones potentielles de ralentissement [Tapie, 2007]. Les applications sur des moules de forges, figure 11, ont pour but de proposer un découpage topologique des surfaces pour assister le programmeur FAO dans le choix de la stratégie d'usinage. Pour que l'assistance des programmeurs soit performante, il faut fournir des résultats très rapidement. Il est donc intéressant d'avoir des critères simples d'évaluation des trajets d'usinage qui n'apportent pas la lourdeur d'une prédiction fine de la vitesse d'avance.

Dans sa thèse, Sylvain Pateloup a fait une classification de l'ensemble des écarts géométriques apparaissant tout au long processus d'usinage. Ainsi les paramètres les plus influents pour une machine-outil à architecture parallèle sont répertoriés. On voit aussi que certains écarts sont introduits même au niveau purement numérique (génération des trajets FAO, interpolation par la CN). D'autre part, des modèles de prédiction du temps d'usinage et des défauts sont utilisés pour adapter les paramètres du processus d'usinage. Enfin, les trajets hors matières sont aussi optimisés pour diminuer les temps d'usinage, figure 12. Pour cela, les algorithmes internes de la commande numérique qui réalisent la planification de la vitesse d'avance ont été modélisés. En conclusion de sa thèse [Pateloup, 2011], il indique qu'après avoir identifié l'origine des défauts il devient intéressant d'appliquer des actions correctives « *selon deux voies d'études envisageables* » :

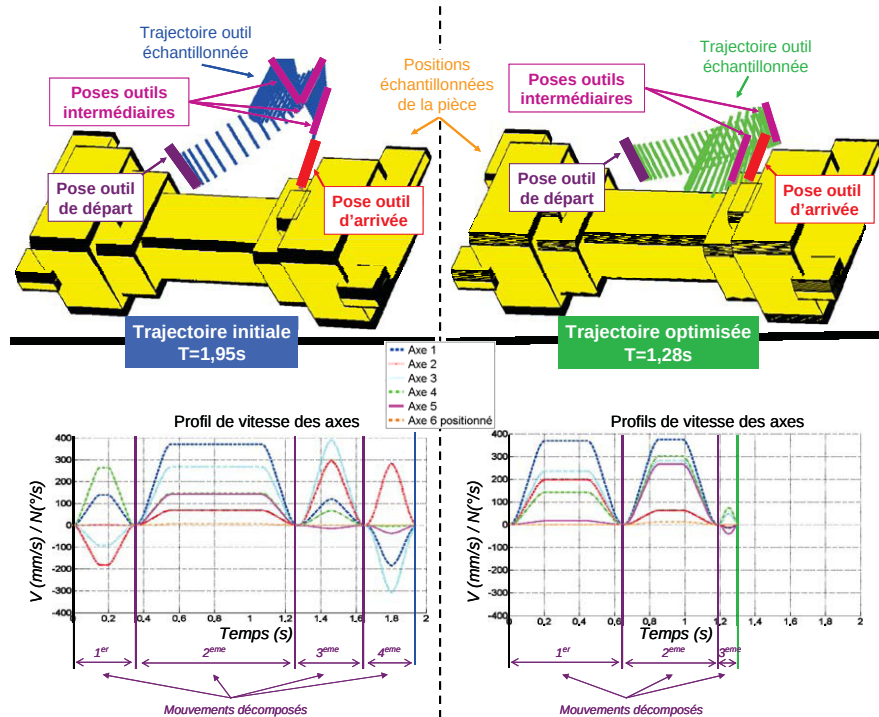


Figure 12 – Optimisation des trajets hors matière [Pateloup, 2011]

- une correction anticipée hors ligne qui propose des modifications du processus en intégrant le comportement réel de la machine analysé à partir de modèles suffisamment prédictifs.
- une correction en temps réel qui intervient dans la boucle de commande de déplacement des axes de la machine. »

Ceci est tout à fait significatif de la tendance actuelle à vouloir disposer de moyens d'action en temps réel au niveau de la commande numérique. La commande numérique ouverte donne justement accès à ces voies d'étude.

Tous les travaux de recherche évoqués dans cette partie montrent la nécessité de connaître les algorithmes internes utilisés dans la commande numérique pour optimiser le processus de fabrication dans son ensemble. Chaque thèse aborde une voie d'optimisation différente ce qui montre bien qu'une maîtrise complète des aspects liés à la géométrie et à la vitesse d'exécution des trajectoires ouvre un large champ d'exploration pour perfectionner le processus de fabrication des pièces usinées.

1.3.3 Limitations au niveau du pilotage temps réel

La dernière limitation mise en valeur dans le cadre de cette thèse vient de l'impossibilité d'agir en temps réel sur les consignes calculées par la commande numérique. Les thèses citées jusqu'à présent ont abordé la commande numérique par le lien qu'elle a avec la FAO. Quand on

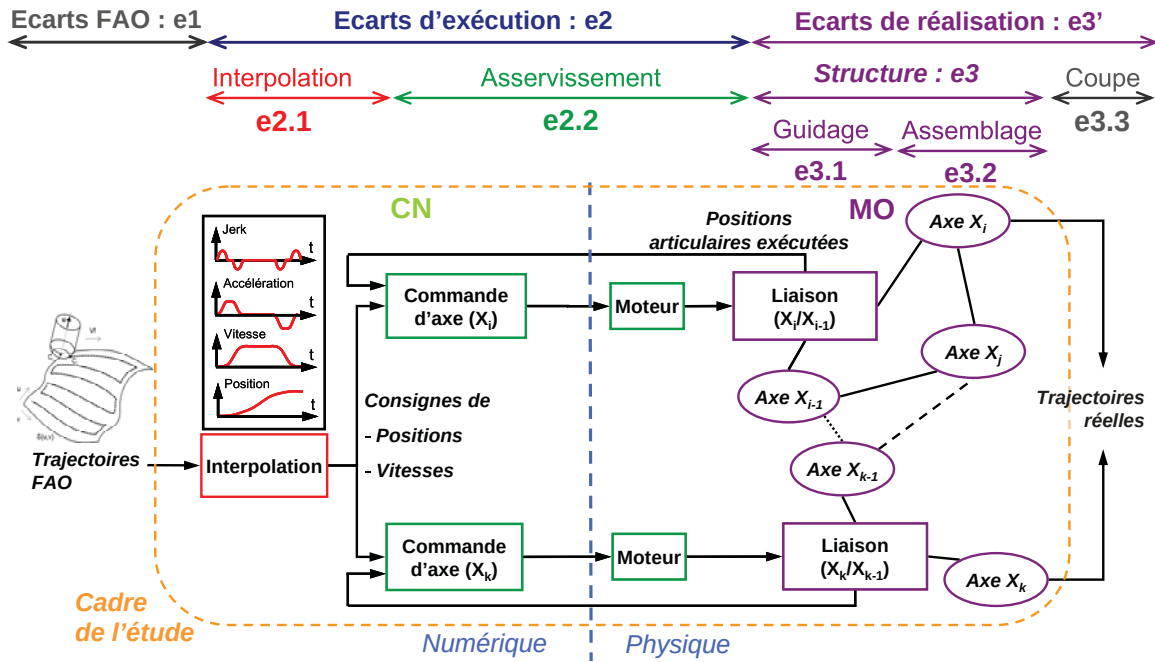


Figure 13 – Écarts géométriques introduits dans le processus [Prévost, 2011]

s'attaque à la commande numérique par l'aval (côté machine-outil), on se heurte au fait que les possibilités d'action en temps réel sur la commande numérique sont extrêmement réduites.

David Prévost, [Prévost, 2011], s'intéresse plutôt à ce qu'il se passe en sortie de la commande numérique. En effet, dans le cadre de son étude, les trajets FAO sont une donnée d'entrée fixée. Le but de cette thèse est d'identifier chaque cause d'écart géométrique au niveau du couple commande numérique / machine-outil, figure 13. Cette analyse montre que les écarts liés à l'asservissement peuvent être importants, il propose donc une méthode pour les diminuer. Pour cela, il est encore nécessaire de modéliser le comportement de la commande numérique industrielle et en particulier sa structure d'asservissement. Grâce à ce modèle, les écarts géométriques peuvent être prédits et une stratégie de compensation des écarts de contour (CEC) est proposée. Cette méthode de compensation devrait être implémentée en temps réel dans la commande numérique ce qui n'est pas possible avec une commande numérique industrielle. Ce constat est similaire à celui effectué par Sylvain Pateloup dans la conclusion de sa thèse.

Pour résoudre ces problématiques d'action temps réel, le développement d'une machine-outil équipée d'une commande numérique ouverte est absolument nécessaire. De plus, la validation des méthodes d'optimisation proposées doit se faire dans un contexte classique d'usinage grande vitesse, et il est donc important que la machine-outil utilisée pour faire les expérimentations soit un moyen de production performant.

En s'approchant encore plus du procédé, on trouve également des besoins forts d'adaptation de la commande numérique. Par exemple, pour le polissage des optiques de télescopes spatiaux,

la société Zeeko a développé un nouveau procédé permettant d'atteindre des critères d'état de surface de quelques nanomètres [Beaucamp *et al.*, 2011]. Pour améliorer encore leur procédé de polissage de précision, le contrôle précis de la vitesse d'avance réelle est nécessaire ce qui n'est pas possible avec une commande numérique classique. Leur tentative de spécifier la vitesse de consigne désirée pour chaque bloc de code CN a évidemment été infructueuse puisque les algorithmes de traitements géométriques et d'interpolation temporelle sont incontrôlables. Dans sa thèse sur le polissage [Guiot, 2012], Anthony Guiot a rencontré le même type de problème. La maîtrise des algorithmes internes de la commande numérique doit permettre de résoudre ces difficultés. De nombreuses autres problématiques industrielles pourraient être résolues par l'utilisation de commande numérique ouverte (pilotage de la machine par le procédé, optimisation automatique du procédé...).

Tous ces problèmes, tant au niveau des échanges de données que de la simulation et du pilotage des machines-outils, poussent la communauté à faire évoluer les commandes numériques actuelles. Les exemples précédents tirés de thèses récemment soutenues justifient le développement de commandes numériques ouvertes. Une commande numérique ouverte réglerait les problèmes liés à la modélisation des algorithmes internes de la commande numérique et permettrait d'avoir des possibilités d'action temps réel sur le processus.

2 La commande numérique ouverte

Comme nous venons de le voir, la commande numérique ouverte est un enjeu important tant au niveau industriel qu'au niveau académique. Avant la présentation du projet PREMIUM-OpenCNC, un état de l'art des actions industrielles et académiques est présenté. Ceci permet de replacer ces travaux de thèse dans un contexte international.

2.1 Définition

Il n'est pas facile de définir ce qu'est une commande numérique « ouverte ». En effet, chaque acteur attribue le sens qui lui convient au qualificatif « ouvert ».

Certains constructeurs de commandes numériques revendiquent d'avoir une commande numérique ouverte lorsqu'ils proposent à l'utilisateur de créer des interfaces homme/machine personnalisées. Ainsi de nombreuses commandes numériques basées sur un environnement Windows offrent des possibilités de programmation directement sur la CN sans pour autant donner l'accès aux algorithmes internes.

[Pritschow *et al.*, 2001] définissent les critères de portabilité, d'extensibilité, d'interopérabilité et de mise à l'échelle qui permettent de considérer qu'une commande numérique est ouverte. Ainsi, une architecture ouverte doit permettre des développements modulaires qui pourront se

greffer à la structure initiale. Les communications entre les différents modules doivent également se faire de manière ouverte c'est-à-dire en utilisant des protocoles de communication neutres. La définition de l'architecture et des protocoles de communication est un élément primordial pour le développement des commandes numériques ouvertes, mais cela ne fait pas l'objet d'étude dans ce manuscrit. Cependant, une meilleure structuration des développements effectués serait nécessaire pour s'intégrer dans les actions internationales autour du développement du standard STEP-NC.

Pour nous, l'aspect « ouvert » est donné par la maîtrise du passage de la FAO aux consignes envoyées aux axes machine. En effet, la commande numérique ouverte développée ne respecte par forcément les concepts de modularité ou d'interopérabilité ; les protocoles de communication ne sont pas étudiés, mais la géométrie et la loi de mouvement sont maîtrisées tout au long du processus. L'architecture est dite « ouverte » puisque de nouveaux algorithmes d'interpolation ou d'asservissement peuvent être implémentés et que des moyens d'action temps réel sont disponibles.

2.2 Les actions industrielles et commerciales

Tout en évitant de faire un catalogue des nouvelles fonctionnalités offertes par les constructeurs de commande numérique, ce paragraphe a pour but de présenter les évolutions industrielles majeures entrant dans le cadre de cette thèse.

Pour ce qui est de la description de la géométrie des trajets, Siemens en partenariat avec le LURPA et Dassault Systèmes (éditeur du logiciel CATIA) a développé le format B-Spline natif [Duc, 1998, Langeron *et al.*, 2004]. C'est une amélioration importante par rapport à la description discrétisée G1 même si on verra qu'il est possible d'aller encore plus loin.

Pour ce qui est de l'interprétation et de l'interpolation temporelle, des améliorations sont également en cours. En 2005, Siemens met sur le marché VNCK (Virtual Numerical Control Kernel) qui permet de simuler l'usinage en utilisant exactement les algorithmes qui seront utilisés pour le pilotage de la machine-outil, figure 14. Ainsi la vérification du code CN est plus performante puisque toutes les instructions sont analysées comme sur la machine réelle. Cet outil a rapidement été intégré dans le logiciel Vericut de CGTech. Auparavant, Vericut utilisait ses propres algorithmes pour interpréter les programmes ce qui évidemment peut causer des écarts par rapport au traitement d'une commande numérique Siemens 840D. À partir de là, le fabricant de machines DMG propose «DMG virtual machine» qui intègre les caractéristiques machine et permet de simuler l'ensemble du processus. Ces éléments sont implémentés dans des solutions FAO, comme TopSolid'Cam par exemple, pour avoir des simulations toujours plus proches du processus réel et notamment garantir des trajets sans collision.

Pour ce qui est de l'adaptation de la vitesse d'avance en temps réel en fonction du procédé, Heidenhain propose des innovations. En effet, l'asservissement d'avance adaptatif AFC

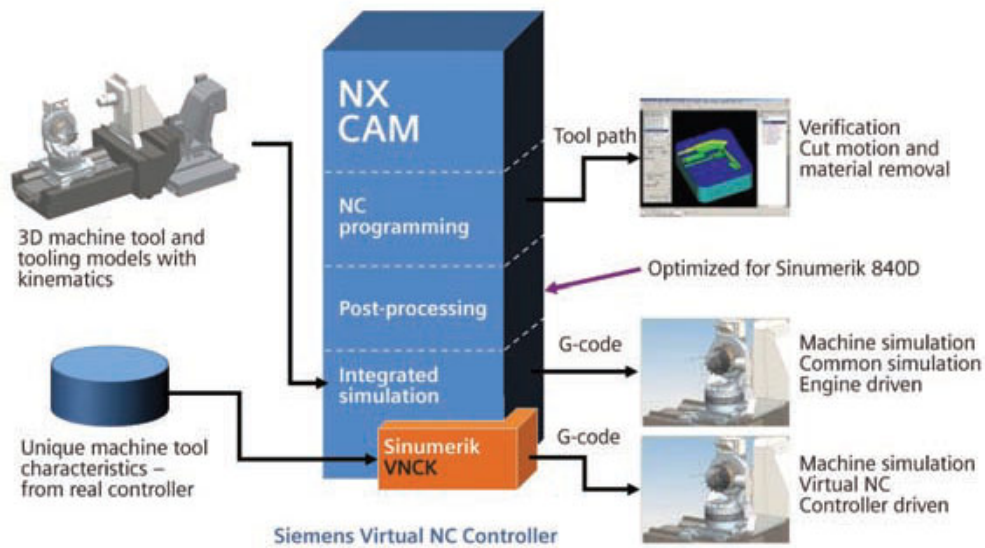


Figure 14 – NX CAM – Siemens Sinumerik Virtual NC Controller Kernel (VNCK)

(Adaptive Feed Control) permet d'augmenter la vitesse d'avance en fonction de la puissance consommée à la broche. C'est un bon exemple de solutions techniques qui sont apparues dans les articles scientifiques et qui commencent à être implémentées par les constructeurs de commande numérique. Les marges de progrès de ce type sont encore très importantes dans le secteur de la commande numérique justement parce qu'il est resté fermé pendant de nombreuses années.

Pour ce qui est de l'intégration de nouveaux capteurs, en 2010 Okuma propose ses fonctions «Machining Navi» permettant de réduire les vibrations en usinage. Les conditions d'usinage sont analysées à partir des bruits enregistrés par un microphone et la vitesse de broche est automatiquement adaptée pour se placer au mieux par rapport aux lobes de stabilités.

Toutes ces innovations montrent bien que les marges de progrès dans le domaine de la commande numérique sont encore très importantes et que la concurrence est rude entre les différents acteurs du marché. Toutefois, Siemens semble disposé d'un atout important par rapport aux autres constructeurs suite au rachat de l'éditeur de CAO NX CAM en 2007. En effet, Siemens peut maintenant intégrer tous les maillons de la chaîne numérique de la CAO au pilotage de la machine et donc faire des passerelles qui étaient jusque là inaccessibles.

On peut donc légitimement se demander s'il y a un intérêt à mener des travaux de recherche sur les commandes numériques alors que les constructeurs de CN industrielles semblent largement en avance par rapport au monde universitaire. Tout d'abord, on peut espérer que des idées nouvelles émergent suite à l'ouverture de ce champ disciplinaire. Cependant, le sujet n'est pas tant de faire de la compétition sur les éléments déjà disponibles dans les contrôleurs industriels, mais plutôt de s'ouvrir des portes pour aller plus loin. En effet, comme nous l'avons vu dans

ce premier chapitre, il y a de nombreux éléments qui sont simplement irréalisables avec une commande numérique «fermée». Un intérêt de cette thèse est de développer les algorithmes nécessaires au pilotage d'une machine à commande numérique UGV 5 axes, pour ensuite montrer comment avec une chaîne numérique entièrement maîtrisée il est possible d'améliorer le processus d'usinage global.

2.3 Les actions universitaires

Dans les années 90 et au début des années 2000, de nombreux projets sur la commande numérique ouverte ont vu le jour dans le monde entier : en Europe, les projets OSACA (Open System Architecture for Control within Automation Systems) et OCEAN (Open Controller Enabled by an Advanced Real Time Network), le projet OMAC (Open Modular Architecture Controls Users Group) aux États-Unis, le projet FAOP (FA Open Systems Promotion) au Japon. Un état de l'art de ces projets est présenté dans la thèse de [Susanu, 2005] ainsi que dans «Open Controller Architecture - Past, Present and Future» [Pritschow *et al.*, 2001]. Tous ces travaux sont très orientés sur la structuration et la construction de l'architecture modulaire nécessaire à la mise en place d'une commande numérique ouverte.

Pour le monde universitaire, les prototypes physiques sont très difficiles à mettre en œuvre puisqu'il faut toucher au logiciel et au matériel. La commande numérique est vraiment l'interface entre le monde numérique et le monde physique, il y a donc peu d'équipes de recherche qui travaillent sur cette thématique.

À Supélec, les travaux sur la commande prédictive généralisée adaptée aux machines-outils ont commencé au début des années 90 [Boucher *et al.*, 1990, Dumur et Boucher, 1994]. Les limitations liées aux commandes numériques fermées ont rapidement été atteintes et les architectures ouvertes ont été privilégiées [Dumur *et al.*, 1998]. Une première implémentation de la commande prédictive a été réalisée en partenariat avec le CETIM sur une machine ouverte pilotée par un PC Power Automation [Dumur *et al.*, 2008]. Cependant, les capacités de mémoire très limitées n'ont pas permis d'aller au bout des optimisations.

À l'IRCCYN, de nombreux travaux sont menés sur la commande numérique. D'abord, la thèse de Matthieu Rauch [Rauch, 2007] a développé la méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) pour optimiser la programmation de la machine-outil en fonction du comportement réel du process, figure 4. Ensuite la thèse de Raphaël Laguionie [Laguionie, 2010] s'est concentrée sur les développements associés à STEP-NC avec la plateforme SPAIM (STEP NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing), figure 15.

Le projet européen FoFdition [FoFdition, 2013], commencé en 2010, est un des derniers projets européens en date ayant une forte implication sur la commande numérique ouverte. Une partie du projet consiste à développer une commande numérique ouverte sur une machine industrielle, figure 16. Ce travail est réalisé par l'IRCCYN avec un cœur de la CN ouverte

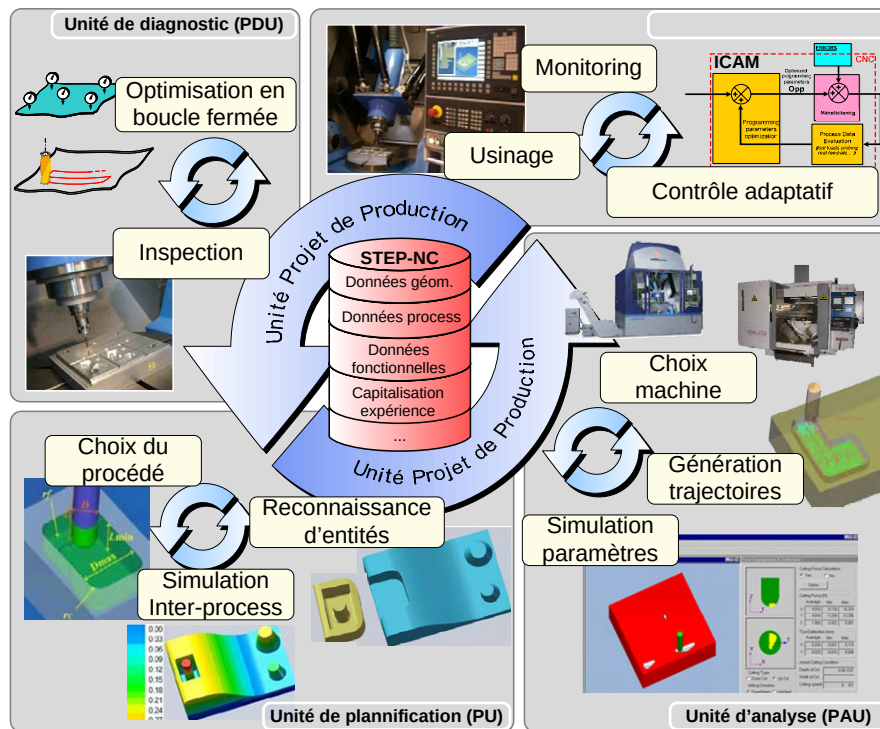


Figure 15 – Intégration modulaire au sein du système de fabrication [Laguionie, 2010]

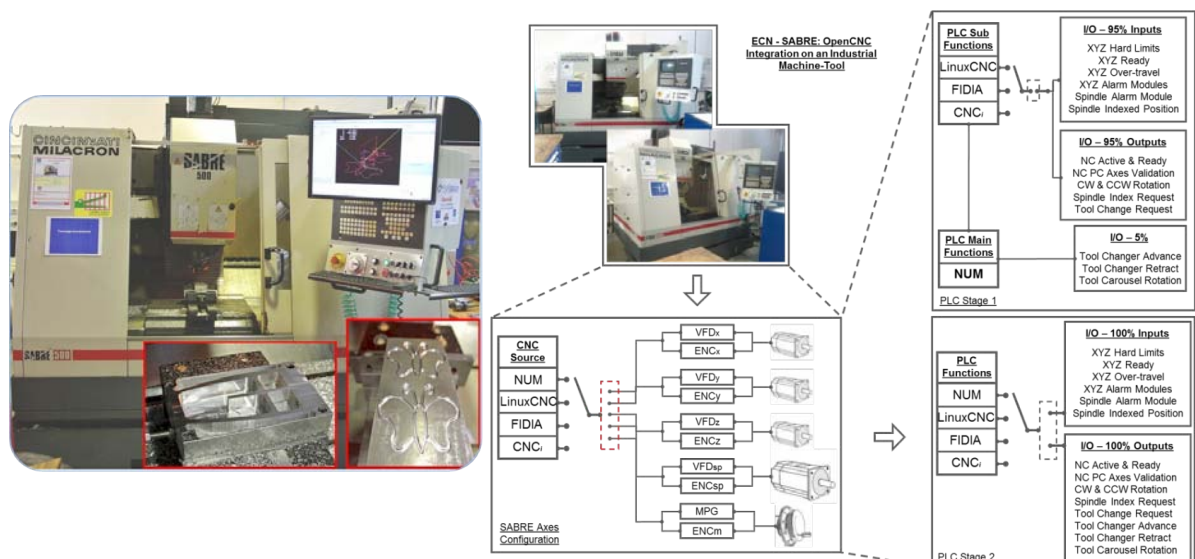


Figure 16 – Machine-outil ouverte à l'école centrale de Nantes [FoFdation, 2013]

basé sur le logiciel libre EMC2 (Enhanced Machine Control) développé par la communauté LinuxCNC [[LinuxCNC, 2013](#)]. Là encore, il y a un travail important au niveau de la définition des interfaces et de la gestion des données. D'ailleurs, l'IRCCYN est aussi en pointe pour le développement du standard international STEP-NC qui permettra à terme de supprimer les problèmes liés au postprocesseur et d'envoyer des données de plus haut niveau à la commande numérique. Ce projet est tout à fait complémentaire avec ces travaux de thèse puisqu'il a pour but d'établir un cadre pour les contrôleurs universels intelligents des usines du futur.

Lancé en 2009, le projet européen Chameleon [[Chameleon Projet, 2013](#)] intègre également des activités sur la commande ouverte. Il a pour but de développement de nouveaux concepts de contrôle notamment en faisant du contrôle actif avec des systèmes mécatroniques pour, par exemple, limiter les vibrations en usinage.

Un autre grand projet français ayant une forte connexion avec le développement de commandes numériques ouvertes a débuté en 2012, il regroupe un consortium composé d'usineurs, d'éditeurs de logiciel et de laboratoires dont fait partie le LURPA. Le projet ANGEL (Atelier Numérique coGnitif intEroperable et agiLe), piloté par SPRING Technologies (éditeur du logiciel de simulation NCSimul), vise à favoriser l'interopérabilité entre les différents maillons de la chaîne numérique en utilisant le format STEP-NC. Un des objectifs est de supprimer le post-processeur qui limite la flexibilité en empêchant la portabilité des programmes d'une machine à l'autre.

Au Manufacturing Automation Laboratory de Vancouver dirigé par Yusuf Altintas, la commande numérique ouverte fait l'objet d'études depuis une vingtaine d'années [[Altintas et Munasinghe, 1994](#), [Altintas et Erol, 1998](#)]. Erkorkmaz a fortement contribué aux développements des algorithmes internes de la commande numérique aussi bien au niveau de l'interpolation temporelle [[Erkorkmaz et Altintas, 2001a](#), [Altintas et Erkorkmaz, 2003](#)] que des écarts de contour [[Erkorkmaz et Altintas, 2001b](#)]. D'abord, le profil de vitesse à 7 segments est défini dans [[Erkorkmaz et Altintas, 2001a](#)] pour faire des interpolations 3 axes à jerk limité. Ensuite, d'autres solutions de recherche de profils de vitesse sont développées pour des trajets 3 axes [[Heng et Erkorkmaz, 2010](#)] et 5 axes [[Erkorkmaz et al., 2011](#)]. Sencer a proposé une autre méthode pour l'interpolation temporelle 5 axes [[Sencer et al., 2008](#)] et a aussi travaillé sur les écarts de contour [[Sencer et al., 2009](#), [Sencer et Altintas, 2009](#)] pour étendre le principe du « cross-coupled control » ([[Koren, 1980](#)]) en 5 axes. Au niveau matériel, l'implémentation a été réalisée sur une fraiseuse 3 axes sur laquelle deux axes rotatifs ont été ajoutés, figure 17. Le logiciel Virtual CNC [[MAL Inc., 2013](#)] est développé en parallèle de ces travaux de recherche.

En Allemagne, des activités sur la commande numérique sont menées dans deux instituts : WZL à Aachen et ISW à Stuttgart respectivement sous la direction de C. Brecher [[Brecher et al., 2011](#), [Brecher et al., 2006](#)] et de A. Verl [[Sekler et al., 2012](#), [Dietmair et Verl, 2009](#), [Verl et Frey, 2012](#)]. À Stuttgart, la société ISG, conseillée par A. Verl et G. Pritschow, commercialise la commande numérique ISG-kernel [[ISG GmbH, 2013](#)]. À Aachen, des simulations couplant

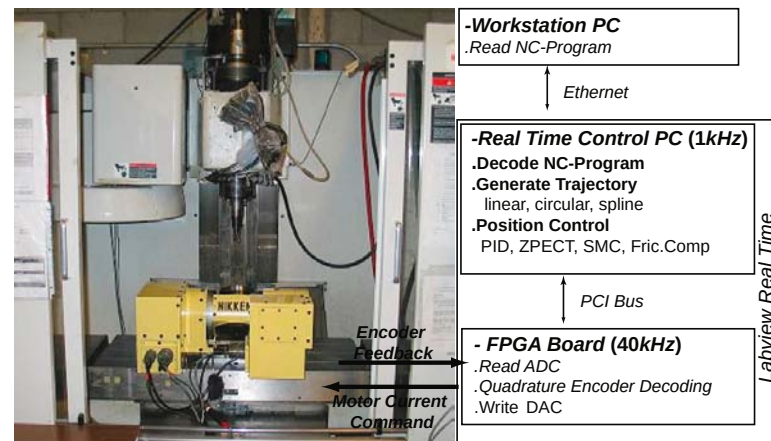


Figure 17 – Machine-outil 5 axes ouverte à Vancouver [Sencer *et al.*, 2008]

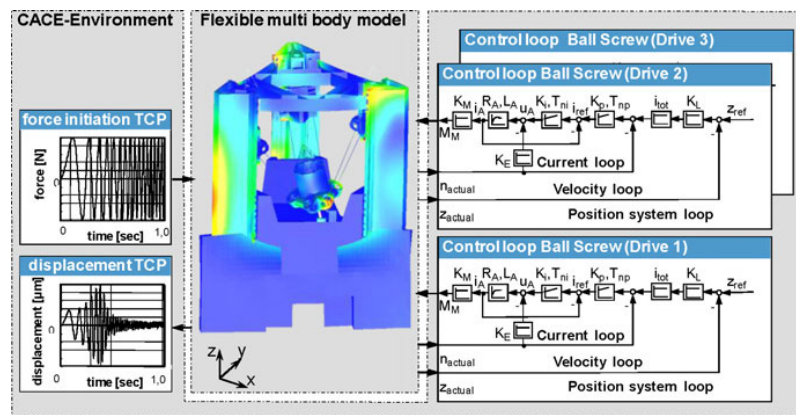


Figure 18 – Simulations intégrant les efforts de coupe, la structure machine et le contrôleur [Altintas *et al.*, 2011]

la commande numérique, la structure machine et le procédé sont réalisées, figure 18. Quelques informations sont fournies dans les papiers suivants [Altintas *et al.*, 2005] et [Altintas *et al.*, 2011].

À l'université Chung Cheng de Taiwan, le professeur M.-S. Tsai [Lin *et al.*, 2007, Tsai *et al.*, 2010, Tsai *et al.*, 2008] travaille sur les algorithmes internes de la commande numérique, mais les expérimentations sont menées sur du matériel didactique, figure 19.

Enfin, en Chine de nombreux travaux sont menés, mais ils sont difficilement identifiables.

Toutes ces actions industrielles et universitaires sont très intéressantes, mais jusqu'à présent, aucun travail autour de la commande numérique ouverte n'a eu pour objectif de contrôler finement la géométrie et la vitesse d'avance réelle dans des conditions d'usinage grande vitesse. Comme nous allons le voir ci-après, le projet PREMIUM-OpenCNC se focalise sur les briques fondamentales des algorithmes de la commande numérique sans trop se soucier du cadre et des formats d'échange de données, le but étant de contribuer aux nouvelles possibilités d'améliora-

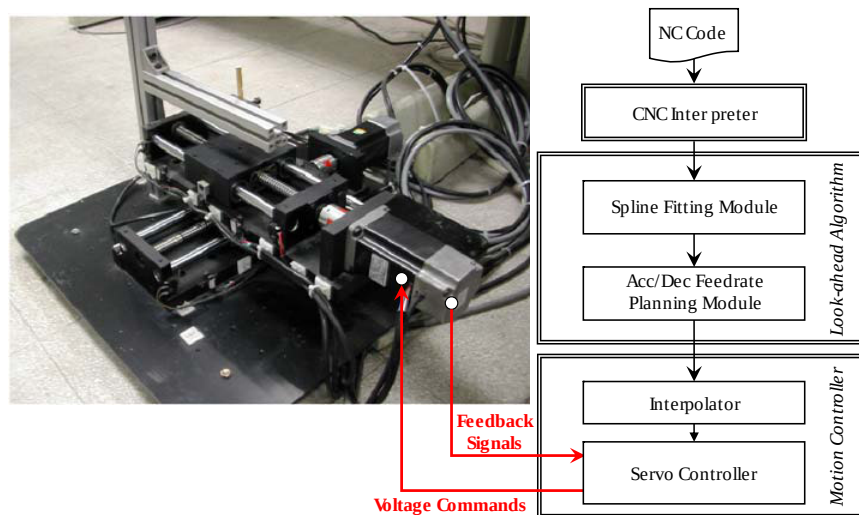


Figure 19 – Machine ouverte à Taiwan [Tsai *et al.*, 2010]

tion offertes par une chaîne numérique entièrement maîtrisée. Pour cela, il est nécessaire d’aller jusqu’à l’usinage dans des conditions classiques d’usinage grande vitesse pour faire face aux problèmes rencontrés industriellement. Ainsi, l’implémentation sur une vraie machine de production 5 axes fait toute la différence par rapport aux implémentations sur des petits moyens qui ne présentent pas des performances réalistes.

2.4 Le projet PREMIUM-OpenCNC

Le projet PREMIUM a pour but global de développer une Plateforme de REcherche Mutualisée pour l’Innovation en Usinage Multiaxes au sein du LURPA. Dans ce cadre, l’objectif du projet PREMIUM-OpenCNC est de maîtriser les briques de base (matérielles et logicielles) de la commande numérique pour optimiser la fabrication sur un centre d’usinage 5 axes grande vitesse. Cette commande numérique ouverte, rassemblant les intérêts communs du LURPA et du laboratoire d’automatique de Supélec, doit permettre de s’affranchir de la commande numérique industrielle pour le pilotage des axes machine. Des perspectives d’innovation importantes devraient être offertes par la maîtrise complète du passage entre le trajet FAO et les mouvements des axes physiques

Au niveau logiciel, il est légitime de se demander pourquoi la commande numérique ouverte EMC2 [LinuxCNC, 2013] n’a pas été utilisée pour ces travaux. Cette commande constitue une bonne base de développement qui intègre déjà de nombreuses fonctions. Cependant, sur les aspects concernant la géométrie des trajets et l’interpolation temporelle, les solutions fournies sont loin des standards actuels des commandes numériques industrielles (pas de format B-Spline pour la définition des trajets, pas de prise en compte du jerk pour l’interpolation 5 axes...). Ainsi,



Figure 20 – Photo de la machine Mikron UCP710 équipée de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC

pour traiter ces aspects nécessaires à l'usinage grande vitesse sur une machine 5 axes, il a été préférable d'utiliser une base Matlab — Simulink — dSPACE ; avec la volonté de développer des algorithmes d'un niveau de performance équivalent à ceux des commandes numériques industrielles.

Finalement, sur le moyen de production performant qu'est la machine Mikron UCP710 du LURPA (figure 20), l'objectif est de disposer soit de la commande numérique fermée Siemens 840D, soit de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC. Rares dans le monde sont les travaux sur la commande numérique ouverte qui sont effectués sur une «vraie» machine industrielle performante, qui plus est en 5 axes. En effet, le contrôle d'une machine 5 axes pousse le niveau d'exigence un cran au-dessus du pilotage des machines 3 axes. Il est particulièrement intéressant de faire les expérimentations sur une telle machine pour rencontrer et résoudre des problèmes réalistes. Finalement, le fait de disposer des deux modes de fonctionnement sur un même moyen expérimental peut permettre de faire des comparaisons réalistes entre les résultats standards et les apports scientifiques nouveaux.

Cette thèse aborde la commande numérique ouverte par le prisme de la trajectoire d'usinage. Sur le plan international, la bibliographie sur les actions industrielles et universitaires permet de montrer que les travaux effectués dans cette thèse sont pertinents par rapport à l'état de l'art. Les améliorations proposées dans cette thèse se font en partant de la FAO pour aller vers la

machine-outil en passant par commande numérique. Ces travaux pourront s'intégrer dans les développements sur la structuration de l'architecture des commandes ouvertes. Et ils sont tout à fait complémentaires avec les développements basés sur l'adaptation du procédé en fonction de mesures temps réel, qui eux, s'attachent à optimiser le processus en partant du procédé pour remonter vers la machine et la commande numérique. Enfin, la mise en œuvre d'une commande numérique sur une machine-outil d'usinage grande vitesse 5 axes constitue un réel atout pour la validation des travaux scientifiques.

3 La commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC

Des marges importantes d'amélioration du processus de fabrication des pièces usinées résident dans la maîtrise des algorithmes internes de la commande numérique qui passe par le développement d'une commande numérique ouverte. Pour commencer, le découplage entre les aspects géométriques et les aspects liés à la loi de mouvement est présenté. Ensuite, après une brève présentation de la stratégie adoptée pour passer d'un trajet programmé à la trajectoire à exécuter, les questions du contrôle temps réel et de l'architecture matérielle seront abordées. Enfin, on montrera que ces travaux sont généralisables à d'autres contextes que celui de l'usinage sur machine-outil 5 axes.

3.1 Traitement de la géométrie

Comme nous l'avons vu, la limitation du jerk de chaque axe est nécessaire pour les applications d'usinage grande vitesse. En reprenant la figure 5, on voit que les premières tâches à effectuer pour la commande numérique sont le traitement de la géométrie et l'interpolation temporelle. L'accélération des axes n'étant pas infinie il n'est pas possible d'interpoler un trajet discontinu en tangence. Dans un premier temps, il faut donc modifier la géométrie discontinue (G1) fournie par le postprocesseur. Ensuite, l'une des tâches principales de la commande numérique est de planifier la vitesse d'avance réelle qui respecte les contraintes cinématiques des axes.

On peut adopter plusieurs approches pour traiter ces deux tâches [[Pardo-Castellote et Cannon, 1996](#)] :

- *L'approche découplée.* Le problème global est découpé en un problème purement géométrique qui vise à obtenir la géométrie du trajet. Ensuite, sur cette géométrie parfaitement définie le problème d'interpolation temporelle est traité. Ainsi, il ne reste plus qu'à déterminer la loi de mouvement. C'est l'approche qui permet de complètement spécifier la géométrie de la trajectoire.
- *L'approche couplée.* Ici, les deux problèmes sont résolus en même temps. Le but est par exemple de trouver la trajectoire hors collision qui minimise la durée du mouvement.

C'est une approche qui est très utilisée en robotique dans les cas où seuls quelques points de passage sont importants. La géométrie et la loi de mouvement sont obtenues simultanément.

- *L'approche réactive ou hybride.* Avec cette méthode, la géométrie du trajet n'est pas connue explicitement. Elle découle par exemple de la position actuelle et des actions extérieures exercées par des champs de potentiels.

Pour l'usinage, l'approche découplée est privilégiée même si on peut rencontrer quelques situations où les autres approches sont bien adaptées. Par exemple, pour l'optimisation des déplacements hors matière [Pateloup, 2011] la trajectoire n'est pas vraiment importante. Cependant, dans le cas général de l'utilisation d'une machine-outil, le respect de la géométrie programmée est un élément très important. Ainsi pour le reste de la thèse l'approche découplée est utilisée. Avec cette approche, même si l'adaptation de la géométrie se fait en prenant en compte des contraintes cinématiques, ces deux tâches peuvent se faire de façon distincte.

On trouve de nombreux travaux sur l'arrondissement des discontinuités G1, cependant à notre connaissance aucune méthode ne permettait de traiter des discontinuités G1 en 5 axes. Ce manque ainsi que la nécessité d'avoir cette brique de base justifient les développements présentés dans le chapitre 2.

3.2 Interpolation temporelle de la vitesse d'avance

Avec l'approche découplée adoptée, la géométrie du trajet est complètement fixée lorsque la planification de la vitesse d'avance est effectuée. Le but de l'interpolation temporelle est donc de donner la loi de mouvement qui respecte les contraintes cinématiques sur une géométrie 5 axes. Là encore, l'utilisation d'une machine-outil 5 axes impose la gestion des axes de translation et de rotation, ce qui complique fortement le problème d'interpolation. Plusieurs approches ont été utilisées pour résoudre le problème d'interpolation temporelle, la méthode choisie basée sur la discrétisation et l'intersection des contraintes est très générale. Elle permettra la prise en compte d'autres contraintes liées, par exemple, à l'asservissement ou au procédé dans des travaux futurs.

On trouve de nombreux travaux sur l'interpolation temporelle, cependant à notre connaissance aucune méthode performante ne permettait de traiter le problème en limitant le jerk de chacun des 5 axes machine. Hors, nous avons vu précédemment que le jerk est un facteur primordial pour l'usinage grande vitesse. Ce manque ainsi que la nécessité d'avoir cette brique de base justifient les développements présentés dans le chapitre 3.

La question du temps de calcul et du temps réel est une question qui est souvent connectée aux algorithmes utilisés dans les commandes numériques. La définition de temps réel est «mode de traitement qui permet l'admission des données à un instant quelconque et l'obtention immédiate des résultats» [BBF, 1982]. L'asservissement est typiquement un traitement qui

doit être effectué en temps réel puisqu'il doit à tout instant corriger des perturbations physiques inattendues. Par contre, l'interpolation temporelle n'est pas contrainte par les problématiques de temps réel à proprement parler. En effet, une fois le programme d'usinage envoyé à la commande numérique, la géométrie du trajet est fixée ainsi que les contraintes cinématiques. Le résultat ne doit donc pas forcément être obtenu immédiatement puisqu'il est possible de calculer les consignes à l'avance.

Cependant, il existe une contrainte forte sur le temps d'exécution des algorithmes : il faut toujours que le calcul soit en avance par rapport à la trajectoire qui est physiquement en train de s'effectuer. Donc si l'usinage dure 1 h, un temps de calcul de 59 minutes est tout à fait acceptable, ce qui est tout de même relativement long. Plus la vitesse d'avance est élevée, plus le calculateur doit aller vite. Étant donné que le temps calcul nécessaire à l'interpolation temporelle n'est pas prévisible, la seule solution robuste consiste à se donner les moyens d'envoyer une consigne à chaque instant même si cette consigne n'est pas optimale. Ainsi, en cas de difficulté liée au temps de calcul, les consignes envoyées vont tendre à ralentir le mouvement physique et donc à laisser plus de temps au calculateur pour reprendre de l'avance sur le processus physique. Une stratégie intégrant ces considérations est présentée par [Erkorkmaz et Heng, 2008]. D'un autre côté, les algorithmes d'interpolation temporelle «temps réel» semblent s'imposer une contrainte inutile. En effet, le calcul temps réel, bien que non nécessaire, se paye généralement par la non-prise en compte des limitations d'accélération et de jerk [Yau *et al.*, 2006]. Dans ces travaux thèse, cette contrainte technique n'a pas spécialement été prise en compte, l'objectif était plutôt d'obtenir une interpolation temporelle performante dans un temps «raisonnable».

Les travaux récents sur le «Virtual Machining» et les besoins de simulation toujours plus poussés font peut-être évoluer cette question. En effet, un utilisateur peut vouloir simuler un usinage complet sur son poste de travail en intégrant une vraie commande numérique pour simuler des efforts et des vibrations par exemple. Ainsi, pour un confort utilisateur, il peut être nécessaire d'obtenir la vitesse d'avance réelle en quelques secondes même sur des usinages très longs... Cette considération sort également du cadre de cette thèse.

L'adaptation géométrique et l'interpolation temporelle sont les briques de base des algorithmes de la commande numérique. À la fin de ce processus, on obtient les consignes à envoyer à chacun des axes machines. Par la suite, il faut donc gérer le contrôle temps réel de la machine-outil.

3.3 Contrôle temps réel d'une machine-outil industrielle

Suite à l'interpolation temporelle, les consignes respectant les limites en vitesse, accélération et jerk des axes sont calculées. À partir de là, l'aspect physique entre vraiment en jeu. Les consignes doivent effectivement être envoyées aux moteurs et une structure d'asservissement doit être mise en place.

L'interpolation temporelle et l'asservissement sont deux éléments qui, contrairement à ce que l'on pourrait penser, sont intimement liés. En effet, les contraintes prises en compte lors de l'interpolation temporelle ont pour but de faciliter la tâche d'asservissement en intégrant dès la génération de trajectoire une modélisation de la machine. Par exemple, l'accélération maximum des axes est connue par avance, l'interpolation temporelle fait donc en sorte de ne pas demander une trajectoire physiquement irréalisable. D'un autre côté, l'asservissement peut anticiper les mouvements en connaissant les consignes futures comme on le verra dans le chapitre 4.

Un axe de machine-outil est typiquement piloté par une structure cascade avec 3 boucles d'asservissement imbriquées utilisant des capteurs de courant, de vitesse et de position. De plus, les consignes sont connues en avance et l'objectif est de minimiser l'écart de contour global et non chaque écart de poursuite. Ainsi, l'asservissement est effectué dans un contexte tout à fait particulier et le contrôle d'une machine-outil constitue un domaine à part entière de l'ingénierie des systèmes asservis.

Initialement, une structure d'asservissement cascade simple était utilisée. Cependant, un essai d'usinage a clairement montré que l'anticipation (feedforward) est essentielle pour contrôler un axe de machine-outil en usinage grande vitesse. Bien que l'optimisation de l'asservissement d'une machine-outil ne fasse pas partie de l'objectif de la thèse, l'étude et l'intégration de l'anticipation sont nécessaires. Ainsi, le chapitre 4 présentera les développements effectués au niveau de l'asservissement pour rendre notre commande numérique ouverte capable d'effectuer un usinage dans des conditions UGV.

3.4 Architecture matérielle de la commande numérique ouverte

Le pilotage d'une machine-outil 5 axes industrielle est une revendication technique importante de cette thèse. Ainsi, l'aspect matériel est très important même s'il n'est pas bien reconnu d'un point de vue scientifique.

Comme il a été dit précédemment, la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC utilise Matlab et Simulink pour tous les développements logiciels. Ainsi le passage du trajet programmé aux consignes des axes est entièrement maîtrisé. Pour ce qui est du contrôle temps réel, un calculateur modulaire dSPACE permet de piloter les variateurs des axes machine. Pour des raisons techniques liées à l'impossibilité d'utiliser le bus de communication propriétaire de Siemens, les variateurs numériques sont remplacés par des variateurs universels qui sont commandés par une entrée analogique. Les positions réelles sont directement lues sur les règles de mesure Heidenhain, ainsi l'asservissement en position des axes est entièrement maîtrisé.

L'intégration de la commande numérique ouverte sur la machine Mikron n'a pas été une tâche aisée. En effet, les développements se sont faits pas à pas pour rester dans des conditions de sécurité optimales. C'est un facteur important lorsque des développements de ce genre se font sur un vrai moyen industriel puissant et couteux. Ainsi de nombreux éléments de sécurité sont

intégrés dans le modèle Simulink de pilotage de la machine et sont reliés à l'arrêt d'urgence. En autres tâches à réaliser, il faut lire les règles de mesure, effectuer la prise d'origine, gérer les freins pour l'axe Z et les axes de rotation, faire les câblages dans l'armoire électrique, implémenter les différents modes de marche, un potentiomètre, une manivelle pour les déplacements manuels... Davantage d'informations sur l'implémentation sont fournies dans le chapitre 4.

Au final, on obtient une situation hybride où la commande numérique Siemens 840D gère la broche et tous les éléments liés à l'automate industriel programmable (sécurités, accessoires ...) et où le calculateur dSPACE gère le mouvement des axes. Ainsi, sur cette machine UGV 5 axes, l'essentiel de la commande numérique est maîtrisé tout en limitant les développements techniques fastidieux.

3.5 Domaines d'application des travaux

Ces travaux sont réalisés dans un contexte d'usinage sur machine-outil 5 axes. Par définition, le procédé d'usinage implique des contraintes fortes sur le suivi du trajet. D'autre part, comme nous l'avons vu, les vibrations sont particulièrement nuisibles en usinage et donc la limitation du jerk est également une contrainte forte. Les travaux sur l'adaptation de la géométrie et sur l'interpolation temporelle sont donc applicables aux contextes qui partagent ces contraintes.

L'adaptation géométrique est réalisée dans l'espace pièce, elle est donc indépendante de la structure articulée utilisée par la suite. De même, l'interpolation temporelle est généralisable à toutes les structures articulées pour lesquelles la transformation géométrique est connue.

Les travaux réalisés dans cette thèse sont donc également généralisables à certains domaines de la robotique pour lesquels le suivi du trajet est de première importance. C'est le cas pour les applications de soudage ou d'usinage avec des robots anthropomorphes [Olabi *et al.*, 2010].

Par contre, la majeure partie des travaux en robotique associés à ce domaine d'étude n'ont pas de contraintes strictes sur la géométrie de la trajectoire. Par exemple, [Gasparetto et Zanotto, 2008, Gasparetto et Zanotto, 2010] considèrent des contraintes de jerk, mais sur un trajet qui ne contient que quelques points de passage. On trouve également des contraintes de jerk dans des travaux de Broquère au LAAS de Toulouse [Broquère *et al.*, 2010] mais pour des applications de robotique de service qui, là encore, ne nécessitent pas de respect strict de la géométrie.

Enfin pour ce qui est de l'implémentation technique de la commande numérique ouverte sur une machine, les briques de base et les tâches à effectuer sont indépendantes des solutions matérielles utilisées. La maîtrise des matériels et des logiciels est importante et nécessite du temps, mais ces travaux auraient très bien pu être réalisés sur une commande numérique de robot anthropomorphe avec un calculateur temps réel quelconque.

4 Synthèse et problématiques

Pour conclure ce chapitre, une synthèse concernant les travaux autour de la commande numérique est effectuée ce qui permet de dégager les problématiques abordées dans ces travaux de thèse.

4.1 Synthèse

Ce premier chapitre de la thèse présente le contexte global des travaux qui est centré autour de la commande numérique et de ses interactions avec le reste du processus de fabrication. Les limitations associées aux commandes numériques industrielles poussent la communauté scientifique à travailler sur le développement de commandes numériques ouvertes pour maîtriser chacune des étapes du processus de fabrication. Ainsi des évolutions sont proposées à plusieurs niveaux que ce soit pour améliorer les échanges de données dans le processus de fabrication, pour améliorer le pilotage temps réel des machines ou pour optimiser l'interpolation des trajectoires.

Dans ce cadre, le développement de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC a pour but de contrôler le mouvement de l'outil par rapport à la pièce depuis la génération des trajets en FAO jusqu'au déplacement physique des axes machine pour améliorer l'interpolation des trajectoires complexes. Le pilotage des machines multiaxes et en particulier de la machine 5 axes du laboratoire nécessite de disposer de la transformation géométrique permettant de passer d'un trajet défini dans l'espace pièce aux trajets des axes de la machine. Cependant, dans le cadre de ces travaux, cet aspect n'est pas étudié et on supposera que la transformation géométrique est connue et que les problèmes associés à la gestion des singularités sont résolus pour tout type de machine. Par ailleurs, les choix effectués au niveau du découpage des tâches dans la commande numérique PREMIUM-OpenCNC permettent de proposer une architecture générique, mais qui n'est en aucun cas figée. En effet, l'optimisation du processus pourra passer par une prise en compte plus globale des liens entre le traitement de la géométrie, l'interpolation temporelle et le contrôle temps réel.

Finalement, cette thèse s'inscrit dans la suite logique des travaux du laboratoire. En effet, les travaux sur les trajets FAO [Duc, 1998, Tournier, 2001, Péchard, 2009], sur l'interpolation temporelle à jerk limité [Lavernhe, 2006] et sur les asservissements [Prévost, 2011] justifient pleinement les nouveaux développements sur la commande numérique ouverte. Suite à tous ces travaux, il était clair que la commande numérique constituait un point bloquant pour avancer davantage sur l'optimisation de la chaîne numérique. Les compétences acquises dans ce domaine lors des précédentes thèses au laboratoire permettent d'aborder ces travaux avec de solides bases scientifiques.

4.2 Problématiques

Actuellement, la commande numérique est le maillon le moins bien développé de la chaîne numérique. Au niveau national et international, de nombreux travaux s'orientent donc vers la création de commandes numériques ouvertes qui permettent de maîtriser l'ensemble des algorithmes internes ainsi que les flux d'informations qui sont à l'heure actuelle très limités.

L'objectif de la thèse est de développer les briques de base de la commande numérique pour permettre l'amélioration du processus de fabrication des pièces usinées. En effet, l'interpolation des trajectoires peut être optimisée, car la barrière du format de description des trajets est levée sur la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC.

Une vision globale des travaux est présentée sur la figure 21, le développement des algorithmes internes de la commande numérique et la mise en œuvre matérielle permettent de maîtriser l'ensemble du processus allant de la CFAO jusqu'à la fabrication. Ainsi, il est possible d'obtenir des gains de productivité et de qualité lors de l'usinage des surfaces complexes.

Dans le cadre de l'usinage grande vitesse sur une machine-outil 5 axes, cette thèse a pour but de résoudre les 3 problématiques présentées ci-après :

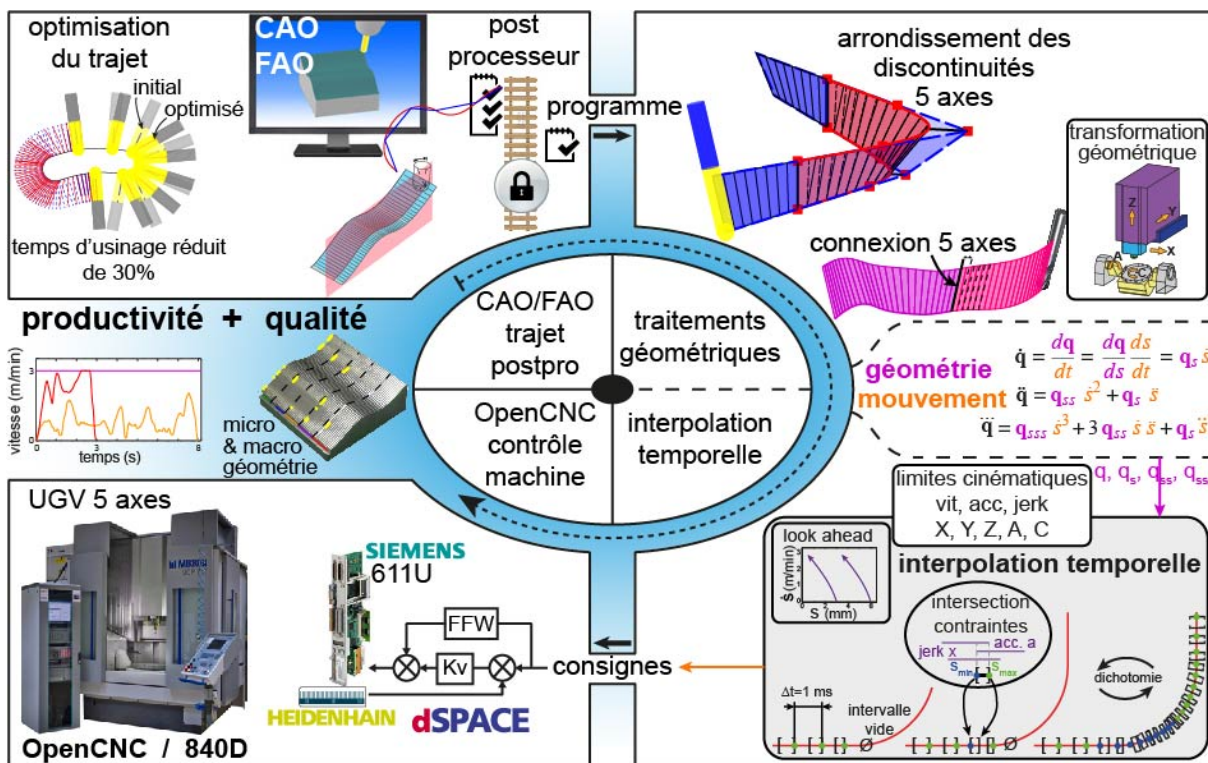


Figure 21 – Vue globale des travaux de thèse

► **Comment passer d'une géométrie et d'une vitesse d'avance programmée aux consignes envoyées aux axes machine ?**

Un rôle majeur de la commande numérique est de calculer la trajectoire interpolée à partir de la géométrie et de la vitesse programmée. Tout d'abord, suivant le format de description de la géométrie, il peut être nécessaire d'effectuer un traitement géométrique du trajet pour le rendre suffisamment continu. Ensuite, l'interpolation temporelle consiste à calculer les consignes échantillonnées pour chacun des axes en respectant les contraintes cinématiques de vitesse, accélération et jerk. Ces deux problèmes sont toujours d'actualité au vu des nombreux articles publiés, leur résolution pour des trajets 5 axes aboutie à la création de la trajectoire envoyée aux moteurs des axes machine et sera traitée dans les chapitres 2 et 3.

Une fois ce travail effectué, il est important d'expérimenter sur une machine-outil.

► **Comment passer du monde numérique à la réalisation physique sur une machine-outil industrielle ?**

Le projet PREMIUM-OpenCNC nous a donné la chance d'avoir les moyens de piloter une machine-outil 5 axes performante, ce qui est assez rare même au niveau international. Ce côté matériel oblige à avoir un niveau d'exigence élevé pour le développement de la structure d'asservissement et la mise en œuvre technique. Les revendications scientifiques associées à cette problématique sont moins fortes que pour le reste des travaux. Néanmoins, les développements techniques présentés dans le chapitre 4 sont en général peu, voire pas, diffusés dans la littérature et méritent donc d'être abordés dans ce manuscrit.

À partir de là, la commande numérique ouverte permet d'optimiser l'usinage grande vitesse.

► **Comment améliorer l'interpolation des trajectoires pour l'usinage des surfaces complexes ?**

Avec le développement de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC, l'interpolation de la trajectoire peut se faire directement à partir de la surface à usiner. En effet, puisque les contraintes associées aux formats de description classiques des trajets sont levées, les écarts géométriques introduits par la tolérance d'usinage FAO peuvent être supprimés. Par la même occasion, la fluidité des trajets est améliorée ce qui permet d'atteindre des vitesses d'avance plus élevées. On peut donc obtenir des gains de productivité et de qualité aussi bien au niveau macro-géométrique (effet peau d'orange et facettisation) qu'au niveau micro-géométrique (marques liées à la fluctuation de la vitesse d'avance). Peu d'articles traitent de ce sujet puisque les conditions nécessaires à la mise en œuvre de cette amélioration sont difficiles à réunir. La maîtrise complète de la chaîne numérique acquise grâce aux chapitres précédents permet de mettre en œuvre cette amélioration dans le chapitre 5.

Chapitre

2

Traitements géométriques dans la commande numérique

Ce second chapitre rentre dans le détail des algorithmes internes de la commande numérique en particulier pour le traitement géométrique des trajets d'usinage. On introduit le lien entre la géométrie du trajet et la vitesse d'avance réellement atteignable en fonction des contraintes cinématiques de la machine. Ainsi, l'analyse des équations fondamentales liant la géométrie au temps permet d'aborder le problème de l'arrondissement des discontinuités en tangence, notamment en 5 axes. La connexion de l'orientation entre deux trajets 5 axes étant particulièrement délicate, elle fait l'objet de développements spécifiques.

1 Introduction

Dans ces travaux de thèse, une approche découplée est utilisée pour l'interpolation : les tâches de traitement géométrique et d'interpolation temporelle sont réalisées de façon séparée comme nous l'avons vu dans la partie 3.1 du chapitre 1. Cependant, sachant que la géométrie du trajet a une influence majeure sur la vitesse d'avance atteignable, des éléments liés aux contraintes temporelles sont intégrés dans le lissage géométrique du trajet. Par exemple, la limitation du jerk a un impact sur le niveau de continuité attendu pour la géométrie lissée. En suivant le schéma de principe de la figure 22, le lissage ou l'arrondissement des trajets est effectué en amont de l'interpolation temporelle qui calcule les consignes envoyées aux axes machines. Schématiquement, la figure montre que si la géométrie est discontinue, il faut nécessairement une vitesse nulle au passage de la discontinuité (pointillés bleus). La géométrie lissée en rouge permet par contre d'avoir une vitesse d'avance bien plus élevée le long du trajet d'usinage. Les capacités cinématiques de la machine n'étant pas infinies, la vitesse d'avance programmée est souvent inatteignable lors des fortes variations géométriques, on a donc intérêt à limiter ces variations en lissant le trajet.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre d'introduction, le programme CN fournit une description géométrique du trajet d'usinage à la commande numérique. En 5 axes, ce trajet peut être défini soit dans l'espace pièce soit dans l'espace machine, ces deux espaces étant liés par les transformations géométriques directe et inverse, figure 23. Si le trajet décrit dans le pro-

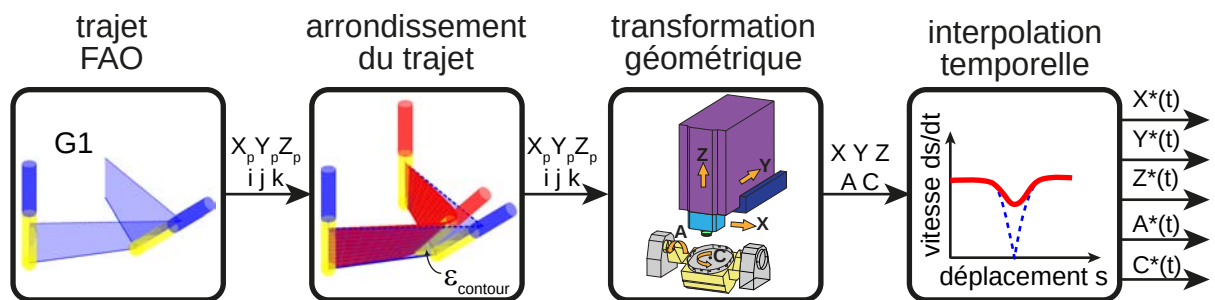


Figure 22 – Schéma de principe du passage d'un trajet FAO aux consignes temporelles envoyées aux axes machine

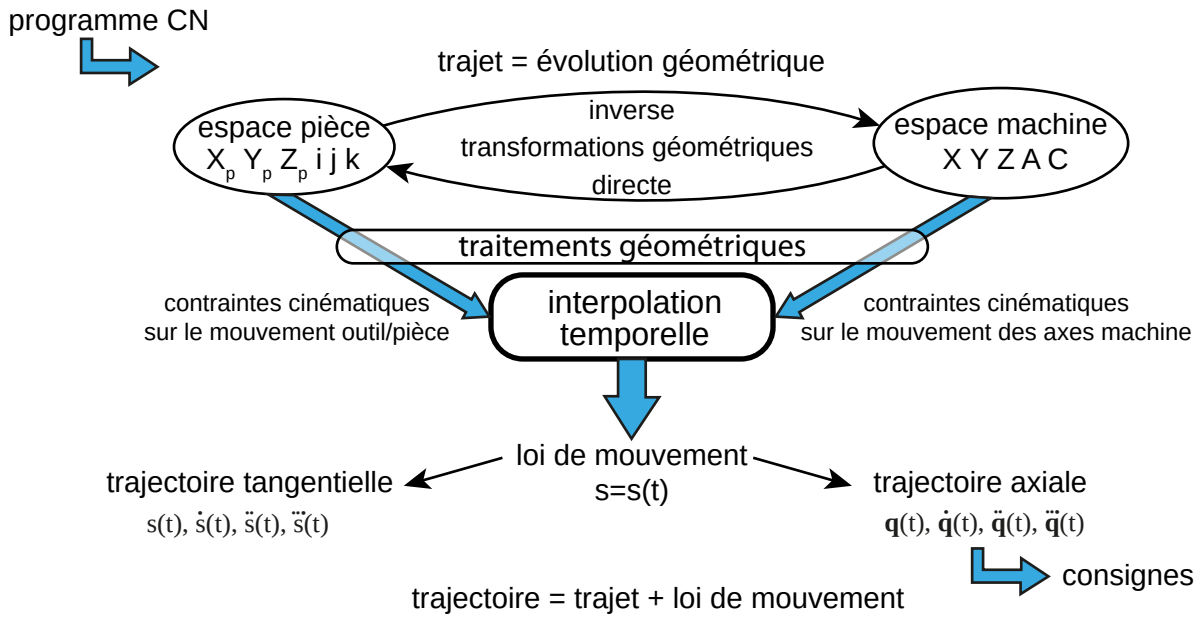


Figure 23 – Traitement de la géométrie et interpolation temporelle dans la commande numérique

gramme d'usinage n'est pas suffisamment continu, la première étape de traitement géométrique est effectuée pour éviter les passages à vitesse nulle et ainsi améliorer le processus d'usinage. Ensuite, en prenant en compte les contraintes cinématiques, l'interpolation temporelle permet de calculer une loi de mouvement qui donne l'évolution temporelle de l'outil le long du trajet. Suite à ces deux étapes principales, l'abscisse curviligne s du trajet outil/pièce est paramétrée en fonction du temps et on obtient la trajectoire qui définit en fonction du temps les mouvements des axes machine et de l'outil par rapport à la pièce. Pour l'usinage, les deux aspects sont importants : la vision dans l'espace pièce avec la trajectoire dite « tangentielle » est directement liée au procédé. La vision dans l'espace machine contraint l'évolution géométrique et cinématique de l'outil en fonction du moyen de production utilisé.

Le lien entre géométrie et loi de mouvement est essentiel dans cette thèse. En effet, les traitements géométriques présentés dans ce chapitre sont réalisés en tenant compte des contraintes cinématiques des axes. L'interpolation temporelle, qui sera étudiée dans le chapitre suivant, aura pour but de faire le lien entre la géométrie du trajet et la façon de le parcourir (loi de mouvement). Cependant, comme nous allons le voir, ces deux aspects sont mathématiquement liés.

2 Expression mathématique du lien entre la géométrie et la loi de mouvement

Cette partie introduit les équations fondamentales de la thèse. En effet, ces équations seront très utiles d'abord pour donner des indications sur le lissage de la géométrie du trajet d'usinage, puis pour déterminer la vitesse d'avance atteignable sur la machine d'usinage grande vitesse utilisée.

2.1 Équations fondamentales de la thèse

Un formalisme unifié pour les axes de translation et de rotation permet de faire le lien entre la géométrie et le temps. Le vecteur $\mathbf{q}$ contient l'ensemble des axes machine, $\mathbf{q} = [XYZAC]^T$ pour la cinématique de la machine Mikron. En utilisant la dérivation composée, on exprime la vitesse des axes $\dot{\mathbf{q}}$ en fonction d'éléments géométriques $\mathbf{q}_s$ multipliés par des éléments de la loi de mouvement $\dot{s}$, équation 2.1 ($\dot{s}$ représente la vitesse d'avance). Dans le reste du manuscrit, on fera bien la différence entre les vitesses, accélérations et jerks des axes (liés au mouvement articulaire de l'axe), et la vitesse, l'accélération et le jerk tangentiels. La vitesse d'avance (ou vitesse tangentielle) est la vitesse de l'outil par rapport à la pièce ; de même, l'accélération et le jerk tangentiels sont les dérivées temporelles deuxième et troisième du mouvement de l'outil par rapport à la pièce.

En utilisant ce formalisme, il est possible de découpler la loi de mouvement de la géométrie ce qui permettra par la suite de travailler séparément sur la géométrie du trajet et sur la vitesse d'avance. De plus, cette écriture est valide aussi bien pour les axes de translation que pour les axes de rotation. Il est donc possible de comparer les 5 axes de la machine-outil ce qui est un avantage important. L'accélération $\ddot{\mathbf{q}}$ et le jerk $\dddot{\mathbf{q}}$ des axes sont obtenus de la même façon en équations 2.2 et 2.3.

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{d\mathbf{q}}{ds} \frac{ds}{dt} = \mathbf{q}_s \dot{s} \quad (2.1)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{ss} \dot{s}^2 + \mathbf{q}_s \ddot{s} \quad (2.2)$$

$$\dddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{sss} \dot{s}^3 + 3\mathbf{q}_{ss} \dot{s} \ddot{s} + \mathbf{q}_s \dddot{s} \quad (2.3)$$

Le trajet de chaque axe machine est dérivé par rapport à l'abscisse curviligne s du trajet outil/pièce, on appellera dérivées géométriques les termes $\mathbf{q}_s$, $\mathbf{q}_{ss}$, $\mathbf{q}_{sss}$. Pour une architecture machine donnée, ces dérivées géométriques sont connues dès lors que le trajet d'usinage est défini.

Avec ces équations, on peut d'ores et déjà comprendre la nécessité de lisser les disconti-

nuités issues de la discrétisation G1 des trajets. En effet, un trajet discontinu en tangence aura une dérivée géométrique seconde $\mathbf{q}_{ss}$ infinie sur la discontinuité. Donc d'après l'équation 2.2, si l'axe n'a pas une accélération infinie il faudra absolument que la vitesse d'avance $\dot{s}$ soit nulle. De même pour une discontinuité en courbure entre un segment et un arc de cercle par exemple, la dérivée géométrique troisième $\mathbf{q}_{sss}$ est localement infinie. Si le jerk des axes est limité, l'équation 2.3 implique que la vitesse d'avance $\dot{s}$ doit être nulle pour annuler le terme $\mathbf{q}_{sss} \dot{s}^3$.

Lorsque les segments successifs présentent un angle très ouvert, une faible modification géométrique du trajet permet d'avoir un trajet continu et donc de passer à une vitesse très élevée. Évidemment pour le passage d'un angle droit, la vitesse est nécessairement très basse, mais les arrêts complets de l'avance étant problématiques en usinage il est toujours avantageux de lisser le trajet pour éviter les passages à vitesse nulle.

Il est intéressant de faire un point sur le niveau de continuité requis pour interpoler un trajet à vitesse non nulle. De nombreuses publications sur le lissage s'intéressent à la continuité paramétrique $\mathcal{C}^n$ ou à la continuité géométrique $\mathcal{G}^n$. Tout d'abord, la continuité géométrique $\mathcal{G}^n$ entre deux courbes $f(u)$ et $g(u)$ existe s'il existe un coefficient $k > 0$ tel que $f^{(n)}(u) = k \cdot g^{(n)}(u)$. La continuité paramétrique $\mathcal{C}^n$ existe si $k = 1$. Cependant, deux courbes de continuité géométrique $\mathcal{G}^n$ peuvent être reparamétrées pour avoir la continuité paramétrique $\mathcal{C}^n$ [Barsky et Deroose, 1989]. Or une courbe reparamétrée est géométriquement identique à la courbe originale, donc la continuité géométrique suffit pour les trajets d'usinage puisque seule la géométrie compte. Ensuite, les contraintes cinématiques sont sur les axes machine et le vecteur $\mathbf{q}$ représente bien le trajet des axes machine. Donc, pour pouvoir interpoler temporellement un trajet d'usinage à vitesse non nulle avec un jerk limité, il faut que les dérivées géométriques premières, deuxièmes et troisièmes ne soient pas infinies. Pour les trajets 3 axes, cette condition est équivalente à la continuité géométrique $\mathcal{G}^2$ du trajet dans l'espace pièce. Par contre, pour les trajets 5 axes, il n'existe pas de condition similaire sur la continuité du trajet pour exprimer le besoin. Pour rester général, on pourra donc dire que les dérivées géométriques $\mathbf{q}_s$, $\mathbf{q}_{ss}$ et $\mathbf{q}_{sss}$ ne doivent pas être infinies plutôt que de parler de continuité géométrie $\mathcal{G}^2$.

Le formalisme utilisé dans l'équation 2.1 atteint sa limite lorsque l'abscisse curviligne s du trajet n'est pas définie. C'est le cas lorsqu'il y a un mouvement des axes machine qui ne modifie pas la position du point piloté dans l'espace pièce (changement de solution articulaire en 5 axes par exemple). Dans ce cas, la vitesse d'avance est nulle et il faut donc utiliser un autre formalisme, comme l'inverse du temps par exemple [Lavernhe, 2006], pour exprimer les contraintes cinématiques des axes.

2.2 Expression mathématique des contraintes cinématiques

Comme nous l'avons vu précédemment, chaque axe a ses propres limitations en vitesse, accélération et jerk. L'équation 2.4 présente de façon détaillée les contraintes liées aux vitesses maximales des axes pour la machine 5 axes du LURPA. Pour chaque position le long de la trajectoire, les deux inéquations doivent être respectées pour ne pas dépasser les limites en vitesse des axes.

$$-\begin{bmatrix} V_{max}^x \\ V_{max}^y \\ V_{max}^z \\ V_{max}^a \\ V_{max}^c \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{A} \\ \dot{C} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{max}^x \\ V_{max}^y \\ V_{max}^z \\ V_{max}^a \\ V_{max}^c \end{bmatrix} \Leftrightarrow |\dot{\mathbf{q}}| \leq \mathbf{V}_{\max} \quad (2.4)$$

Classiquement, les contraintes ne dépendent pas du sens du mouvement (même pour les axes soumis à la pesanteur) donc les équations sont symétriques. On obtient de la même manière, les équations contraignant l'accélération et le jerk des axes machine, équation 2.5.

$$|\dot{\mathbf{q}}| \leq \mathbf{V}_{\max} ; |\ddot{\mathbf{q}}| \leq \mathbf{A}_{\max} ; |\dddot{\mathbf{q}}| \leq \mathbf{J}_{\max} \quad (2.5)$$

À ces contraintes cinématiques sur les axes machine, on rajoute également des contraintes sur le mouvement tangentiel (outil/pièce). La vitesse d'avance, l'accélération et le jerk tangentiels sont donc également limités par l'équation 2.6. On peut remarquer que sur la machine Mikron du laboratoire les paramètres d'accélération et de jerk tangentiels sont réglés très haut et ne sont donc jamais limitants, Cf. : tableau 1 de la partie 4 du chapitre 3.

$$0 \leq \dot{s} \leq F_{pr} ; |\ddot{s}| \leq A_{max}^{tan} ; |\dddot{s}| \leq J_{max}^{tan} \quad (2.6)$$

2.3 Approximation de la limite supérieure de la vitesse d'avance

Comme nous le verrons dans le chapitre 3, l'interpolation temporelle est un processus complexe. Cependant, il est possible d'obtenir très rapidement une approximation de la limite supérieure de la vitesse d'avance à partir de la géométrie du trajet et des contraintes de vitesse, d'accélération et de jerk des axes. Par exemple, en combinant la première inéquation de l'équation 2.5 sur les limites en vitesse des axes avec l'équation 2.1, on a :

$$|\dot{\mathbf{q}}| \leq \mathbf{V}_{\max} \Leftrightarrow |\mathbf{q}_s \dot{s}| \leq \mathbf{V}_{\max} \quad (2.7)$$

Comme $\dot{s}$ est toujours positif, on obtient directement la vitesse d'avance maximale atteignable en considérant les contraintes de vitesse des axes, équation 2.8. L'indice i étant utilisé

pour désigner les axes machine.

$$\dot{s} \leq \min_{i=1..5} \left(\frac{V_{max}^i}{|q_s^i|} \right) \quad (2.8)$$

Pour les autres inéquations, la situation se complique. En effet, dans les équations 2.2 et 2.3, la vitesse d'avance, l'accélération tangentielle et le jerk tangentiel sont liés : $\dot{s} = \frac{ds}{dt}$, $\ddot{s} = \frac{d\dot{s}}{dt}$. Il est toutefois possible d'obtenir une approximation intéressante de la vitesse d'avance maximale atteignable. En effet, les zones les plus intéressantes sont celles où la vitesse d'avance chute. Lors d'une chute de vitesse, la vitesse d'avance décroît jusqu'à un minimum puis elle réaugmente. Ainsi quand le minimum de vitesse est atteint, l'accélération tangentielle $\ddot{s}$ est nulle. Dans ces zones $\dot{s} = 0$ donc l'équation 2.2 peut être simplifiée comme suit : $\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{ss} \dot{s}^2$. Avec cette simplification, on obtient une limite supérieure approximée de la vitesse d'avance qui donne une bonne image des ralentissements causés par les contraintes d'accélération des axes, équation 2.9.

$$\dot{s} \leq \min_{i=1..5} \left(\sqrt{\frac{A_{max}^i}{|q_{ss}^i|}} \right) \quad (2.9)$$

Pour simplifier l'équation 2.3, le même type de raisonnement peut être utilisé concernant l'accélération tangentielle. Ensuite, l'ordre de grandeur des dérivées géométriques premières $\mathbf{q}_s$ est largement inférieur à celui des dérivées géométriques troisièmes $\mathbf{q}_{sss}$ dans les zones où la géométrie varie fortement. Ainsi le dernier terme de l'équation 2.3 contenant le jerk tangentiel est négligeable vis-à-vis du premier. Donc avec $\ddot{s} = 0$ et $\ddot{\mathbf{q}} = 0$, on obtient l'équation simplifiée suivante $\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{sss} \dot{s}^3$. Ainsi, une approximation de la limite supérieure de la vitesse d'avance due aux contraintes de jerk des axes est obtenue en équation 2.10.

$$\dot{s} \leq \min_{i=1..5} \left(\sqrt[3]{\frac{J_{max}^i}{|q_{sss}^i|}} \right) \quad (2.10)$$

D'autre part, la vitesse d'avance est évidemment limitée par la vitesse d'avance programmée F_{pr} . Finalement, il est possible d'obtenir une approximation de la limite supérieure de la vitesse d'avance tout au long du trajet avec l'équation 2.11. Cette limite donne des informations tout à fait pertinentes sur l'évolution de la vitesse d'avance réelle. De plus, elle est obtenue sans aucune itération et son évaluation est très rapide.

$$\dot{s} \leq \min_{i=1..5} \left(F_{pr}, \frac{V_{max}^i}{|q_s^i|}, \sqrt{\frac{A_{max}^i}{|q_{ss}^i|}}, \sqrt[3]{\frac{J_{max}^i}{|q_{sss}^i|}} \right) \quad (2.11)$$

Il est important de noter que cette limite supérieure est une approximation de la vitesse d'avance maximale atteignable. Cela signifie que la vitesse d'avance réelle peut occasionnellement dépasser cette limite tout en respectant toutes les contraintes énoncées sur les axes.

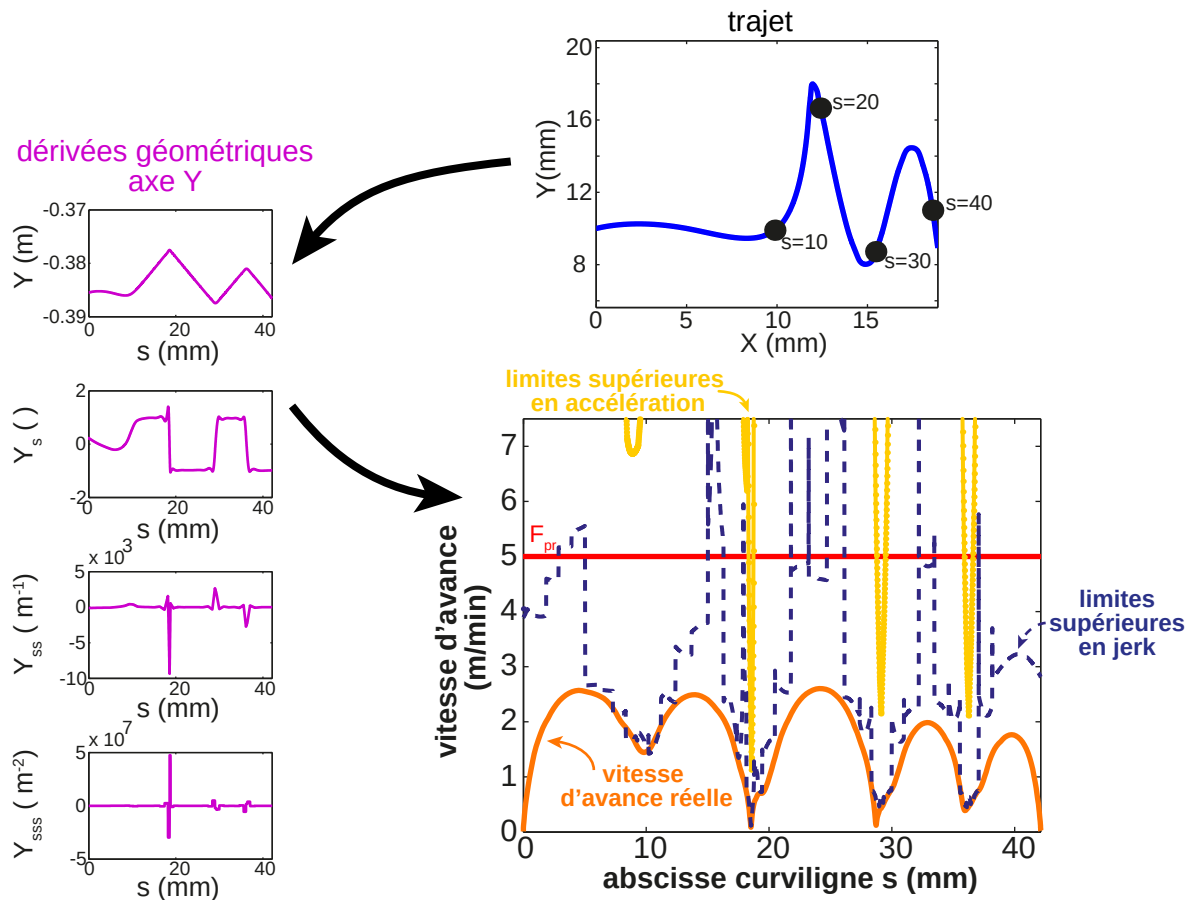


Figure 24 – Exemple en 2D des informations fournies par la limite supérieure du profil de vitesse

Dans l'équation 2.11, le lien entre deux positions successives le long du trajet est perdu puisque les termes en $\ddot{s}$ et $\ddot{\ddot{s}}$ ont disparu. On sait donc qu'il ne va être possible de suivre cette limite que dans les zones où les approximations sont valides, c'est-à-dire dans les zones de ralentissement. Mais, en pratique, cette limite donne une très bonne indication sur la vitesse d'avance réelle ainsi que sur les facteurs limitants comme nous allons le voir sur un exemple simple.

2.4 Exemple d'utilisation de la limite supérieure de la vitesse d'avance

La figure 24 présente les limites supérieures de la vitesse d'avance sur un trajet simple en deux dimensions. Les valeurs des limites cinématiques utilisées sont celles de la Mikron. Le trajet est défini par une courbe B-Spline suffisamment continue qui ne nécessite donc aucune modification géométrique. La première étape consiste à calculer les dérivées géométriques premières, deuxièmes et troisièmes pour chaque axe. Les résultats pour l'axe Y sont fournis sur la gauche de la figure. À partir de là, en utilisant les équations 2.8 à 2.10 les limites supérieures de la vitesse d'avance sont représentées en fonction de l'abscisse curviligne s . Sur cet exemple,

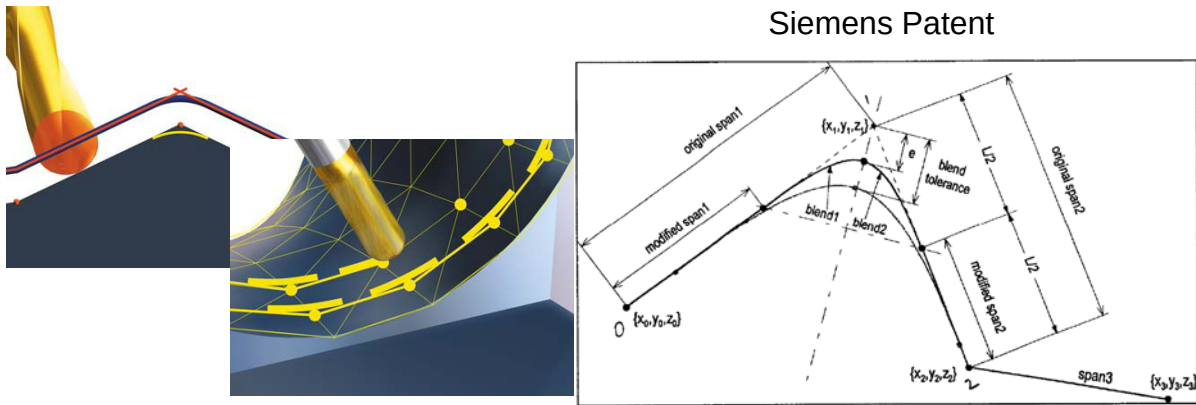


Figure 25 – Arrondissement des discontinuités en 3 axes [Siemens, 2009, Yutkowitz et Chester, 2005]

les limites maximales en vitesse des axes sont très élevées et n'apparaissent donc pas sur le graphique. Par contre, on retrouve bien des pics sur la limite en accélération qui correspondent aux zones à forte courbure. On voit également que sur ce trajet, le jerk est le paramètre le plus limitant. Finalement, quand on regarde le profil de vitesse d'avance réelle atteignable le long du trajet, on remarque qu'effectivement la limite supérieure prédit très bien les ralentissements.

La limite supérieure de la vitesse d'avance peut être très utile pour faire du lissage. En effet, avec une évaluation très rapide, il est possible de connaître les zones de ralentissement ainsi que la cause du ralentissement.

Comme nous l'avons vu en introduction, il est parfois nécessaire de lisser la géométrie programmée avant d'effectuer l'interpolation temporelle. Après une étude bibliographique des différentes techniques de lissage, on verra comment les discontinuités en tangence des trajets G1 5 axes peuvent être arrondies.

3 Bibliographie sur le lissage géométrique

Même si des formats de description polynomiaux ou B-Spline ont été introduits dans les commandes numériques industrielles, la plupart des trajets d'usinage sont encore définis par des déplacements linéaires (blocs G1 du programme d'usinage). En effet, c'est le moyen de programmation le plus facile à mettre en œuvre d'un point de vue FAO et l'utilisation des formats polynomiaux reste difficile industriellement. Cependant, cette description G1 génère des discontinuités en tangence à chaque transition entre blocs. Étant donné les limitations en accélération et jerk des axes machine, l'unique solution pour éviter un arrêt complet de la machine à chaque transition est de lisser la géométrie pour obtenir un trajet continu. Cela signifie que la commande numérique doit modifier le trajet programmé en utilisant les tolérances définies à cet effet comme le montre la figure 25.

Comme nous l'avons vu précédemment, le traitement géométrique du trajet et l'interpolation

	3 axes	5 axes	
		espace machine	espace pièce
lissage global	[Bouard et al. 2011] approximation spline	[Castagnetti et al. 2008] [Lavernhe et al. 2008]  compresseur Siemens	[Fleisig et al. 2001] [Ho et al. 2003] [Langeron et al. 2004]  [Pechard et al. 2009] 
arrondissement local	[Yutkowitz et Chester 2005] (Brevet Siemens) [Erkorkmaz et al. 2006] [Pateloup et al. 2010] [Pessoles et al. 2010] [Bi et al. 2012]	[Beudaert et al. 2011] 	

 travaux précédents du LURPA
 développements nouveaux de la thèse

Figure 26 – Tableau récapitulatif de la littérature sur le lissage des trajets 3 et 5 axes

temporelle sont étroitement liés. En utilisant l'approche découplée présentée dans la partie 3.1 du chapitre 1, l'objectif de ce chapitre est tout d'abord d'obtenir une géométrie lisse qui sera ensuite interpolée temporellement dans le chapitre 3.

Suivant le contexte, le lissage de la géométrie peut se faire en utilisant une méthode de lissage global ou une méthode d'arrondissement local. Si une portion de trajet est composée de nombreux petits segments très denses, il est préférable d'approximer tous ces segments par une courbe globale. D'un autre côté, si le trajet est composé de longs segments, il est important de suivre précisément ces segments et donc chaque transition doit être arrondie localement. Ce chapitre se concentre plus particulièrement sur cette dernière situation qui nécessite un arrondissement local du trajet avec un contrôle précis de la géométrie dans l'espace pièce. Cette problématique a été largement étudiée pour des trajets 3 axes, mais l'extension aux trajets 5 axes reste une question ouverte. Dans l'étude bibliographique, on séparera les techniques de lissage global des techniques d'arrondissement local ; la figure 26 récapitule les différents travaux de la littérature et met en valeur le domaine d'étude de ce chapitre.

3.1 Lissage global

Le lissage global a été étudié en 3 axes où la principale difficulté réside dans le respect de la tolérance de contour tout au long du trajet. On trouve par exemple les algorithmes de type « compactage » chez Fanuc [Otsuki *et al.*, 2004] ou chez Siemens (compcad) [Siemens, 2009] (figure 7). L'article de [Bouard *et al.*, 2011] propose également une optimisation globale de la géométrie du trajet en respectant les contraintes sur l'écart de contour. Ces algorithmes de compactage nécessitant une approche très mathématique méritent d'être étudiés davantage, mais l'intérêt ne s'est pas porté sur cette question lors de cette thèse.

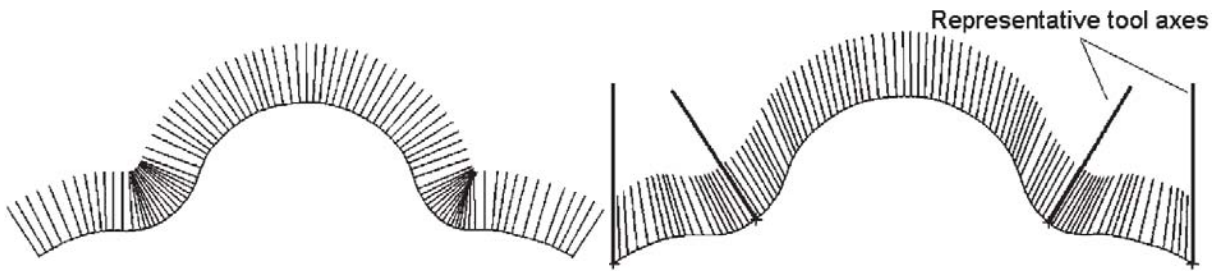


Figure 27 – Lissage global 5 axes par interpolation des quaternions [Ho *et al.*, 2003]

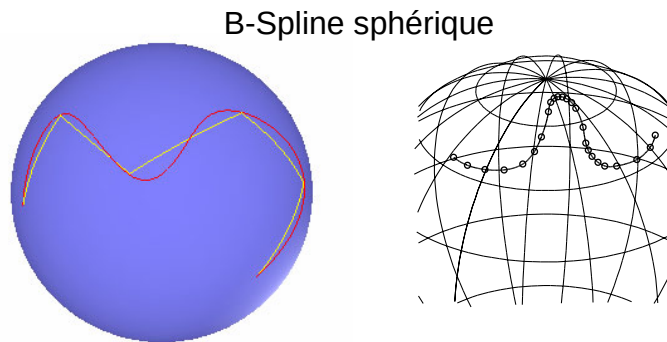


Figure 28 – Utilisation des B-Splines sphériques pour le lissage de l'orientation [Ge *et al.*, 2007, Fleisig et Spence, 2001]

En 5 axes, le lissage global a aussi été largement étudié. Différentes solutions peuvent être utilisées pour le lissage de l'orientation. Des méthodes utilisant les quaternions sont présentées dans [Shoemake, 1985] et [Ho *et al.*, 2003]. Ce lissage permet de réorienter l'axe outil pour éviter des changements brusques d'orientation, figure 27. Des méthodes utilisant les B-Splines sphériques sont présentées dans [Fleisig et Spence, 2001] et [Ge *et al.*, 2007], figure 28. Les B-Splines sphériques sont des courbes mathématiquement définies pour appartenir à la sphère unité. Ainsi, en représentant les orientations outils sur la sphère unité, il est possible de bénéficier des propriétés de continuité et de lissage des B-Splines pour lisser l'orientation. Cependant, leur utilisation est difficile car le formalisme mathématique nécessaire à la définition de ces B-Splines sphériques est beaucoup plus complexe que celui des B-Splines standards. D'autre part, la sphère unité est bien appropriée pour faire du lissage, mais ne permet pas un contrôle fin de l'effet du lissage sur la géométrie de la pièce. Un autre élément important est d'éviter de faire osciller l'axe outil le long du trajet ce qui n'est pas garanti par ces méthodes.

Enfin, le mouvement des axes machine est lissé par [Lavernhe *et al.*, 2008, Castagnetti *et al.*, 2008, Beudaert *et al.*, 2011]. Ces méthodes basées sur le lissage des axes machine ont aussi l'inconvénient de rendre difficile le contrôle de la géométrie dans l'espace pièce. Pour répondre à ce problème, [Castagnetti, 2008] propose d'utiliser un domaine d'orientation admissible (DOA) défini dans l'espace pièce. Ce domaine permet d'exprimer les degrés de liberté autorisés pour

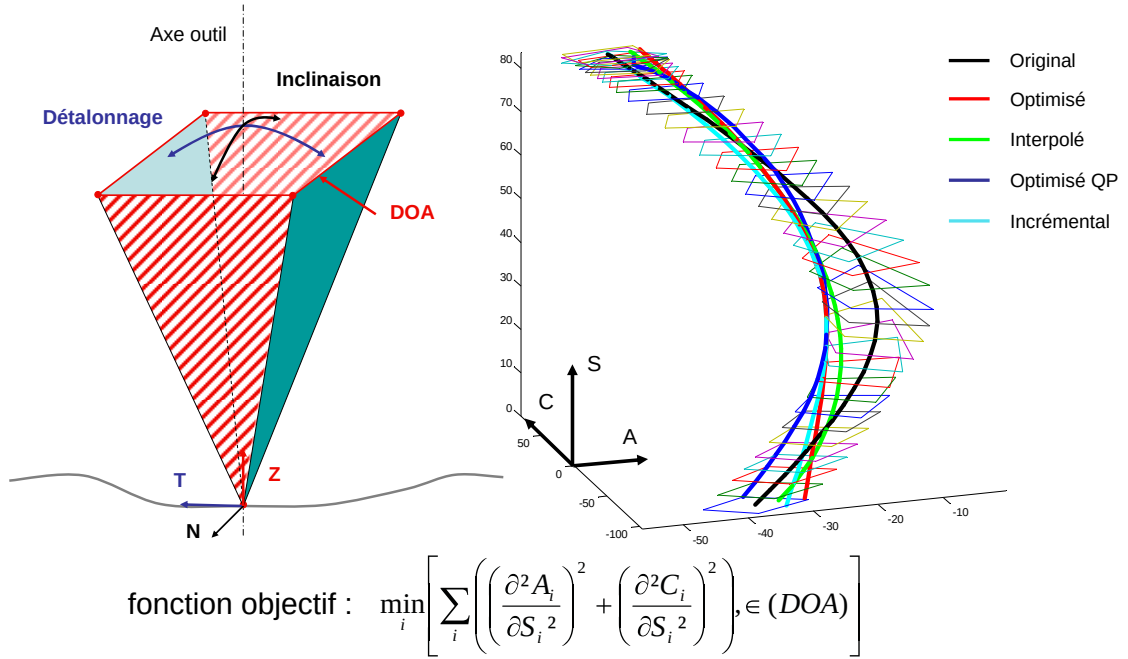


Figure 29 – Domaine d’orientation admissible et lissage des axes rotatifs [Castagnetti, 2008]

effectuer le lissage de l’orientation et il est ensuite traduit en contrainte sur les axes de rotation machine, figure 29. Une fois les contraintes spécifiées, l’orientation peut être optimisée, mais le choix du critère d’optimisation reste une question majeure. La fonction objectif à minimiser est basée sur une somme des dérivées secondes des axes rotatifs par rapport à l’abscisse curviligne. Ce critère est empirique alors que, lorsque l’optimisation se fait dans l’espace machine, les contraintes cinématiques sur les axes machines sont connues. Dans [Beudaert *et al.*, 2011], ces contraintes cinématiques sont prises en compte grâce à la limite supérieure de la vitesse d’avance vue en 2.3. Une méthode de lissage itérative permet d’optimiser les trajets 5 axes en augmentant la vitesse d’avance maximale atteignable dans les zones de ralentissements. Comme on le voit sur la figure 30, cette méthode est utilisée pour optimiser l’orientation outil, mais elle a également été appliquée à l’optimisation complète (position + orientation) d’un trajet d’usinage sur le flanc. Cependant, même si dans ce cas une vérification par une méthode Z-buffer permet de garantir le respect d’une tolérance géométrique sur la pièce, cette méthode de lissage ne permet pas de maîtriser finement la géométrie résultante dans l’espèce pièce.

Les solutions basées sur la modification du trajet dans l’espace machine [Beudaert *et al.*, 2011, Lavernhe *et al.*, 2008, Castagnetti *et al.*, 2008] ont deux inconvénients principaux. Premièrement, il est très difficile de contrôler la modification géométrique dans l’espace pièce issue d’une modification articulaire. Deuxièmement, ces solutions nécessitent de connaître la transformation géométrique donc les modifications géométriques sont dépendantes de la machine-outil utilisée. C’est pourquoi les solutions applicables directement dans l’espace pièce sont préférées.

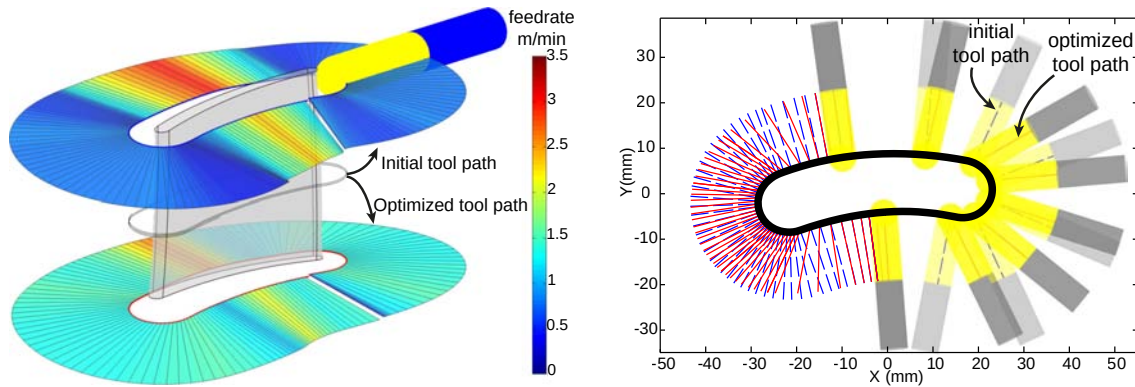


Figure 30 – Lissage de l'orientation en utilisant la limite supérieure du profil de vitesse [Beudaert *et al.*, 2011]

Dans l'interpolation d'une courbe, le mouvement du vecteur d'orientation est décrit par la trajectoire de la pointe d'outil (courbe spline ①) et par la trajectoire d'un second point sur l'outil (courbe spline ②).

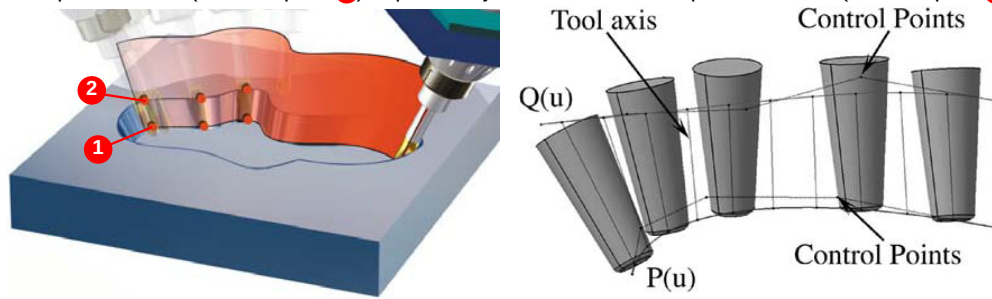


Figure 31 – B-Spline native 5 axes [Siemens, 2009] et [Langeron *et al.*, 2004]

Une dernière méthode pour lisser l'orientation consiste à utiliser une représentation des trajets 5 axes construite sur deux courbes. C'est la méthode qui sera retenue par la suite car elle permet de contrôler précisément la géométrie pièce. La courbe du bas définit le lieu des positions du bout d'outil, la courbe du haut définit le lieu des positions d'un autre point appartenant à l'axe outil, figure 31. Ce format permet de définir le trajet 5 axes en donnant la position des points de contrôle des courbes du haut et du bas. [Pechard *et al.*, 2009] utilisent ce format de description des trajets pour optimiser l'usinage sur le flanc de surfaces réglées non développables, figure 32. L'optimisation résulte d'un compromis entre la minimisation des écarts géométriques et la maximisation de la fluidité du trajet. En effet, l'usinage de ces surfaces en flanc implique nécessairement des zones d'overcut et d'undercut. L'approche visant à simplement minimiser les écarts génère un trajet saccadé avec des oscillations qui sont néfastes à la fois pour la productivité et pour l'aspect de la surface usinée. En introduisant le critère de fluidité basé sur l'énergie de déformation de la surface d'usinage, un trajet beaucoup plus lisse peut être obtenu tout en contrôlant les écarts géométriques. Une fois encore, ce critère espace pièce est construit de façon empirique. Un autre critère plus proche des contraintes qui limitent la vitesse d'avance sera présenté dans la partie 5.1.

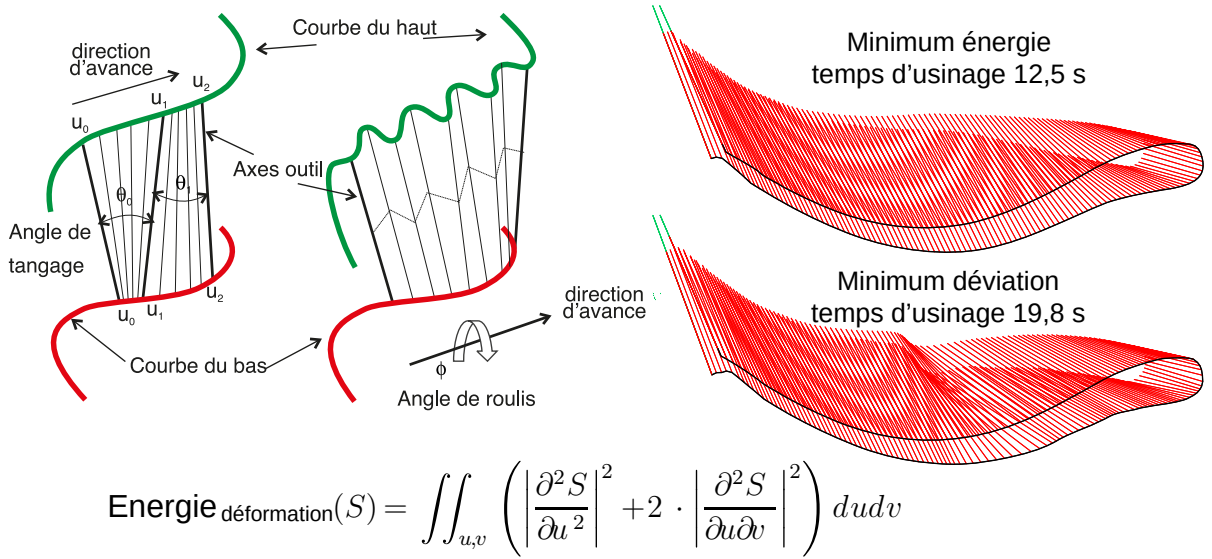


Figure 32 – Intégration d'un critère de fluidité pour l'usinage sur le flanc [Péchar, 2009]

Toutes ces techniques de lissage global ne peuvent pas être appliquées à l'arrondissement local des trajets, car plusieurs exigences ne peuvent être satisfaites. Premièrement, les modifications du contour et de l'orientation doivent être contrôlées localement et précisément pour éviter les oscillations du trajet. Deuxièmement, la courbe d'arrondissement doit être connectée au trajet initial et cette contrainte n'est pas traitée avec les approches globales. Ainsi, les travaux présentés dans ce chapitre ont pour but d'apporter deux nouvelles contributions. L'une sur l'arrondissement local des trajets 5 axes, l'autre sur la gestion de la connexion de l'orientation entre deux trajets quelconques définis dans un formalisme B-Spline.

3.2 Arrondissement local

L'arrondissement local a été très largement étudié en 3 axes et différentes méthodes qui donnent des résultats similaires sont proposées dans la littérature, figure 33. Elles donnent des courbes d'arrondissement satisfaisant les conditions sur l'écart de contour et sur le raccordement avec les portions linéaires adjacentes. En effet, une continuité $\mathcal{G}^2$ est nécessaire pour permettre l'interpolation temporelle à jerk limité sans passage à vitesse nulle. [Dugas, 2002] propose d'arrondir les discontinuités avec un arc de cercle tangent aux segments ce qui n'est évidemment pas approprié pour l'interpolation temporelle à jerk limité puisque la continuité n'est que $\mathcal{G}^1$. Cependant, ce modèle permet de bien prédire la vitesse de passage dans la discontinuité. En effet, un brevet de Siemens [Yutkowitz et Chester, 2005] (figure 25) décrit une méthode d'arrondissement des discontinuités en 3 axes basée sur deux courbes polynomiales de degré 4 et une condition de courbure au milieu de la discontinuité est basée sur le cercle tangent. Ceci explique pourquoi la vitesse estimée à l'aide du modèle circulaire est proche de la vitesse mesurée sur les

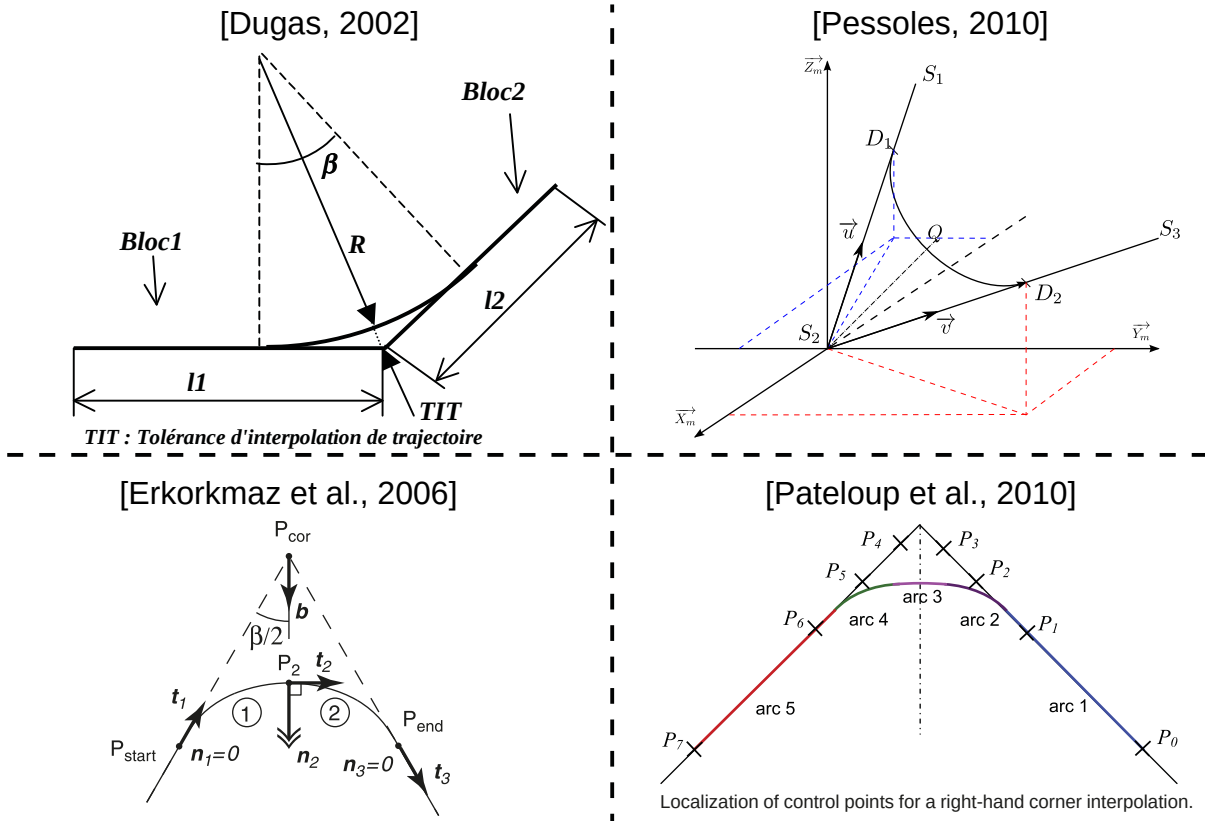


Figure 33 – Différentes méthodes d'arrondissement des trajets 3 axes

commandes numériques Siemens 840D. Une approche couplée est utilisée par [Pessoles, 2010] pour arrondir des trajets 3 axes, une courbe polynomiale de degré 5 paramétrée en fonction du temps permet de calculer la géométrie et la cinématique de l'arrondissement en même temps. [Erkorkmaz et al., 2006] utilisent une courbe polynomiale de degré 5 ce qui leur permet d'avoir assez de variables pour spécifier les conditions de raccordement. Une B-Spline cubique avec 8 points de contrôle est utilisée par [Pateloup et al., 2010] alors que [Zhao et al., 2013] n'utilisent que 5 points de contrôle. Dans ce cas, le raccordement est garanti par le positionnement des points de contrôle. [Ernesto et Farouki, 2012] se servent d'une courbe de Bézier et optimisent la vitesse le long de la courbe en respectant des contraintes d'accélération, mais sans prendre en compte la contrainte essentielle sur le jerk. [Bi et al., 2012] utilisent deux courbes de Bézier cubiques pour arrondir le coin. Cependant, aucun de ces papiers n'étend le problème à des trajets 5 axes qui amènent des difficultés nouvelles. À notre connaissance, aucune publication n'aborde le problème d'arrondissement des discontinuités en 5 axes.

Pour l'arrondissement des trajets 5 axes proposé ici, une importance majeure est accordée à la gestion de la géométrie directement dans l'espace pièce pour garantir la qualité géométrique de la pièce usinée quelle que soit la machine utilisée. Ainsi, l'arrondissement est effectué en amont de la transformation géométrique 5 axes, figure 22. Un trajet FAO G1 est d'abord traité

pour supprimer les discontinuités en tangence. Puis la transformation géométrique est effectuée pour permettre le calcul de la vitesse d'avance respectant les contraintes cinématiques des axes machine. L'arrondissement des discontinuités permet d'éviter d'avoir une vitesse nulle à chaque transition entre blocs du code G. Cette approche utilisant uniquement des informations de l'espace pièce permet de rendre l'arrondissement indépendant de la machine utilisée. Les algorithmes seront donc aussi bien utilisables pour une machine-outil 5 axes comme la Mikron que pour toute autre structure articulée.

Il est possible d'élargir le contexte de cette étude sur l'arrondissement des discontinuités. En effet, la plupart des publications se concentrent sur l'arrondissement réalisé dans la commande numérique qui utilise généralement des tolérances de contour relativement petites de l'ordre de quelques centièmes de millimètres. Cependant, comme dans [Pateloup *et al.*, 2010], il est également possible d'appliquer ces algorithmes dans un contexte FAO avec des tolérances de contour relativement larges. Dans le cadre des développements d'un langage de programmation de haut niveau autour de STEP-NC, il pourrait être utile d'arrondir localement les trajets avec des tolérances larges. Les algorithmes présentés dans ce chapitre sont multi échelles et peuvent donc être appliqués aux deux contextes, CN et FAO.

Le but de ce chapitre est de proposer un nouveau modèle d'arrondissement local des discontinuités en 5 axes. Ce modèle est basé sur deux courbes définissant la position et l'orientation de l'outil. Cette solution de modélisation est particulièrement bien adaptée pour les usinages sur le flanc puisqu'aussi bien la forme de l'arrondissement que les tolérances de contour et d'orientation sont parfaitement maîtrisées. La principale difficulté vient du lissage de l'orientation et plus particulièrement du raccord en orientation entre les segments linéaires et la portion arrondie. Le problème de connexion en orientation entre deux trajets 5 axes est donc étudié en détail et une résolution utilisant une courbe de paramétrage de l'orientation outil est proposée.

Le reste de ce chapitre est organisé de la façon suivante : dans un premier temps, le modèle d'arrondissement des trajets 5 axes est présenté. Ensuite, la résolution du problème lié au raccord en orientation est détaillée. Enfin, des expériences et des simulations sont effectuées pour démontrer l'efficacité de la méthode d'arrondissement proposée.

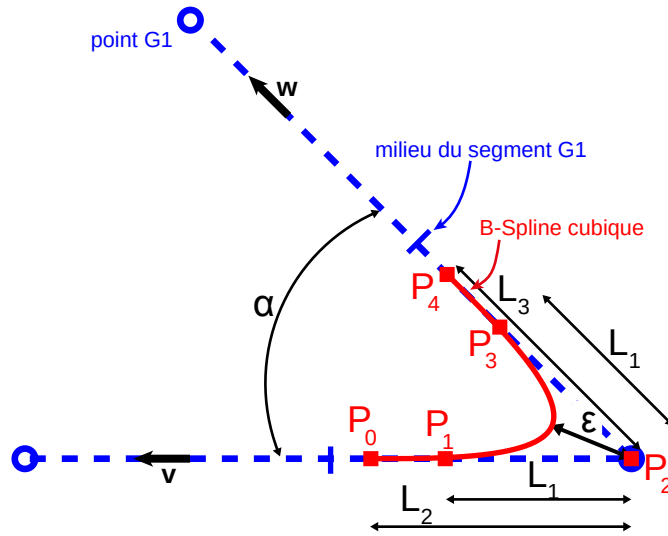


Figure 34 – Arrondissement local d'un trajet 3 axes

4 Arrondissement local des discontinuités

Les différentes solutions de lissage de l'orientation présentées dans la littérature ont permis de dégager une solution capable de répondre aux exigences de gestion des écarts et de maîtrise de la géométrie du trajet dans l'espace pièce. La représentation des trajets 5 axes utilisant deux courbes pour piloter la position et l'orientation de l'outil est retenue. Ainsi, l'arrondissement est effectué sur les deux courbes 3D ce qui peut revenir à appliquer deux fois un arrondissement local 3 axes. Ensuite, un modèle d'arrondissement des discontinuités G1 est présenté, d'abord en 3 axes puis en 5 axes. Enfin, on montrera que le principal problème pour étendre le modèle aux trajets 5 axes vient de la gestion de la connexion en orientation des trajets.

4.1 Arrondissement local des discontinuités 3 axes

La géométrie des trajets 5 axes arrondis est définie par deux courbes, une courbe du bas et une courbe du haut qui doivent être arrondies comme des trajets 3 axes. Le but de l'arrondissement 3 axes est d'obtenir une géométrie continue $\mathcal{G}^2$ de sorte que les dérivées géométriques troisièmes q_{sss} ne soient pas infinies afin que l'interpolation à jerk limité puisse être effectuée sans passage à vitesse nulle, figure 34.

La géométrie modifiée doit respecter la contrainte sur l'écart de contour ε . Plusieurs méthodes performantes d'arrondissement 3 axes ont été proposées dans la littérature, le modèle présenté ici est simple et convient bien à l'extension pour des trajets 5 axes.

Par construction (3 points de contrôle alignés), la continuité $\mathcal{G}^2$ entre la courbe d'arrondissement et les segments précédent et suivant est garantie. La définition mathématique de la B-Spline cubique utilisée pour arrondir les discontinuités est donnée en équation 2.12 avec P_i

les 5 points de contrôle, B_{i3} les fonctions de mélange et $\mathbf{u} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ la séquence nodale, figure 34.

$$\mathbf{C}(u) = \sum_{i=0}^4 B_{i3}(u) \mathbf{P}_i \quad (2.12)$$

Les fonctions de mélange B_{ij} sont définies de manière récursive avec la formule de Cox-de Boor en équation 2.13.

$$B_{i0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u \in [u_i, u_{i+1}[\\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$B_{ij}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+j} - u_i} B_{i,j-1}(u) + \frac{u_{i+j+1} - u}{u_{i+j+1} - u_{i+1}} B_{i+1,j-1}(u)$$

Avec la séquence nodale, le degré et le nombre de points de contrôle utilisés, les équations suivantes sont obtenues :

$$\begin{aligned} B_{03}(u) &= \begin{cases} (1 - 2u)^3, & \text{si } u \in [0, 0.5[\\ 0, & \text{si } u \in [0.5, 1] \end{cases} \\ B_{13}(u) &= \begin{cases} 2u[(1 - 2u)^2 + (1 - u)(2 - 3u)], & \text{si } u \in [0, 0.5[\\ 2(1 - u)^3, & \text{si } u \in [0.5, 1] \end{cases} \\ B_{23}(u) &= \begin{cases} 2u^2(3 - 4u), & \text{si } u \in [0, 0.5[\\ 2(1 - u)^2(4u - 1), & \text{si } u \in [0.5, 1] \end{cases} \\ B_{33}(u) &= \begin{cases} 2u^3, & \text{si } u \in [0, 0.5[\\ 2(1 - u)[u(3u - 1) + (2u - 1)^2], & \text{si } u \in [0.5, 1] \end{cases} \\ B_{43}(u) &= \begin{cases} 0, & \text{si } u \in [0, 0.5[\\ (2u - 1)^3, & \text{si } u \in [0.5, 1] \end{cases} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Étant donné que $B_{03}(0.5) = 0$ et $B_{43}(0.5) = 0$, la position du point milieu de la courbe est donnée par l'équation 2.15. On remarque que les points de contrôle $\mathbf{P}_0$ et $\mathbf{P}_4$ n'ont pas d'influence sur la position du point $\mathbf{C}(u = 0.5)$ et n'affecte donc pas l'erreur de contour ε .

$$\mathbf{C}(u = 0.5) = \frac{1}{4} \mathbf{P}_1 + \frac{1}{2} \mathbf{P}_2 + \frac{1}{4} \mathbf{P}_3 \quad (2.15)$$

En plaçant le point $\mathbf{P}_2$ à l'origine du repère local $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ utilisé, l'erreur de contour ε est donnée par l'équation 2.16. Les vecteurs unitaires $\mathbf{v}$ et $\mathbf{w}$ sont respectivement dans la direction de $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_1$ et $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$.

$$\varepsilon = \left\| \frac{1}{4} L_1(\mathbf{v} + \mathbf{w}) \right\| \quad (2.16)$$

Finalement, l'avantage de ce modèle est d'avoir une expression simple de l'écart de contour

uniquement fonction de l'angle du coin α et de la longueur L_1 , équation 2.17.

$$\varepsilon = \frac{1}{2}L_1 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.17)$$

L'erreur de contour maximale tolérée permet de déterminer le paramètre L_1 , mais les longueurs L_2 et L_3 peuvent encore être optimisées, figure 34. On verra par la suite que lorsque ce modèle est appliqué à la courbe du haut d'un coin 5 axes, les paramètres L_2 et L_3 sont fixés pour respecter l'interpolation de l'orientation outil sur les segments précédent et suivant.

En 3 axes, $L_2 = L_3$ est choisi pour avoir un arrondissement symétrique. Ainsi, le ratio entre L_1 et L_2 est le dernier paramètre à fixer. Pour résoudre un problème similaire, [Pateloup et al., 2010] ont utilisé un critère d'optimisation basé sur la courbure qui a l'avantage d'être indépendant de la machine. Néanmoins, le meilleur critère d'optimisation serait de minimiser le temps d'usinage et cela nécessite donc d'utiliser un algorithme d'interpolation temporelle. Sans donner plus de détail sur cette optimisation, des expériences numériques ont montré que $1.4 \leq \frac{L_2}{L_1} \leq 1.75$ donne des résultats satisfaisants en terme de minimisation du temps d'usinage. En effet, si $\frac{L_2}{L_1}$ est trop proche de 1, la connexion entre la courbe et les segments n'est pas suffisamment continue. Si $\frac{L_2}{L_1} = 1$, $P_0 = P_1$ et $P_3 = P_4$ et une interpolation temporelle à jerk limité imposera une vitesse d'avance nulle à la connexion $\mathcal{G}^1$. D'un autre côté, augmenter le ratio au-dessus de 1.75 n'est pas utile pour ce qui concerne la minimisation du temps d'usinage.

Un autre problème apparaît lorsque les segments G1 sont très petits, il est alors impossible d'utiliser tout l'écart de contour autorisé. Donc le ratio choisi est $\frac{L_2}{L_1} = 1.4$ et L_2 est positionné de sorte à ne pas dépasser le milieu du plus court segment pour s'assurer que chaque coin est indépendant. [Bi et al., 2012] ont montré qu'il est possible de lever cette contrainte d'indépendance pour dépasser le milieu des segments quand cela n'empiète pas sur le coin suivant. Mais dans tous les cas, si de nombreux petits segments sont utilisés pour décrire le trajet, une approximation globale est bien plus appropriée que l'arrondissement local de chaque discontinuité.

Finalement, comme il a été dit en introduction, ce modèle 3 axes est multi échelle. Ainsi, il peut être utilisé pour l'arrondissement à l'intérieur de la commande numérique avec de petites tolérances ou pour des arrondissements plus larges dans un contexte FAO.

4.2 Arrondissement local des discontinuités 5 axes

Alors que les trajets G1 3 axes posent des problèmes de discontinuité sur la position du point piloté, les trajets 5 axes G1 posent des problèmes de continuité à la fois sur la position et sur l'orientation de l'outil. Il semble qu'à ce jour, aucune extension du problème d'arrondissement local des trajets 3 axes n'a été proposée pour des trajets 5 axes.

Le modèle d'arrondissement des trajets 5 axes proposé est basé sur la description du trajet par une courbe du bas définissant la position du bout d'outil et une courbe du haut définissant l'orientation de l'outil, figure 31. Le modèle d'arrondissement 3 axes est appliqué aux deux



Cette définition de l'écart d'orientation avec ε_{haut} est particulièrement bien adaptée pour l'usinage sur le flanc. En effet, il est possible de spécifier l'écart toléré en millimètre en haut de la pièce usinée avec h la hauteur usinée. La géométrie lissée est complètement contrôlée dans l'espace pièce et la construction même des courbes assure que le trajet n'aura pas d'oscillation.

Une surface lissée contenant les axes outil est ainsi définie par les deux courbes arrondies et une continuité $\mathcal{G}^2$ est garantie à chaque connexion. Mais il reste un degré de liberté sur l'orientation de l'outil dans l'arrondissement piloté par le paramétrage des courbes. Comme on peut le voir sur la figure 35 avec les axes en traits forts ou pointillés, même si les courbes sont parfaitement connectées géométriquement, il est possible d'avoir de fortes variations d'orientation à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement. Ainsi l'interpolation de l'orientation dans l'arrondissement joue un rôle important dans le lissage du trajet et le paramétrage des courbes représente une difficulté majeure pour l'arrondissement des trajets 5 axes.

Le long des segments, le trajet est interpolé de sorte que les vecteurs d'orientation interpolés soient dans le plan créé par les vecteurs d'orientation initiale et finale. L'angle de rotation θ entre le vecteur d'orientation initial $\mathbf{V}$ et un vecteur intermédiaire interpolé doit respecter le ratio entre l'angle et le déplacement à couvrir. Le vecteur d'orientation intermédiaire $\mathbf{V}_{rot}$ est donc donné par la formule de Rodrigues, équation 2.18, avec $\mathbf{k}$ le vecteur unitaire définissant l'axe de rotation (produit vectoriel entre le vecteur d'orientation initial et final).

55

Dans la portion arrondie, l'orientation de l'outil est donnée par la différence entre la courbe du haut et la courbe du bas, équation 2.19. Donc l'orientation n'est pas uniquement donnée par la géométrie des courbes lissées (qui est fixée), mais également par leur paramétrage. Suivant le paramétrage des courbes, l'orientation change à l'intérieur de la portion arrondie et cela peut causer des discontinuités d'orientation importantes avec les portions linéaires précédentes et suivantes.

$$\text{Ori} = \frac{\mathbf{C}_{haut}(u_{haut}) - \mathbf{C}_{bas}(u_{bas})}{\|\mathbf{C}_{haut}(u_{haut}) - \mathbf{C}_{bas}(u_{bas})\|} \quad (2.19)$$

4.2.2 Courbe de paramétrage

Le lien entre le paramètre de la courbe du haut u_{haut} et celui de la courbe du bas u_{bas} définit l'orientation de l'outil dans l'arrondissement. Pour la suite du chapitre, la courbe du bas est paramétrée suivant son abscisse curviligne et ce paramétrage n'est plus modifié. L'objectif est de trouver le paramétrage u_{haut} qui permettra une connexion lisse d'orientation à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement. La figure 36 présente schématiquement le problème de connexion. L'interpolation d'orientation sur les segments est donnée par l'équation 2.18 donc les dérivées géométriques à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement sont fixées. Pour avoir une connexion lisse, il est nécessaire de contrôler parfaitement les dérivées géométriques au début et à la fin de l'arrondissement qui sont données par le lien entre u_{haut} et u_{bas} . Le paramétrage le plus simple est $u_{haut} = u_{bas}$ mais ce paramétrage ne permet pas d'ajuster la valeur des dérivées géométriques de l'orientation à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement, cela entraîne des dérivées géométriques infinies et donc un passage à vitesse nulle. Pour résoudre ce problème, une courbe B-Spline cubique de paramétrage est utilisée pour contrôler les conditions aux limites et assurer une connexion lisse avec les segments précédent et suivant.

Comme l'interpolation temporelle est réalisée en prenant en compte les contraintes de jerk, il est nécessaire de contrôler le niveau de continuité jusqu'aux dérivées géométriques troisièmes. Les dérivées géométriques premières, deuxièmes et troisièmes de l'orientation (équations 2.22 à 2.24) sont obtenues à partir de l'équation 2.19. La notation ' désigne la dérivée d'une fonction par rapport à son paramètre, équation 2.20. La fonction f représente le paramétrage optimisé qui est l'inconnu, g représente le lien entre le paramètre de la courbe du bas et l'abscisse curviligne, équation 2.21.

$$\mathbf{C}'_{haut} = \frac{d\mathbf{C}_{haut}(u_{haut})}{du_{haut}} \quad (2.20)$$

$$u_{haut} = f(u_{bas}) \quad , \quad u_{bas} = g(s) \quad (2.21)$$

D'après l'équation 2.24, pour éviter d'avoir une dérivée géométrique troisième de l'orien-

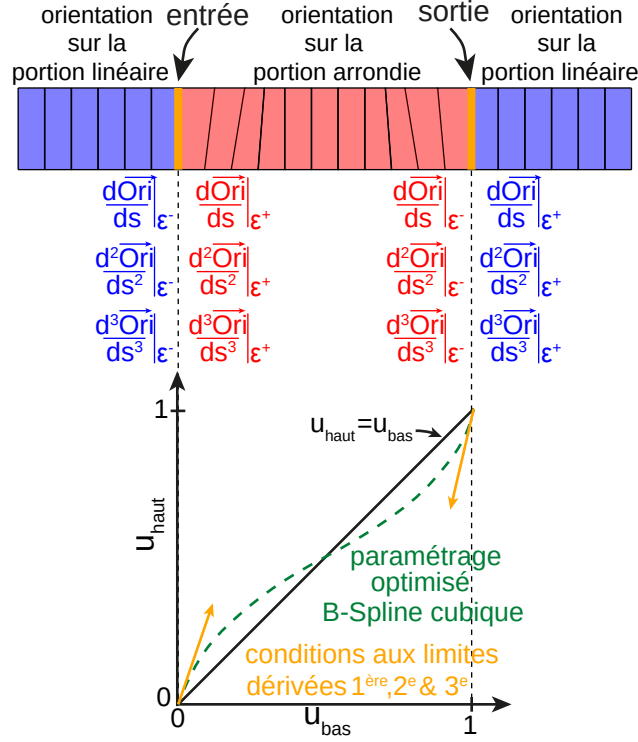


Figure 36 – Courbe de paramétrage pour la connexion de l'orientation outil

tation infinie, il faut que f''' soit bornée parce qu'à priori $C'_{\text{haut}} \neq 0$. Ainsi, une courbe de reparamétrage cubique est choisie pour contrôler la valeur de f''' . Ensuite, des exemples ont montré qu'aucun terme ne peut être négligé dans ces équations. Une optimisation est donc nécessaire pour trouver le paramétrage f permettant d'avoir une connexion d'orientation lisse.

$$\frac{d\text{Ori}}{ds} = \frac{1}{\|C_{\text{haut}} - C_{\text{bas}}\|} \cdot (C'_{\text{haut}}f' - C'_{\text{bas}})g' \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2\text{Ori}}{ds^2} = \frac{1}{\|C_{\text{haut}} - C_{\text{bas}}\|} \cdot \\ [(C''_{\text{haut}}f'^2 + C'_{\text{haut}}f'' - C''_{\text{bas}}) \cdot g'^2 \\ + (C'_{\text{haut}}f' - C'_{\text{bas}}) \cdot g''] \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3\text{Ori}}{ds^3} = \frac{1}{\|C_{\text{haut}} - C_{\text{bas}}\|} \cdot \\ [(C'''_{\text{haut}}f'^3 + 3C''_{\text{haut}}f'f'' + C'_{\text{haut}}f''' - C'''_{\text{bas}}) \cdot g'^3 \\ + (C''_{\text{haut}}f'^2 + C'_{\text{haut}}f'' - C''_{\text{bas}}) \cdot 3g'g'' \\ + (C'_{\text{haut}}f' - C'_{\text{bas}}) \cdot g'''] \end{aligned} \quad (2.24)$$

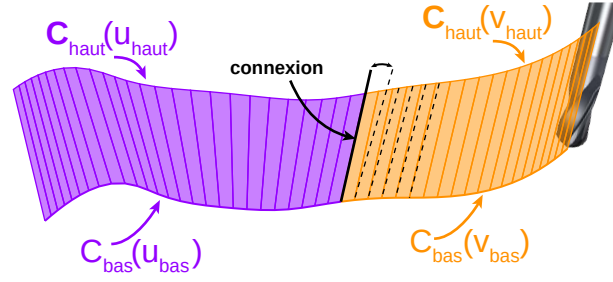


Figure 37 – Problème général de connexion en orientation

Comme nous l'avons vu précédemment, la dérivée par rapport au paramètre de la courbe n'a que peu d'importance, le terme important pour l'interpolation temporelle est la dérivée géométrique, c'est-à-dire la dérivée par rapport à l'abscisse curviligne s . En effet, cette dérivée est directement liée à la vitesse maximale atteignable le long du trajet, c'est pourquoi nous nous intéresserons aux dérivées géométriques par la suite.

4.3 Généralisation du problème de connexion de l'orientation

Le problème de connexion de l'orientation présenté ici dans le cas de l'arrondissement local de discontinuités 5 axes peut être généralisé. En effet, le même problème apparaît lors de la connexion de deux trajets B-Splines 5 axes, figure 37. En usinage 5 axes, il est possible d'utiliser des formats de description B-Spline des trajets [Siemens, 2009, Langeron *et al.*, 2004] mais, à priori, aucune attention n'a été accordée au lien entre les paramètres des courbes du haut et du bas. Ainsi, le paramétrage par défaut $u_{haut} = u_{bas}$ génère des variations de l'orientation discontinues et donc une vitesse de passage très basse même si les courbes sont parfaitement connectées géométriquement. En utilisant la courbe de paramétrage, la suite du chapitre présente une nouvelle contribution pour la connexion de l'orientation de deux trajets B-Spline.

5 Résolution du problème de connexion de l'orientation

Dans les paragraphes précédents, le modèle d'arrondissement local des trajets 5 axes a été présenté. Nous avons vu que le problème majeur réside dans la connexion de l'orientation et que ce problème de connexion de l'orientation peut être généralisé à toutes les connexions 5 axes entre deux trajets B-Spline. En effet, si l'évolution de l'orientation outil à la connexion n'est pas suffisamment lisse, l'interpolation temporelle entraînera inévitablement une importante réduction de vitesse d'avance.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.3, la réduction de la vitesse d'avance est liée aux dérivées géométriques de chacun des axes. À partir de là, un indicateur pertinent pour l'étude de la connexion en orientation des trajets est construit. Finalement, la courbe de paramétrage est optimisée pour permettre une connexion lisse de l'orientation.

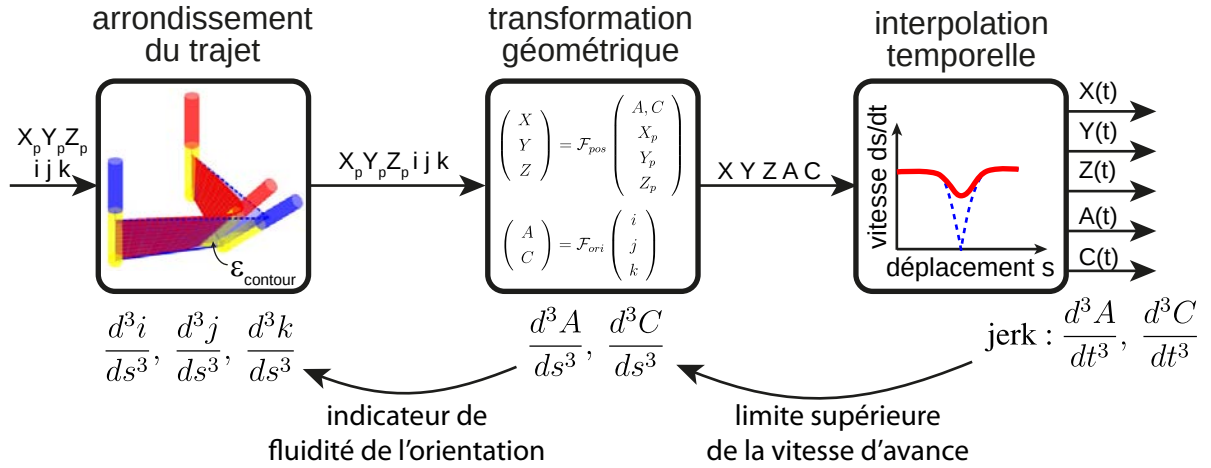


Figure 38 – Lien entre l'indicateur de fluidité de l'orientation et la limite supérieure de la vitesse d'avance

5.1 Définition de l'indicateur de fluidité de l'orientation

D'après l'équation 2.11, la vitesse d'avance est limitée par la vitesse, l'accélération et le jerk des axes machine. Cette limitation est basée sur le mouvement des axes machine et nécessite donc la connaissance de l'architecture de la machine, du posage de la pièce... Étant donné que l'arrondissement des discontinuités 5 axes est effectué dans l'espace pièce et se veut indépendant de la machine utilisée, il est nécessaire de construire un indicateur pertinent n'utilisant que des paramètres de l'espace pièce. L'indicateur utilisé par Castagnetti (figure 29) présente l'inconvénient d'être défini dans l'espace machine et porte sur des dérivées secondes tout comme l'énergie de déformation utilisée par Péchard (figure 32). Or la limitation en jerk correspond à une dérivée troisième qui est beaucoup plus sensible que la dérivée seconde.

Lors de l'interpolation temporelle, le jerk des axes est généralement le paramètre le plus limitant. Donc d'après l'équation 2.10, l'objectif principal pour obtenir une connexion lisse est de minimiser les dérivées géométriques troisièmes q_{sss} . Comme le problème de connexion vient de l'orientation, le bout d'outil est fixé et l'orientation doit être optimisée.

Le lien entre l'espace machine et l'espace pièce est donné par la transformation géométrique qui est non linéaire, mais qui conserve les continuités (fonctions trigonométriques). Ainsi, dans l'espace pièce le dernier degré de liberté est l'orientation de l'outil dans la surface construite avec les courbes du haut et du bas. Cette orientation est représentée par les composantes i, j, k dans l'espace pièce. Finalement, la minimisation de q_{sss} est liée à la minimisation des dérivées troisièmes géométriques de l'orientation. En effet, en suivant le schéma de la figure 38, la limite supérieure de la vitesse d'avance permet de traduire la contrainte sur le jerk des axes rotatifs en contrainte sur les dérivées géométriques. Avec la transformation géométrique, ces dérivées géométriques troisièmes des axes de rotation sont liées aux dérivées géométriques troisièmes de l'orientation outil. Comme aucune composante de l'orientation ne doit être privilégiée, l'indicateur de fluidité de l'orientation basé sur la norme des dérivées troisièmes de l'orientation

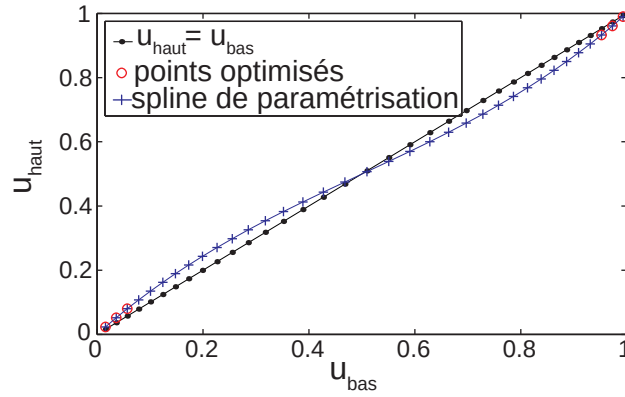


Figure 39 – Courbe de paramétrage

par rapport à l'abscisse curviligne est construit, équation 2.25.

$$\text{indicateur de fluidité de l'orientation} = \sqrt{\left(\frac{d^3i}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3j}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3k}{ds^3}\right)^2} \quad (2.25)$$

Comme le jerk est le principal facteur limitant de la vitesse d'avance, cette norme des dérivées géométriques troisièmes de l'orientation permet d'avoir un indicateur de la fluidité de l'évolution des orientations outils le long du trajet. Pour l'arrondissement des discontinuités 5 axes, cet indicateur sera le critère à minimiser pour avoir une connexion de l'orientation la plus lisse possible à l'entrée et à la sortie de la discontinuité. De façon générale, cet indicateur dans l'espace pièce peut être utilisé pour faire du lissage de trajets 5 axes ; c'est le pendant de la limite supérieure du profil de vitesse pour les situations où l'on souhaite effectuer un lissage de l'orientation dans l'espace pièce.

5.2 Optimisation de la connexion de l'orientation

En utilisant l'indicateur précédemment défini, il est possible d'optimiser la connexion en orientation dans l'espace pièce. L'objectif est de minimiser l'indicateur de fluidité de l'orientation pour avoir la connexion la plus lisse possible et donc la vitesse de passage la plus élevée possible. Comme il est expliqué dans le paragraphe 4.2.2, le dernier degré de liberté est le paramétrage de la courbe du haut. Une courbe de paramétrage est utilisée pour lier les paramètres de la courbe du haut u_{haut} et de la courbe du bas u_{bas} , figure 36. Pour calculer les dérivées discrètes troisièmes, un schéma d'Euler est utilisé de sorte que la dérivée troisième en un point s'appuie sur les trois points précédents. Pour le problème d'arrondissement des trajets 5 axes, les conditions aux limites contrôlées par les trois premiers et trois derniers points de la courbe de paramétrage sont optimisées par une méthode de Newton-Raphson. La procédure d'optimisation commence par trouver le meilleur premier point, puis ce point est fixé et l'optimisation

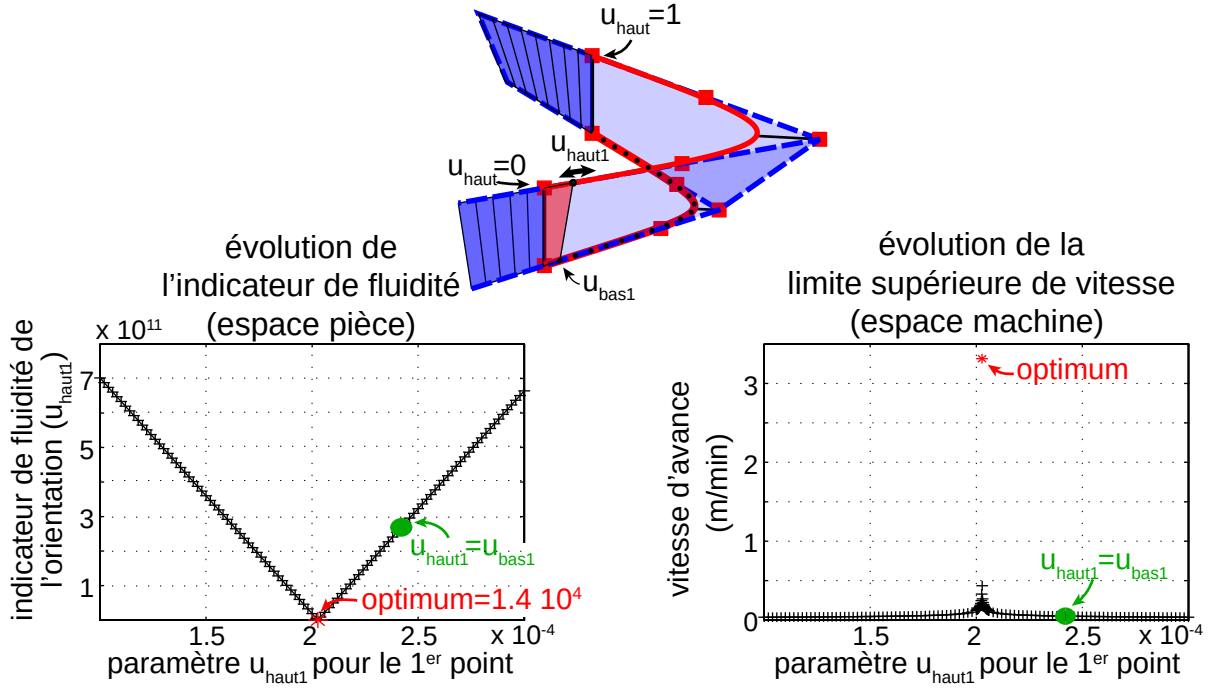


Figure 40 – Effet de la position du premier point u_{haut1} sur la connexion de l'orientation

est répétée pour le point suivant. Finalement, les six points optimisés (ronds rouges sur la figure 39) sont interpolés par la B-Spline cubique de reparamétrage. La continuité de la B-Spline cubique assure une variation lisse du paramétrage à l'intérieur de l'arrondissement. En pratique, l'indicateur de fluidité basé sur les dérivées troisièmes de l'orientation est extrêmement sensible comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant.

5.3 Analyse de la sensibilité

Pour démontrer l'extrême sensibilité de la connexion vis-à-vis du paramétrage, une étude est effectuée sur l'exemple du coin de poche 5 axes traité en 6.1. Comme on peut le voir en haut de la figure 40, on se focalise uniquement sur la première orientation à l'entrée dans la discontinuité. Donc le premier point haut correspondant au paramètre u_{haut1} doit être optimisé. En effet, le paramétrage de la courbe du bas est fixé donc les points du bas sont donnés (points noirs sur la courbe du bas).

Pour étudier la sensibilité, l'effet d'une modification du paramètre u_{haut1} sur l'indicateur de fluidité espace pièce et sur la limite supérieure la vitesse d'avance est tracé sur la figure 40. On peut voir qu'avec un paramétrage linéaire $u_{haut1} = u_{bas1}$, l'indicateur de fluidité de l'orientation a une valeur très grande et la vitesse maximale atteignable est quasiment nulle. Or, un optimum qui permet d'augmenter énormément la vitesse de passage peut être trouvé. Cependant, une très petite variation du paramétrage induit une chute importante de la vitesse maximale atteignable, figure 40 graphique de droite. En effet, les dérivées troisièmes induites par les limitations en

jerk sont extrêmement sensibles à une très petite variation de l'orientation outil. Cependant, la fonction objectif à minimiser est quasiment linéaire et n'a qu'un seul minimum ce qui facilite la recherche de l'optimum.

Pour conclure, une solution pour résoudre le problème de connexion de l'orientation a été présentée dans cette partie. En effet, il faut faire très attention à la continuité de l'orientation même si les courbes du haut et du bas sont parfaitement connectées géométriquement, figure 37. En utilisant la courbe de paramétrage liant les paramètres du haut et du bas, ce chapitre fournit une solution efficace pour résoudre le problème général de connexion en orientation des trajets 5 axes.

6 Application pour l'arrondissement local des discontinuités

Les nouveaux algorithmes développés pour arrondir les discontinuités G1 en 5 axes sont appliqués sur deux exemples. D'abord, un coin 5 axes est arrondi dans un contexte FAO c'est-à-dire avec des tolérances larges. Cet exemple met en évidence les problèmes de connexion de l'orientation étudiés dans la partie 5 de ce chapitre. Dans ce premier exemple, une comparaison avec une commande numérique industrielle est possible et montre bien les bénéfices apportés par l'optimisation de la connexion en orientation. Ensuite, un second exemple démontre que la méthode d'arrondissement 5 axes proposée est adaptée à une utilisation dans un contexte CN (avec de petites tolérances).

6.1 Coin de poche 5 axes avec un grand arrondissement

Pour démontrer la nécessité de porter une attention toute particulière aux dérivées de l'orientation, un essai a été réalisé sur la machine Mikron équipée d'une commande numérique Siemens 840D. Un coin 5 axes est arrondi en utilisant la méthode proposée avec les courbes du haut et du bas. Pour cet exemple, les tolérances de contour et d'orientation sont toutes les deux de 3 mm. Cette tolérance large accentue les problèmes liés au paramétrage linéaire ($u_{haut} = u_{bas}$) et permet de dissocier les ralentissements à l'entrée, au milieu et à la sortie de l'arrondissement. De plus, cela permet d'effectuer un essai sur la commande industrielle tout en contrôlant parfaitement la géométrie du coin avec deux courbes B-Splines. En effet, la commande numérique Siemens 840D permet de programmer des trajets 5 axes avec un format de description B-Spline natif grâce à la programmation suivante [Siemens, 2009] :

```
BSPLINE SD=3 F  
X= Y= Z= XH= YH= ZH= PL=
```



Figure 41 – Photo du coin 5 axes arrondi avec une grande tolérance

Le paramètre 'SD' donne le degré de la courbe B-Spline, 'F' donne la vitesse d'avance programmée, 'X= Y= Z=' spécifient la position des points de contrôle de la courbe du bas et 'XH= YH= ZH=' spécifient la position des points de contrôle de la courbe du haut qui définit l'orientation de l'outil. Enfin, 'PL' donne le paramétrage. Dans ce format, un seul paramètre est utilisé pour le paramétrage donc les courbes du haut et du bas ont forcément le même paramétrage $u_{haut} = u_{bas}$.

Un coin de poche 5 axes est usiné dans de l'aluminium avec un outil cylindrique diamètre $\phi 20mm$ et une vitesse d'avance programmée $F_{pr} = 3000mm/min$, figure 41. Les résultats sont présentés sur la partie gauche de la figure 42. Sur le graphique en haut à gauche, on peut voir que les dérivées géométriques troisièmes de l'orientation sont extrêmement grandes à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement. Le graphique du milieu à gauche montre la limite supérieure de la vitesse d'avance, à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement la vitesse d'avance mesurée sur la Siemens 840D est limitée par les contraintes de jerk qui entraînent une vitesse de passage quasiment nulle. Finalement, en bas à gauche de la figure, on voit la vitesse d'avance tracée sur la surface balayée par l'axe outil. Les brusques chutes de vitesse à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement dégradent l'aspect de la surface puisque les conditions d'usinage changent brutalement le long du flanc usiné.

En utilisant l'optimisation du paramétrage présentée dans ce chapitre, il est possible d'éviter ces ralentissements dus à une mauvaise gestion de l'évolution de l'orientation de l'outil. Sur le graphique en haut à droite, on voit que la procédure d'optimisation permet d'éviter les grands pics sur les dérivées troisièmes géométriques de l'orientation. Sur le graphique du milieu, la limite supérieure de la vitesse d'avance obtenue est bien supérieure donc une vitesse de passage plus élevée peut être atteinte à l'entrée et à la sortie du raccordement. La vitesse d'avance VPOp est calculée avec l'algorithme d'interpolation temporelle VPOp (Velocity Profile Optimization) développé pendant cette thèse et qui sera présenté dans le chapitre 3. Cette vitesse d'avance respecte toutes les contraintes cinématiques des 5 axes machine. Comme on le verra dans le chapitre 3, cet algorithme d'interpolation temporelle donne des vitesses d'avance similaires

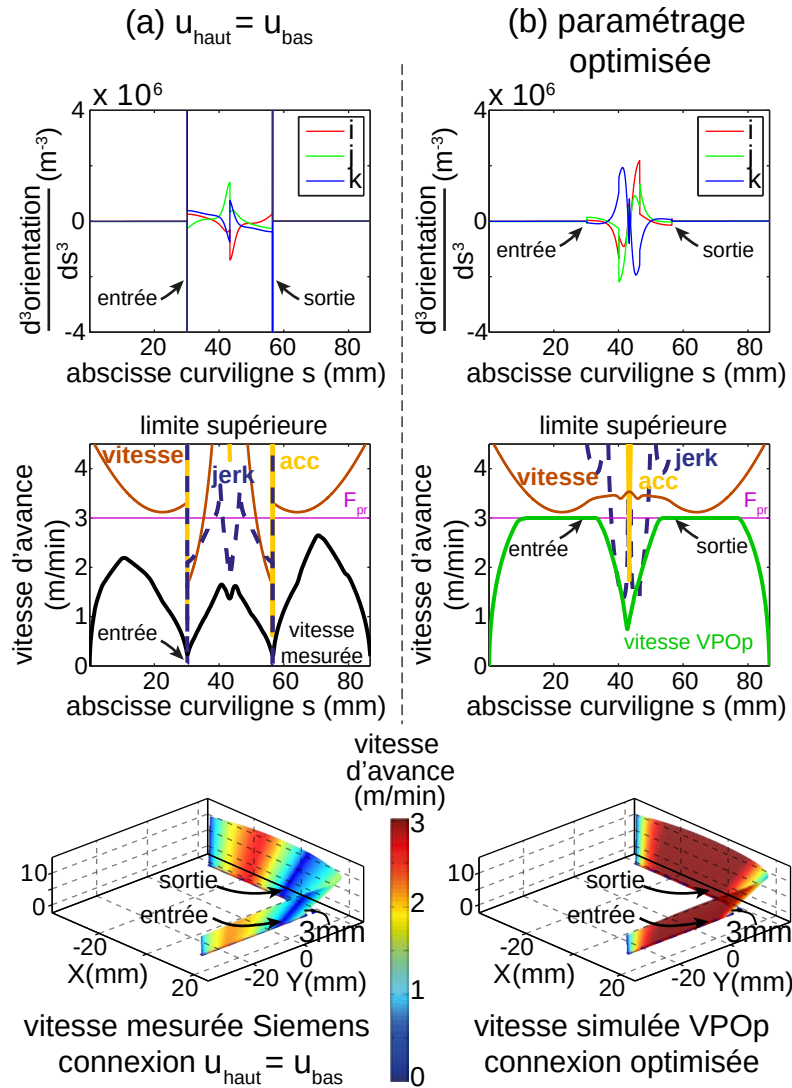


Figure 42 – Présentation des résultats pour le coin de poche 5 axes. Gauche : paramétrage $u_{\text{haut}} = u_{\text{bas}}$, droite : paramétrage optimisé

à celles mesurées sur la commande numérique Siemens 840D. L'augmentation de la vitesse de passage vient donc bien d'une meilleure gestion du trajet. Finalement, le graphique en bas à droite de la figure 42 montre qu'une vitesse d'avance élevée peut être maintenue à l'entrée et à la sortie de la discontinuité avec ce paramétrage optimisé. Bien sûr, au milieu de l'arrondissement une réduction de la vitesse d'avance est inévitable puisque les axes ne sont pas suffisamment dynamiques pour effectuer les changements de direction et d'orientation demandés sans ralentir.

Le paramétrage optimisé réduit le temps d'usinage de moitié pour cet exemple, figure 43. Ainsi, la productivité est améliorée de même que l'état de surface, puisque les marques dues aux variations brusques de vitesse sont éliminées.

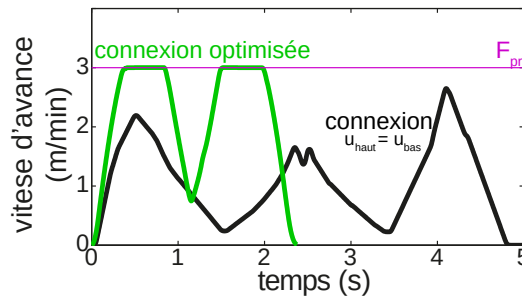


Figure 43 – Comparaison des temps d’usinage pour le coin de poche 5 axes

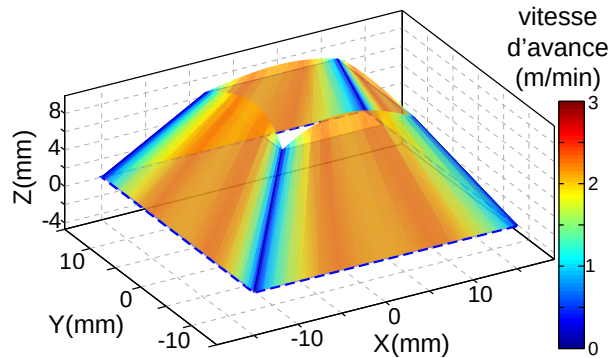


Figure 44 – Pyramide avec la vitesse d’avance VPOp en couleur

6.2 Pyramide avec un petit arrondissement

Dans cet exemple, une pyramide est usinée sur le flanc, figure 44. Le trajet est décrit uniquement par 4 segments. La tolérance de contour utilisée est de $0.02mm$ ce qui est une valeur usuelle utilisée dans les commandes numériques. La tolérance d’orientation ε_{haut} est également de $0.02mm$. Malheureusement, avec ces petites tolérances aucune comparaison ne peut être faite avec la commande numérique Siemens 840D. En effet, il n’est pas approprié de définir une si petite courbe B-Spline native, car ce format n’est pas destiné à représenter de si petites géométries à cause du temps de cycle d’interpolation par exemple.

Comme pour l’exemple précédent, les paramétrages $u_{haut} = u_{bas}$ et optimisés sont comparés en figure 45. Un zoom sur un coin est effectué puisqu’ils sont tous identiques. À cette échelle, le seul paramètre limitant est le jerk. On peut voir que le paramétrage linéaire crée des problèmes à l’entrée et à la sortie de la discontinuité à la fois sur les dérivées de l’orientation et sur la limite supérieure de la vitesse d’avance. En utilisant un paramétrage optimisé, il est possible de lisser la connexion de l’orientation et d’enlever les pics à l’entrée et à la sortie de l’arrondissement.

Finalement, une fois que la géométrie est optimisée, il est là encore possible d’effectuer l’interpolation temporelle pour obtenir la vitesse d’avance avec le logiciel VPOp. Avec une petite tolérance d’arrondissement, l’interpolation temporelle est plus délicate et sans cette optimisation de l’orientation les contraintes de jerk n’auraient pas pu être respectées lors de l’interpola-

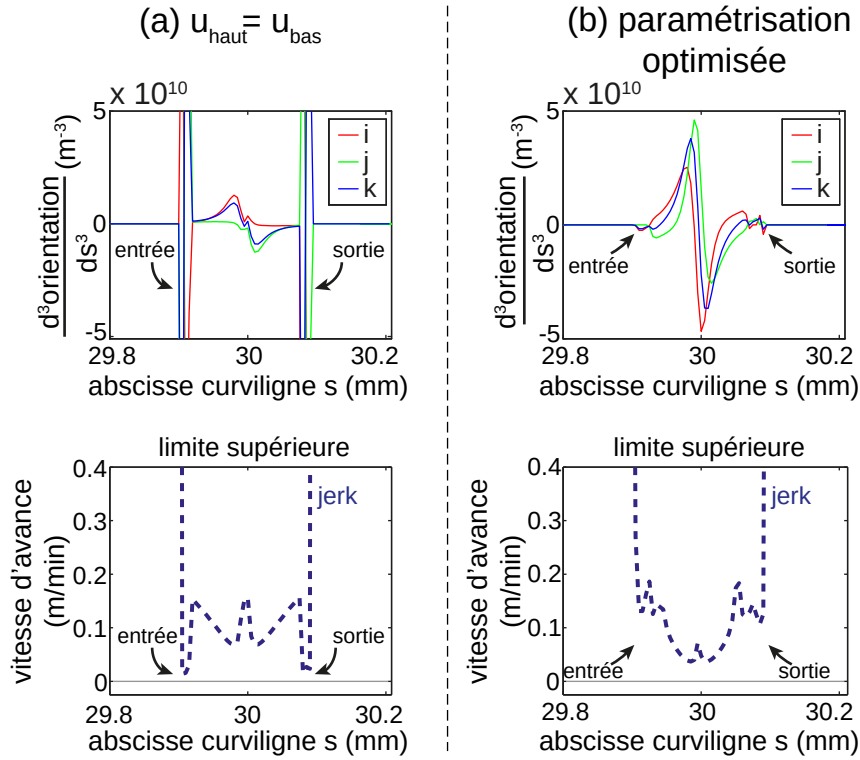


Figure 45 – Présentation des résultats pour la pyramide. Gauche : paramétrage $u_{haut} = u_{bas}$, droite : paramétrage optimisé

tion temporelle.

Cet exemple montre que ces algorithmes d'arrondissement peuvent être intégrés dans une commande numérique pour contrôler précisément la géométrie de la pièce au niveau des discontinuités.

7 Conclusions

Le format G1 étant le format de description des trajets le plus utilisé, il est important d'avoir un algorithme permettant de lisser les discontinuités entre chaque bloc pour éviter les passages à vitesse nulle lors de l'interpolation temporelle à jerk limité. Une étude des différentes méthodes de lissage des trajets d'usinage est présentée. Dans la littérature, les techniques d'arrondissement local sont appliquées uniquement aux trajets 3 axes alors que les trajets 5 axes sont lissés globalement.

Dans une première partie de ce chapitre, les équations fondamentales faisant le lien entre la géométrie du trajet et la vitesse d'avance atteignable sont détaillées. Ces équations permettent par la suite de savoir comment la géométrie doit être lissée pour que la vitesse d'avance soit maximale. L'approximation des équations fondamentales liant la géométrie à la loi de mouvement permet d'obtenir très rapidement des informations pertinentes sur la vitesse d'avance maximale atteignable en fonction des contraintes cinématiques sur les axes machine. Cette li-

mite supérieure du profil de vitesse est un outil tout à fait intéressant pour optimiser les trajets d'usinage comme dans [Beudaert *et al.*, 2011].

Ensuite, un modèle d'arrondissement local des discontinuités 5 axes est proposé alors que jusque là, dans la littérature, le problème n'était traité qu'en 3 axes. Ce modèle est basé sur une description du trajet par deux courbes B-Splines. En utilisant cette description, les tolérances de contour et d'orientation sont parfaitement contrôlées dans l'espace pièce de même que la connexion géométrique des trajets.

Par la suite, le problème de connexion de l'orientation, qui n'avait à priori jamais été soulevé, est étudié. En effet, ce problème généralisable à toutes les connexions entre trajets 5 axes est critique pour l'arrondissement local des discontinuités 5 axes. Pour résoudre ce problème, une courbe de paramétrage liant les paramètres de la courbe du haut et du bas est optimisée. Cette optimisation est effectuée en utilisant l'indicateur de fluidité de l'orientation défini dans l'espace pièce et pertinent pour prédire les chutes de vitesse. Cet indicateur similaire à la limite supérieure de la vitesse d'avance, mais exprimé uniquement dans l'espace pièce permet de détecter les problèmes de connexion de l'orientation ; il pourra être utilisé pour d'autres optimisations des trajets 5 axes dans l'espace pièce.

Enfin, une limitation de la commande numérique Siemens 840D est mise en évidence puisqu'il est impossible d'imposer un paramétrage entre les courbes du haut et du bas qui soit différent du paramétrage linéaire utilisé. Les exemples démontrent également que le modèle proposé est valable aussi bien dans un contexte FAO que dans un contexte CN. Ces travaux sur l'arrondissement local des trajets d'usinage 5 axes ont donné lieu à une publication en revue [Beudaert *et al.*, 2013].

Comme nous l'avons déjà vu, ces traitements de la géométrie sont très liés à l'interpolation temporelle de la vitesse d'avance. Le chapitre suivant va maintenant présenter en détail les algorithmes permettant de calculer la trajectoire temporelle de l'outil de sorte qu'elle respecte les contraintes de vitesse, d'accélération et de jerk des 5 axes machine.

7. Conclusions

Chapitre

3

Interpolation temporelle à jerk limité en 5 axes

Ce troisième chapitre traite de l'interpolation temporelle qui permet de calculer la vitesse d'avance le long d'un trajet. L'étape de traitement de la géométrie a permis de définir une géométrie suffisamment continue pour l'interpolation à jerk limité, il faut maintenant générer des consignes qui respectent les contraintes en vitesse, accélération et jerk des axes machine.

1 Introduction et bibliographie

L'interpolation temporelle a pour but de définir l'aspect temporel de la trajectoire. Le trajet qui définit la géométrie est interpolé temporellement pour trouver la loi de mouvement à associer. Au final, on obtient la trajectoire qui contient les informations sur la description du trajet (géométrie) ainsi que sur la façon de le parcourir temporellement (loi de mouvement). Cet algorithme est une brique fondamentale de la commande numérique qui a pour fonction principale de relier la géométrie et le temps en intégrant les limitations physiques de la machine-outil.

Une bonne façon de vulgariser le problème consiste à imaginer une voiture de course sur un circuit. Avec la largeur de la route qui correspond à la tolérance géométrique, un pilote définit le meilleur trajet et donne ainsi la géométrie à suivre dans les virages, c'est le problème qui a été résolu dans le chapitre précédent. Maintenant que l'on sait comment tourner le volant, il reste à définir la vitesse de la voiture. Le but de l'interpolation temporelle consiste à savoir quand accélérer et quand freiner pour respecter la géométrie tout en allant le plus vite possible. Les capacités d'accélération et de freinage de la voiture ne sont pas infinies donc ces limites seront prises en compte lors de la planification de la trajectoire. On peut également limiter les variations d'accélération pour ne pas trop « chahuter » les passagers, cela correspond aux contraintes de jerk.

Les capacités de vitesse et d'accélération des moteurs des axes d'une machine-outil ne sont pas non plus infinies, il faudra donc les prendre en compte pour ne pas demander de trajectoires irréalisables. Pour ce qui est de la contrainte de jerk, une étude montrera son influence sur les vibrations de la structure de la machine. Ces vibrations sont néfastes pour les applications d'usinage et doivent donc être limitées.

Le problème d'interpolation temporelle est assez classique et peut être résolu avec des approches radicalement différentes. Les paragraphes suivants vont s'attacher à faire un état de l'art comparatif des différentes techniques proposées dans la littérature. Suivant les domaines d'application, les contraintes prises en compte lors de cette interpolation peuvent être assez différentes. Cependant, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le respect de la géométrie est fondamental pour les applications d'usinage. De même, la prise en compte des contraintes de jerk est primordiale pour les applications d'usinage grande vitesse.

L'interpolation temporelle a tout d'abord été étudiée dans le domaine de la robotique, un algorithme itératif à deux passes basé sur le principe d'intersection des contraintes est proposé

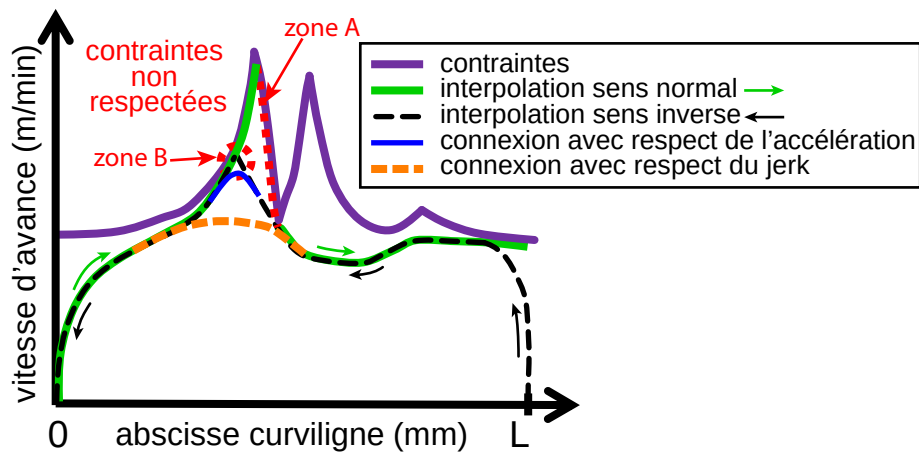


Figure 46 – Algorithme d'interpolation temporelle à deux passes

par [Bobrow *et al.*, 1985] et [Shin et McKay, 1985]. La figure 46 montre les résultats obtenus lors de la première passe en sens normal et lors de la deuxième passe dans le sens inverse. L'idée est d'avancer le plus vite possible le long du trajet lors de la première passe. Quand il n'est plus possible de trouver de solution, c'est-à-dire qu'il n'est plus possible de ralentir suffisamment pour négocier un virage, on s'autorise momentanément à ne pas respecter les contraintes pour continuer d'avancer jusqu'à la fin du trajet. Après cette première passe, il y a des zones où les contraintes ne sont pas respectées (zone A sur la figure 46). La deuxième passe qui est réalisée dans le sens inverse en partant de la fin du trajet permet de corriger ces problèmes. La vitesse de la première passe est intégrée comme une contrainte lors de la deuxième passe. Au final, les contraintes sont respectées partout sauf aux connexions entre passes (zone B sur la figure 46), il ne reste donc plus qu'à connecter les deux passes pour obtenir le profil de vitesse complet.

Cet algorithme à deux passes est très efficace et a été réutilisé dans de nombreux articles par la suite. [Dong et Stori, 2006] tentent de prouver que la solution d'interpolation obtenue est optimale, mais ils ne considèrent toujours que les contraintes d'accélération. La démonstration de l'optimalité de la solution obtenue n'est pas évidente parce qu'elle doit faire intervenir le pas de discrétisation pour définir l'espace des solutions atteignables. Plus récemment, ce même algorithme est réutilisé avec une vision plus mathématique pour écrire le problème d'interpolation sous forme d'un problème de programmation linéaire [Zhang *et al.*, 2012], mais les contraintes de jerk qui sont pourtant essentielles ne sont pas prises en compte.

Pour conclure sur cette approche à deux passes, dans [Dong *et al.*, 2007], les contraintes de jerk sont intégrées dans cet algorithme. Il semble cependant que la connexion entre les deux passes soit beaucoup plus complexe que ce qu'il y paraît. En effet, la prise en compte du jerk augmente énormément la difficulté du problème de connexion. Alors qu'avec les contraintes d'accélération il est possible de modifier très localement le profil de vitesse pour connecter les deux passes (courbe bleue sur la figure 46), avec les contraintes de jerk une grande partie du profil doit être recalculée (courbe orange sur la figure 46). Cela pose d'autant plus de problèmes

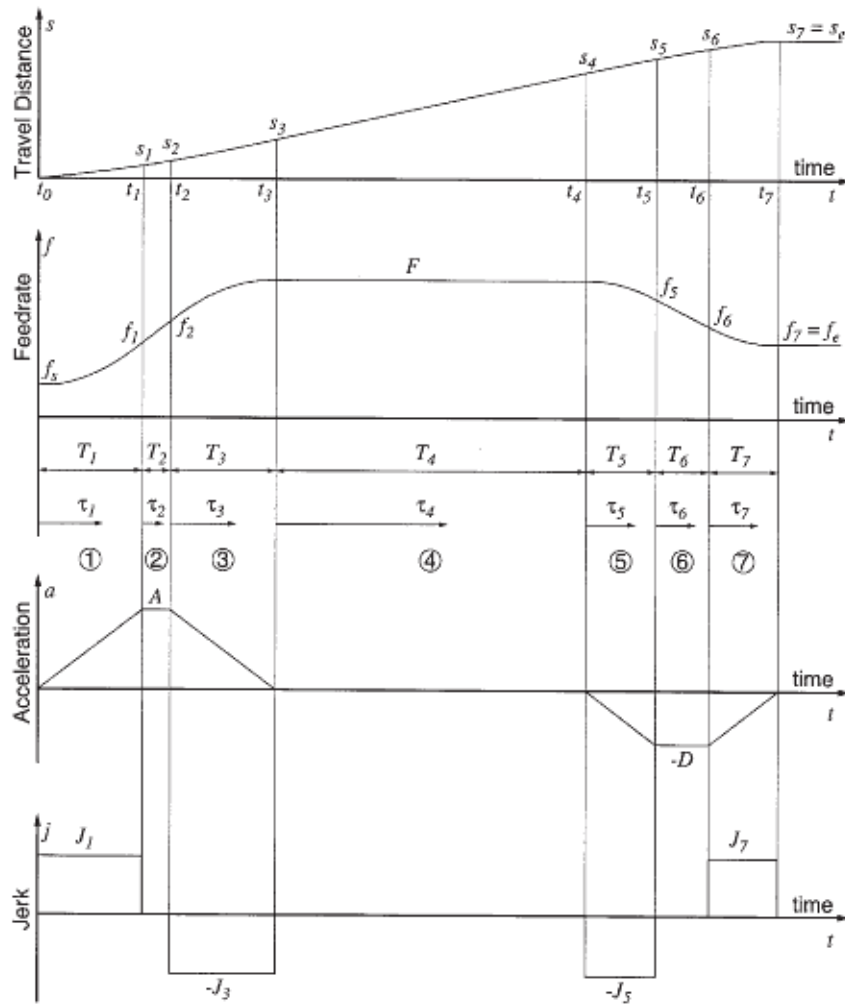


Figure 47 – Profil à jerk limité 7 segments [Erkorkmaz et Altintas, 2001a]

lorsque les zones de connexion se recoupent. Il semble donc que ce type d'algorithme à deux passes soit difficilement applicable lorsque les contraintes de jerk sont prises en compte.

Pour obtenir un profil de vitesse qui respecte les limites de jerk, un profil prédéfini à 7 segments est proposé dans [Erkorkmaz et Altintas, 2001a], figure 47. L'interpolation temporelle consiste à placer bout à bout ces séquences prédéfinies. Cette méthode d'interpolation est relativement simple à mettre en œuvre, par contre le profil prédéfini spécifie le mouvement outil/pièce et donc permet uniquement de limiter le jerk tangentiel. Ainsi, la méthode se complique pour son utilisation avec deux axes ayant des limites cinématiques différentes et il semble impossible d'appliquer ce type de profil prédéfini pour des trajets 5 axes. Cependant, le profil prédéfini est largement réutilisé dans la littérature en intégrant des contraintes sur l'erreur de corde ou sur le calcul temps réel [Nam et Yang, 2004, Lai *et al.*, 2008, Heng et Erkorkmaz, 2010] mais toujours pour des trajets 2 axes. Comme nous allons le voir par la suite, il n'existe que très peu d'articles traitant du problème d'interpolation temporelle en 5 axes.

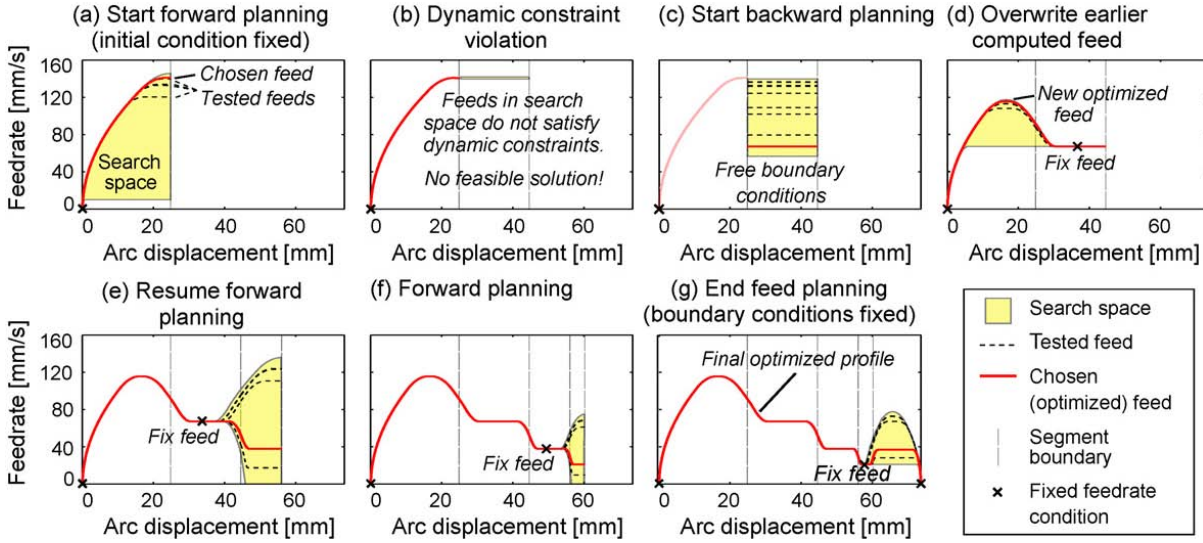


Figure 48 – Algorithme heuristique de recherche de solution d'interpolation temporelle [Erkorkmaz et Heng, 2008]

Une solution intéressante pour ce qui concerne les contraintes de temps de calcul est proposée dans [Erkorkmaz et Heng, 2008] où le profil de vitesse est construit itérativement avec des tests heuristiques, figure 48. Cette question de temps de calcul et de temps réel a été abordée dans le premier chapitre partie 3.2, une solution consiste à être en mesure de fournir une interpolation (non optimale) quand le mouvement physique rattrape la position calculée. Cette stratégie de recherche de solution basée sur un profil prédéfini 7 segments permet ceci, différents profils de vitesse sont testés dans l'espace de recherche en jaune sur la figure 48. Des profils respectant les contraintes peuvent ainsi être fournis au bout d'un temps déterminé.

Le problème d'évaluation de l'abscisse curviligne revient régulièrement dans les articles concernant l'interpolation temporelle. De nombreux articles comparent les développements de Taylor du premier et du deuxième ordre pour interpoler des courbes B-Splines ou NURBS [Farouki et Tsai, 2001, Annoni et al., 2012]. En effet, il est prouvé qu'il est impossible de paramétrer une courbe (autre qu'une droite) par une fonction rationnelle de son abscisse curviligne [Farouki, 2007]. Les erreurs d'évaluation de l'abscisse curviligne des courbes B-Splines introduisent donc des petites fluctuations de la vitesse d'avance. Farouki a donc introduit les PH-curves (Pythagorean-Hodograph curves) qui ont pour propriété de permettre la mesure exacte de leur abscisse curviligne grâce à l'évaluation d'une simple expression polynomiale [Farouki, 2007]. Ces courbes sont intéressantes mathématiquement et présentent certains avantages par rapport aux B-Splines, mais d'un autre côté, les algorithmes d'interpolation et d'approximation par des PH-curves sont extrêmement complexes surtout en 3D. Au final, l'évaluation discrète de l'abscisse curviligne ne semble pas vraiment problématique et donc les courbes B-Splines sont largement utilisées.

Plusieurs méthodes proposent de faire les calculs d'interpolation temporelle de façon discrète-

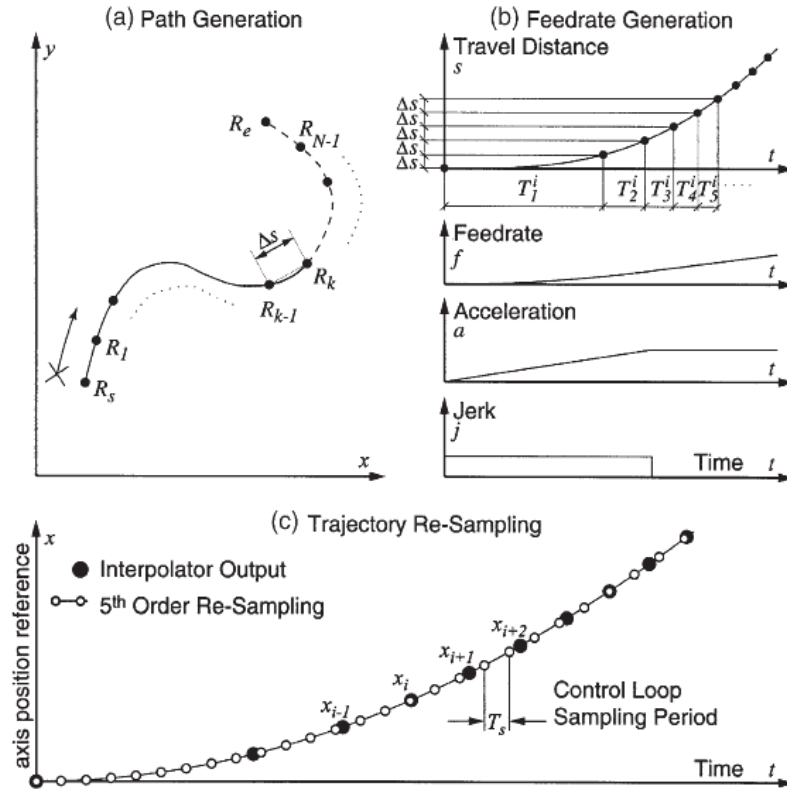


Figure 49 – Rééchantillonnage des consignes [Erkorkmaz et Altintas, 2001a]

tisée. En effet, quelques articles tentent d'utiliser une approche plus mathématique, mais avec les contraintes de jerk le problème devient trop complexe pour être traité de façon analytique. Il existe deux possibilités principales pour discrétiser le problème, une discrétisation en espace $\Delta s = cst$ ou une discrétisation en temps $\Delta t = cst$. Même si la discrétisation en espace est très utilisée, elle semble souffrir d'un inconvénient majeur. Quand la vitesse d'avance est très haute, le pas de temps entre deux points discrétisés devient très petit et donc on obtient une sorte de sur qualité dans l'évaluation des contraintes. Au contraire, quand la vitesse d'avance est très basse, les points calculés sont très espacés temporellement et on manque de données. En effet, en sortie de l'interpolation temporelle, on souhaite disposer de consignes échantillonnées pour le contrôleur. Pour tenter de résoudre ce problème, une méthode de rééchantillonnage utilisant un polynôme de degré 5 est proposée dans [Erkorkmaz et Altintas, 2001a]. Dans la méthode d'interpolation temporelle proposée par Altintas et Erkorkmaz, les points sont interpolés avec un pas Δs constant (points noirs en bas de la figure 49). Lors de la réinterpolation polynomiale de degré 5, on remarque bien qu'au début du trajet de nombreux points sont interpolés entre les points calculés ce qui peut se révéler problématique vis-à-vis du respect des contraintes. Pour éviter ces problèmes, il est plus intéressant d'adopter une discrétisation temporelle avec un pas Δt fixe qui doit être adapté à la dynamique de la machine utilisée comme on le verra par la suite.

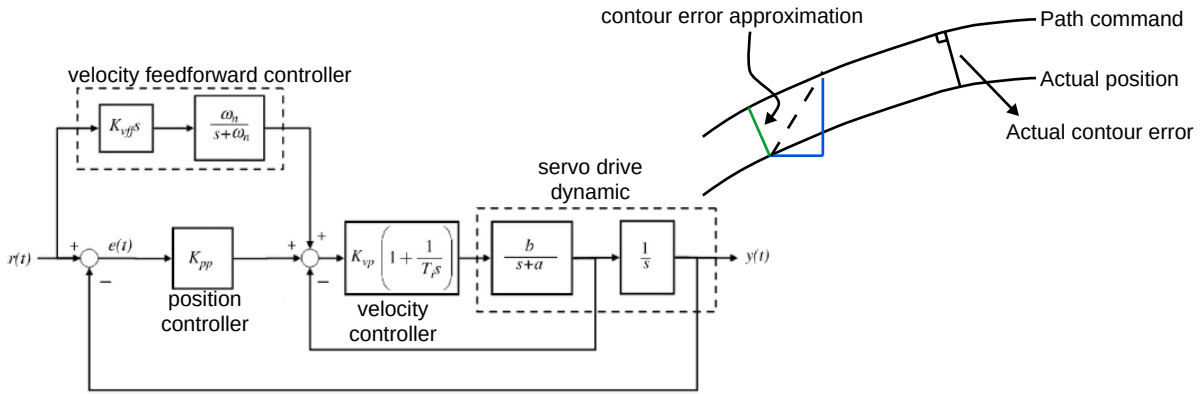


Figure 50 – Intégration de l’erreur de contour dans l’interpolation temporelle d’après [Tsai *et al.*, 2008]

Lors de l’interpolation temporelle, des contraintes autres que les contraintes cinématiques sur les axes peuvent être considérées. [Dong et Stori, 2007] semblent avoir été les premiers à intégrer une contrainte sur l’erreur de contour en utilisant un modèle d’asservissement. Ceci permet de limiter les erreurs de contour en limitant la vitesse d’avance dès la phase d’interpolation temporelle. Les contraintes sur l’écart de contour ainsi que sur le jerk sont également considérées dans [Tsai *et al.*, 2008], figure 50. Un modèle d’asservissement est utilisé pour approximer l’écart de contour à chaque pas de calcul.

Il est aussi intéressant d’introduire des contraintes sur le procédé directement dans l’interpolateur. On peut faire varier la vitesse d’avance pour obtenir un taux d’enlèvement de matière constant et donc des efforts de coupe constants [Farouki *et al.*, 1998]. Il existe de nombreux travaux concernant l’optimisation de la vitesse d’avance visant à maintenir des efforts constants [Baek et Ko, 2008, Merdol et Altintas, 2008]. N’ayant pas accès à l’interpolateur, la plupart de ces optimisations sont effectuées en spécifiant une vitesse d’avance adaptée pour chaque bloc du code G. Cependant, cette stratégie d’optimisation pose des problèmes puisque la vitesse d’avance réelle est souvent différente de la vitesse programmée. L’intégration directe de ces contraintes dans l’algorithme d’interpolation temporelle pourrait résoudre ce problème.

Dans la littérature, on trouve très peu d’articles traitant de trajets multi axes avec des translations et des rotations combinées. Les méthodes avec des profils prédéfinis peuvent difficilement être appliquées à ces situations puisqu’il faut utiliser la transformation géométrique qui est non linéaire pour passer de l’espace des tâches à l’espace machine. Ainsi ni les méthodes à profil prédéfini, ni la méthode à deux passes ne permet de réaliser l’interpolation temporelle des trajets 5 axes en limitant le jerk de chacun des axes.

Pour l’usinage 5 axes avec les contraintes de jerk, Sylvain Lavernhe propose un modèle prédictif de la vitesse d’avance en utilisant une méthode itérative basée sur l’inverse du temps. Cela consiste à dire que, quels que soient les axes mis en jeu lors du mouvement, ils doivent tous démarrer et s’arrêter en même temps [Lavernhe, 2006]. Ainsi cette méthode nécessite

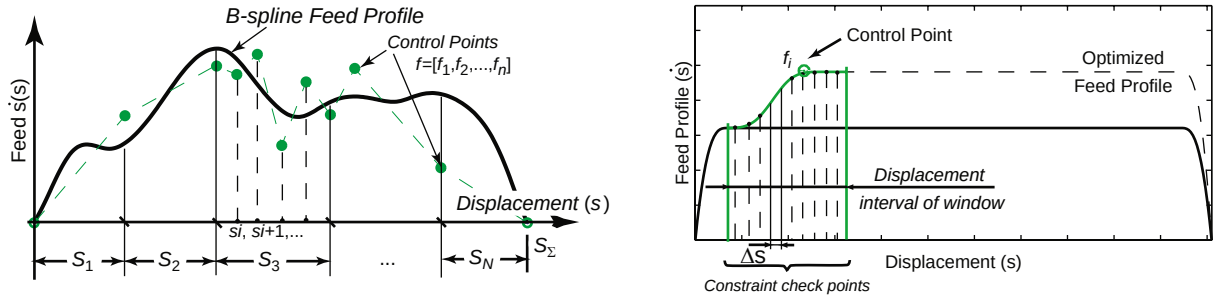


Figure 51 – Algorithme d'interpolation temporelle 5 axes [Sencer *et al.*, 2008]

de connaître des points particuliers de synchronisation et est difficilement applicable au trajet B-Spline. Burak Sencer propose lui d'optimiser itérativement le profil de vitesse qui est défini par une B-Spline cubique, [Sencer *et al.*, 2008]. Comme on peut le voir sur la figure 51, les points de contrôle de la B-Spline représentant le profil de vitesse sont itérativement remontés. Pour réduire la taille du problème, les points de contrôle sont optimisés sur une fenêtre glissante et les contraintes sont vérifiées avec un pas Δs constant (figure 51 droite). Cette méthode est applicable pour les trajets B-Spline, mais elle peut difficilement gérer les forts ralentissements imposés par les trajets G1. De plus, l'optimisation non linéaire effectuée sur la position des points de contrôle du profil de vitesse est difficile à mettre en œuvre et ne garantit pas le respect des contraintes à chaque pas d'échantillonnage.

Suite à cette étude bibliographique, aucune méthode d'interpolation temporelle proposée dans la littérature ne permet de satisfaire les contraintes classiques de l'usinage grande vitesse sur une machine-outil 5 axes. Il est donc nécessaire de développer un nouvel algorithme permettant de limiter le jerk des axes pour l'interpolation de trajets G1 et B-Splines.

En utilisant l'approche découplée définie dans la partie 3.1 du chapitre 1, les étapes de traitement de la géométrie et de planification de la vitesse d'avance peuvent être dissociées. Après avoir vu comment la géométrie pouvait être adaptée dans le chapitre 2, ce chapitre traite de l'algorithme de planification de la loi de mouvement. La figure 52 présente le schéma global de l'interpolateur VPOp (Velocity Profile Optimization) proposé. En entrée le trajet peut être programmé dans un format G1 et traité comme vu au chapitre 2 ou bien défini directement dans un format B-Spline. Ensuite, le trajet continu obtenu est discrétisé afin d'appliquer la transformation géométrique et d'obtenir les trajets articulaires. À partir de là, les contraintes cinématiques sur les axes sont prises en compte pour calculer une vitesse d'avance respectant notamment les limitations en jerk sur chacun des axes. À la fin de cet algorithme, les consignes échantillonnées à envoyer à chaque axe machine sont calculées. La prise en compte des contraintes cinématiques sur les axes permet de faciliter la tâche d'asservissement et d'éviter de solliciter la machine de manière excessive.

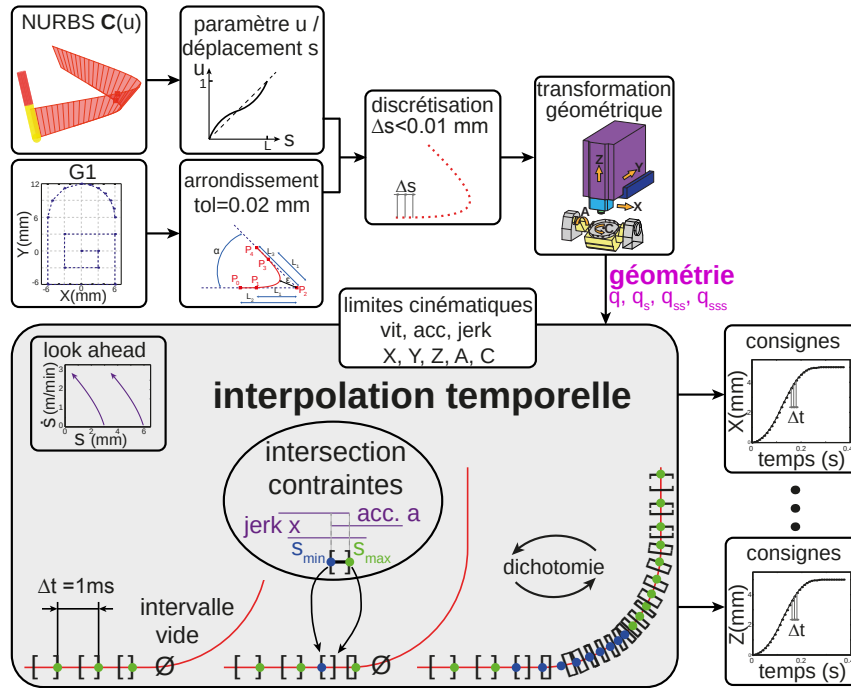


Figure 52 – Schéma global de l'interpolation temporelle VPOp proposée

Le but de ce chapitre est de proposer un algorithme unifié permettant d'effectuer l'interpolation temporelle pour n'importe quel type de structure articulée en respectant les contraintes de jerk à la fois sur les axes et sur le mouvement outil/pièce. Une approche découplée est utilisée pour séparer le problème géométrique du problème temporel. La méthode d'interpolation assure le respect de toutes les contraintes à chaque pas de temps d'interpolation. L'utilisation d'un look ahead basé sur l'analyse de la géométrie et sur la limite supérieure du profil de vitesse aide l'interpolateur dans les zones de forts ralentissements. Grâce au look ahead, cette méthode permet d'interpoler aussi bien des trajets G1 que des trajets B-Spline. De plus, la formulation mathématique utilisée permet de traiter les axes linéaires et rotatifs de la même manière. Finalement, une fois la transformation géométrique connue, cette méthode d'interpolation est applicable aussi bien aux architectures sérielles que parallèles.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit : dans une première partie, les limites physiques associées aux contraintes cinématiques sont explicitées en particulier pour la contrainte sur le jerk. Puis, l'algorithme d'interpolation temporelle à jerk limité est détaillé. Ensuite, des simulations comparées à des mesures expérimentales permettent de démontrer l'efficacité de la solution proposée. Finalement, le logiciel d'interpolation temporelle VPOp est présenté.

2 Les contraintes cinématiques - étude de l'influence du jerk

Nous avons vu précédemment que la vitesse d'avance est limitée par des contraintes sur la cinématique des axes machine. Ces contraintes sont la vitesse, l'accélération et le jerk des

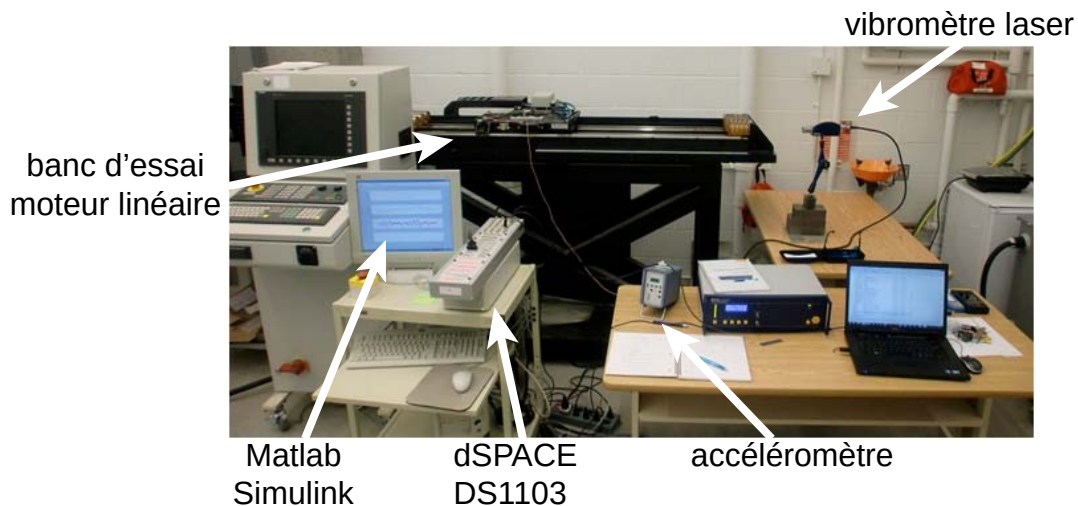


Figure 53 – Dispositif expérimental permettant de mesurer l'influence du jerk sur les vibrations (MAL Vancouver)

axes. Tout d'abord pour ce qui est des limitations en vitesse et accélération, elles viennent tout simplement des capacités maximales du moteur, et sont fonction du choix de la motorisation et du rapport de réduction de l'entraînement.

Tout au long de ce manuscrit, une attention particulière est portée sur la limitation du jerk des axes, car d'après la littérature ce paramètre est fondamental. Pour aller plus loin et comprendre pourquoi le jerk doit être limité et comment le niveau de jerk admissible peut être choisi, nous avons étudié l'influence du niveau de jerk sur les vibrations d'une structure flexible.

La limite de jerk n'est pas liée à la capacité du moteur, mais plutôt à la rigidité de la structure mise en mouvement. Les modes propres de la structure sont donc le facteur déterminant, plus la fréquence du premier mode est haute plus la limite de jerk pourra être élevée. En effet, avec le principe fondamental de la dynamique $masse \cdot accélération = \sum forces$, une variation brusque d'accélération implique une variation brusque de force et donc un choc qui entraînera une vibration de la structure. Ainsi le jerk est limité en fonction de la rigidité de la structure et du niveau de vibration toléré pour le procédé.

Dans la littérature, on trouve quelques explications sur le lien entre le jerk et les vibrations de la structure dans un brevet déposé par Siemens [Quaschner *et al.*, 2003] ainsi que dans le livre de [Groß *et al.*, 2001] également associé à Siemens. Pour ce qui est des travaux universitaires, Richard Béarée a largement étudié ce problème dans sa thèse [Béarée, 2005]. Il montre analytiquement et expérimentalement le lien entre le jerk et la vibration de la structure. Une étude de l'influence sur l'écart de contour est également présentée dans [Béarée *et al.*, 2004]. Tous ces travaux sont très intéressants, mais pour bien comprendre ce phénomène difficile à appréhender, il est important de se faire une idée par soit même grâce à des simulations et des expérimentations simples.

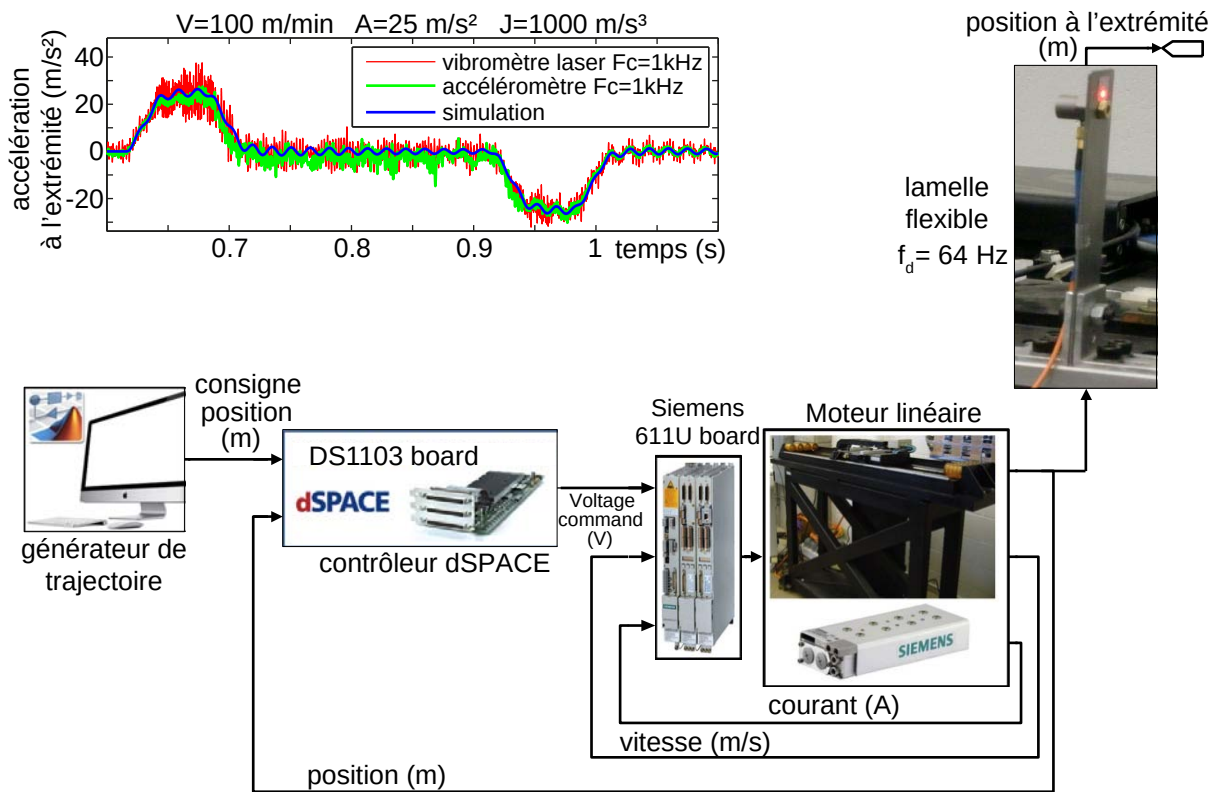


Figure 54 – Modèle Simulink du système

Des essais que nous avons menés au Manufacturing and Automation Laboratory (MAL) de Vancouver dirigé par Yusuf Altintas nous ont permis de mettre en évidence le lien entre jerk et vibrations. Nous avons disposé d'un matériel bien adapté pour cette étude avec un axe linéaire équipé d'une commande ouverte et de systèmes de mesure performants.

La figure 53 présente le banc d'essai utilisé ainsi que les moyens de mesure. Une lamelle flexible est montée sur le banc linéaire piloté par une commande numérique ouverte basée sur le même matériel que celui que nous utilisons au LURPA (carte dSPACE + variateur Siemens 611U), voir figure 54. Le moteur linéaire est asservi par une structure cascade simple (sans anticipation) avec des boucles de courant, vitesse et position. L'accélération de l'extrémité de la lamelle est mesurée grâce à un vibromètre laser et à un accéléromètre. Les incertitudes liées à la mesure étant importantes, cette redondance de moyen de mesure permet de s'assurer de la pertinence des signaux mesurés.

En plus de cet aspect expérimental, un modèle Simulink a été développé. La figure 54 montre la structure générale du modèle. Un modèle du second ordre a été associé à la lamelle flexible de sorte à modéliser la fréquence de résonance ainsi que l'amortissement. L'utilisation d'une lamelle permet d'avoir une structure très simple avec un mode propre dominant parfaitement identifié ce qui simplifie l'analyse des résultats. Finalement, le graphique en haut à gauche de la figure 54 montre la bonne corrélation entre les deux mesures d'accélération et l'accéléra-

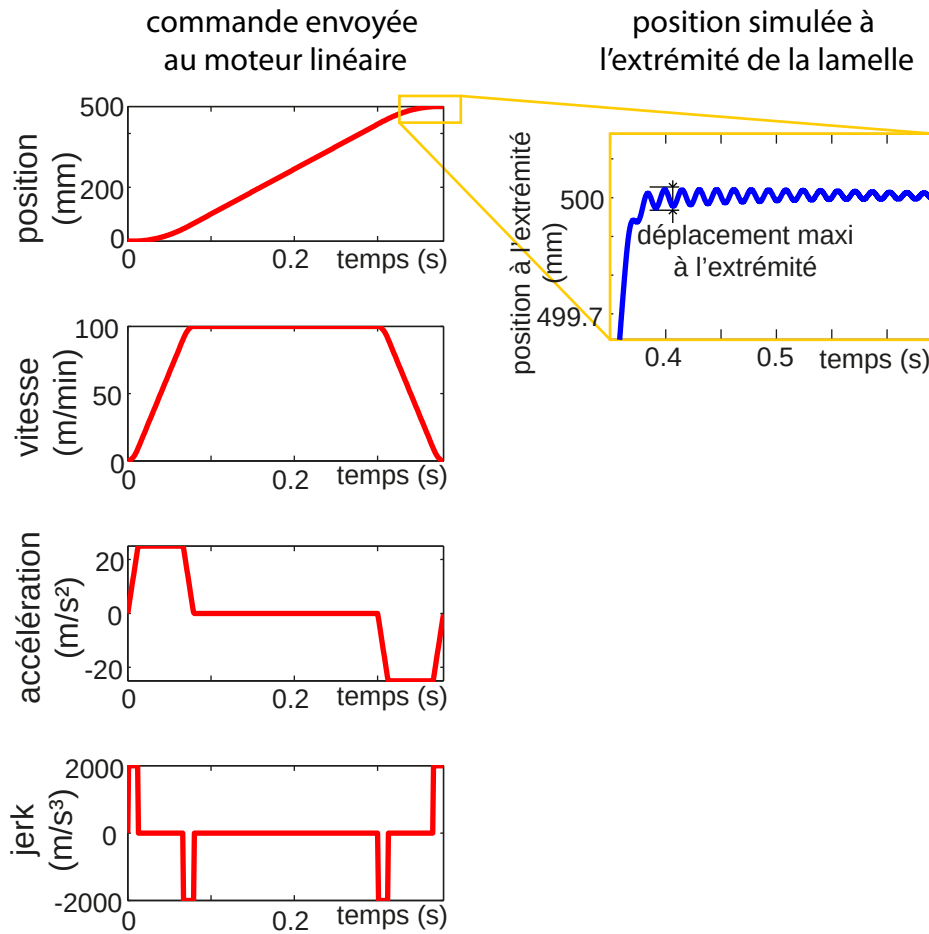


Figure 55 – Oscillations de l'extrémité de la lamelle en fin de trajectoire

tion simulée.

Le filtrage et l'analyse du phénomène oscillatoire pendant le mouvement sont très difficiles à réaliser. En effet, on retrouve une superposition de l'accélération donnée par la consigne (trapèze) et de l'accélération générée par la vibration de la lamelle. Pour cette raison, l'étude s'est focalisée sur la fin du mouvement là où l'axe ne bouge plus et où l'on observe simplement l'oscillation de la lamelle (à partir de 1.05 seconde sur le graphique en haut de la figure 54).

Les essais effectués ont consisté à envoyer des consignes de déplacement au moteur linéaire avec différents paramètres de vitesse, accélération et jerk maximum. Pour ne pas trop rentrer dans les problèmes liés à la répétabilité des mesures expérimentales, seuls les résultats de simulation seront présentés ici. Les travaux de thèse de Richard Béarée [Béarée, 2005] montrent que des mesures soignées permettent d'obtenir expérimentalement ces résultats.

À l'aide du modèle Simulink présenté précédemment, un ensemble de simulation a été réalisé. Des profils classiques à jerk limité (type 7 segments [Erkorkmaz et Altintas, 2001a], voir figure 55) sont utilisés pour générer les consignes de position envoyées au moteur. Pour ne pas perturber l'interprétation, seules les situations non dégénérées (présence des 7 phases) du profil

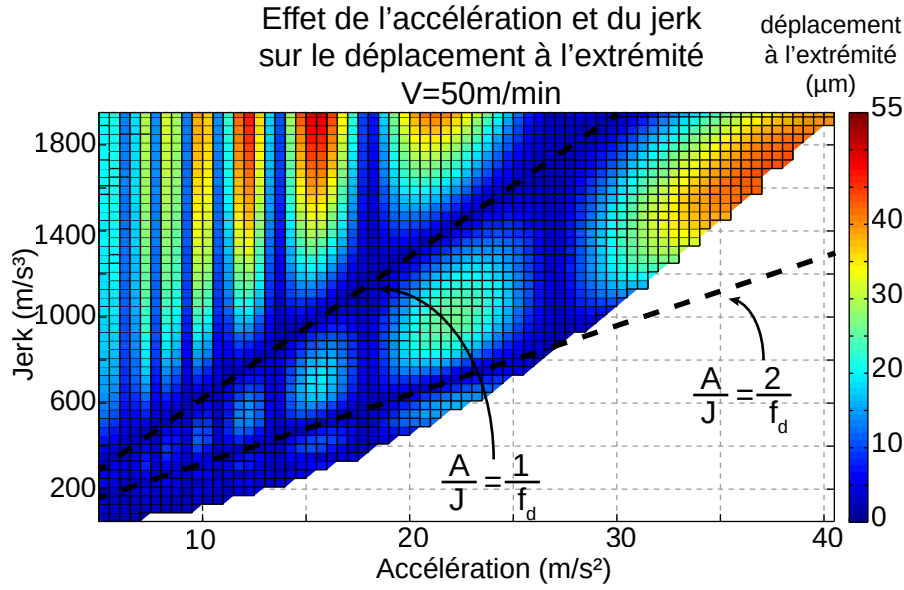


Figure 56 – Effet de l'accélération et du jerk sur le déplacement maximum à l'extrémité de la lamelle

à 7 segments sont conservées, c'est pour cette raison que la portion inférieure droite des graphiques ne contient pas de résultat. En faisant varier les niveaux d'accélération et de jerk maxi (à vitesse maximale constante), le déplacement maximum de la lamelle est relevé en figure 56. On remarque très nettement que les vibrations sont nulles pour les réglages suivants :

$$\frac{A \text{ (m/s}^2\text{)}}{J \text{ (m/s}^3\text{)}} = \frac{n}{f_d \text{ (Hz)}}, \text{ avec } n = 1, 2 \quad (3.1)$$

Pour montrer que ce réglage est indépendant de la vitesse de déplacement, la vitesse et l'accélération sont modifiées à jerk constant. On retrouve encore sur la figure 57 ces zones de vibrations minimales correspondant au réglage présenté dans l'équation 3.1.

Ce résultat montre le lien entre le mode propre de la structure mis en mouvement et les limitations sur les contraintes cinématiques pour une structure idéale. La structure d'une machine-outil réelle présente de nombreux modes propres qui de plus évoluent en fonction de la configuration articulaire. Ainsi, sur la figure 56 si f_d varie et que le jerk est très haut, il y a de forts risques d'atteindre les zones de vibrations maximales. On choisira donc plutôt un jerk pour lequel le niveau de vibration est acceptable, quelle que soit la valeur de l'accélération. D'autant plus que les consignes de position envoyées à une machine-outil peuvent être très différentes de ce profil type à 7 segments.

De façon empirique, un constructeur de machine-outil peut utiliser la relation suivante (Éq. 3.2) pour avoir une idée de la relation entre la valeur du jerk utilisable J , la fréquence du 1^{er} mode propre f_d et le déplacement maximum acceptable δ . Le livre de [Groß et al., 2001] donne une équation plus détaillée qui prend en compte l'amortissement de la structure en plus

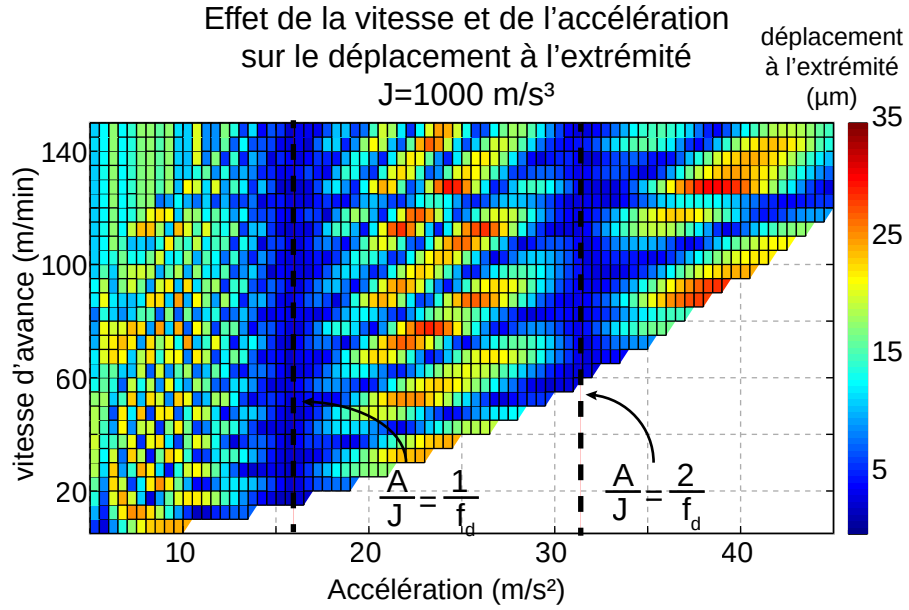


Figure 57 – Effet de la vitesse et de l'accélération sur le déplacement maximum à l'extrémité de la lamelle

de la fréquence propre. Dans tous les cas, la limitation du jerk est proportionnelle au cube de la fréquence propre la plus basse. Étant donné que le jerk est souvent le facteur qui limite la vitesse d'avance, la productivité d'une machine est directement liée à sa rigidité.

$$\delta (\mu\text{m}) \simeq 4000 \frac{J (\text{m/s}^3)}{f_d^3 (\text{Hz})} \quad (3.2)$$

Suite à cette analyse, on comprend pourquoi la limitation du jerk est importante pour les applications d'usinage. Toute cette étude est basée sur un segment de trajectoire, le passage à une trajectoire quelconque n'est pas évident du tout. Cependant, des mesures montrent que le niveau global de vibration est lié à la limite de jerk. En effet, sur la figure 58 un même trajet d'usinage est interpolé grâce au logiciel VPOp en utilisant deux niveaux de jerk. Sur le graphique en bas à gauche, on peut voir que l'évolution du jerk le long de la trajectoire est très saccadée, quel que soit le niveau limite imposé. Néanmoins, en regardant la réponse fréquentielle, les vibrations mesurées à l'extrémité de la structure sont réduites quand le niveau de jerk est bas. On remarque notamment une nette diminution du niveau d'accélération mesurée pour la fréquence propre de la lamelle. D'une manière générale, les trajectoires d'usinage sollicitent un ensemble de fréquences, mais plus le niveau de jerk est bas plus l'énergie de la sollicitation diminue. Pour la suite des travaux, on limitera donc le jerk de chacun des axes machine. En effet, les axes peuvent avoir des modes propres très différents les uns des autres.

Des solutions complémentaires à la limitation du niveau de jerk peuvent également être mises en place. Des systèmes actifs ou semi-actifs peuvent diminuer les vibrations [Verl et Frey, 2012, Brecher *et al.*, 2008], un filtrage de la commande (input shaping) peut limiter l'excitation

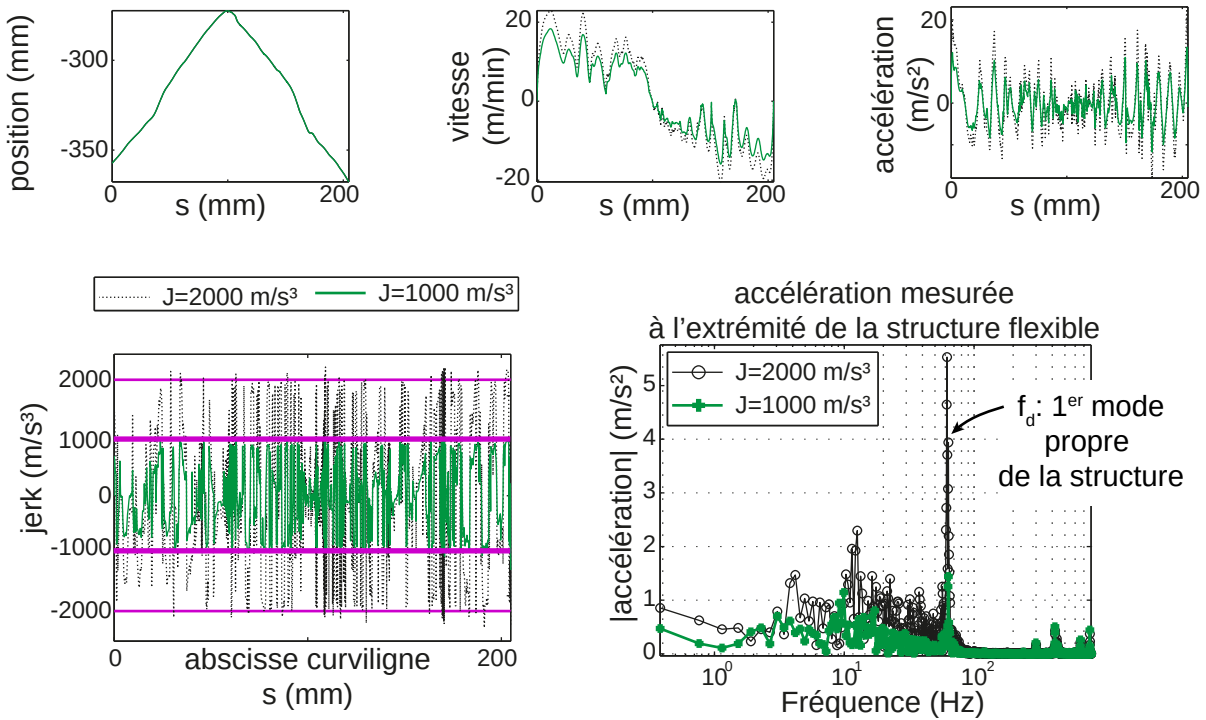


Figure 58 – Influence du jerk sur les vibrations pour une trajectoire complexe

des modes propres de la structure [Altintas et Khoshdarregi, 2012, Dietmair et Verl, 2009]... Ces techniques spécifiques ne sont pas étudiées dans le cadre de cette thèse.

Cette étude de l'influence du niveau de jerk sur la vibration de la structure permet de mieux comprendre pourquoi il est important de limiter le jerk. On a également plus d'informations sur les critères de choix utilisés pour déterminer les niveaux de jerk de chacun des axes de notre machine-outil. Cependant, l'optimisation de ces paramètres ne fait pas l'objet d'études dans le cadre de cette thèse. Les niveaux de jerk utilisés pour piloter notre machine 5 axes sont ceux initialement réglés par la société Mikron et l'interpolation temporelle aura pour but de respecter les niveaux définis.

3 L'interpolation temporelle VPOp

L'interpolation temporelle a pour but de trouver la loi de mouvement respectant les contraintes cinématiques le long d'un trajet fixé. Après un bref rappel des équations fondamentales et des contraintes à prendre en compte lors de l'interpolation temporelle, la méthode discrétisée et itérative VPOp (Velocity Profile Optimization) est explicitée.

Les trois équations fondamentales de la thèse ont été présentées et utilisées dans le chapitre 2. Cependant, une approximation a été effectuée pour obtenir la limite supérieure du profil de vitesse. Comme nous l'avons vu, cette limite est très intéressante, mais l'approximation est trop grossière quand il s'agit de générer des consignes à envoyer aux axes machine.

Ce chapitre propose une méthode de résolution du problème d'interpolation temporelle qui conserve chacun des termes des équations 3.3 à 3.5 pour trouver une loi de mouvement ($\dot{s}$, $\ddot{s}$, $\dddot{s}$) qui respecte toutes les contraintes sur les axes. Le chapitre 2 a permis de fixer la géométrie du trajet, ainsi les dérivées géométriques $\mathbf{q}_s$, $\mathbf{q}_{ss}$, $\mathbf{q}_{sss}$ sont maintenant connues.

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{d\mathbf{q}}{ds} \frac{ds}{dt} = \mathbf{q}_s \dot{s} \quad (3.3)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{ss} \dot{s}^2 + \mathbf{q}_s \ddot{s} \quad (3.4)$$

$$\dddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{sss} \dot{s}^3 + 3\mathbf{q}_{ss} \dot{s} \ddot{s} + \mathbf{q}_s \dddot{s} \quad (3.5)$$

Les contraintes sur les vitesses, accélérations et jerks des axes sont rappelées dans l'équation 3.6, avec $i = 1..5$ pour désigner les 5 axes XYZAC.

$$|\dot{q}_j^i| \leq V_{max}^i ; |\ddot{q}_j^i| \leq A_{max}^i ; |\dddot{q}_j^i| \leq J_{max}^i \quad \forall \text{ point } j \text{ du trajet} \quad (3.6)$$

Le problème d'interpolation temporelle ne peut pas être résolu analytiquement, c'est pourquoi de nombreuses approches discrétisées sont utilisées. Comme nous l'avons vu dans l'introduction de ce chapitre, il est préférable d'utiliser une discrétisation temporelle à Δt fixé. Dans la suite, on se servira du schéma de dérivation présenté dans l'équation 3.7 pour calculer la vitesse, l'accélération et le jerk.

$$\dot{s}_{j+1} = \frac{s_{j+1} - s_j}{\Delta t}, \quad \ddot{s}_{j+1} = \frac{\dot{s}_{j+1} - \dot{s}_j}{\Delta t}, \quad \dddot{s}_{j+1} = \frac{\ddot{s}_{j+1} - \ddot{s}_j}{\Delta t} \quad (3.7)$$

3.1 Discrétisation des contraintes

En utilisant la discrétisation temporelle (Eq. 3.7), chaque contrainte peut être exprimée sous forme d'une inéquation polynomiale de degré 1, 2 ou 3. En effet, les dérivées temporelles des inéquations 3.6 sont remplacées par les expressions 3.3 à 3.5 qui sont discrétisées avec l'équa-

tion 3.7. On obtient ainsi les inéquations polynomiales 3.8 à 3.10. Le paramètre inconnu s_{j+1} représente la position du point suivant le long du trajet, les fonctions f dépendent des dérivées géométriques.

$$-V_{max}^i \leq q_{s,j+1}^i \cdot \frac{s_{j+1} - s_j}{\Delta t} \leq V_{max}^i \quad (3.8)$$

$$-A_{max}^i \leq s_{j+1}^2 \cdot f_{A2} + s_{j+1} \cdot f_{A1} + f_{A0} \leq A_{max}^i \quad (3.9)$$

$$-J_{max}^i \leq s_{j+1}^3 \cdot f_{J3} + s_{j+1}^2 \cdot f_{J2} + s_{j+1} \cdot f_{J1} + f_{J0} \leq J_{max}^i \quad (3.10)$$

Les fonctions f_{A0} , f_{A1} , f_{A2} utilisées dans l'équation 3.9 sont explicitées par les équations 3.11 à 3.13. Les fonctions f_{J0} , f_{J1} , f_{J2} , f_{J3} peuvent être obtenues de la même façon, équations 3.14 à 3.17. Toutes ces fonctions dépendent des positions s_j , s_{j-1} , s_{j-2} calculées lors des itérations précédentes et des dérivées géométriques au point $j + 1$ qui sont approximées.

$$f_{A2} = \frac{q_{ss,j+1}^i}{\Delta t^2} \quad (3.11)$$

$$f_{A1} = \frac{1}{\Delta t^2} \cdot (q_{s,j+1}^i - q_{ss,j+1}^i \cdot 2s_j) \quad (3.12)$$

$$f_{A0} = \frac{1}{\Delta t^2} \cdot (q_{ss,j+1}^i \cdot s_j^2 + q_{s,j+1}^i (s_{j-1} - 2s_j)) \quad (3.13)$$

$$f_{J3} = \frac{q_{sss,j+1}^i}{\Delta t^3} \quad (3.14)$$

$$f_{J2} = \frac{1}{\Delta t^3} \cdot (-3q_{sss,j+1}^i \cdot s_j + 3q_{ss,j+1}^i) \quad (3.15)$$

$$f_{J1} = \frac{1}{\Delta t^3} \cdot (3q_{sss,j+1}^i \cdot s_j^2 - 3q_{ss,j+1}^i (2s_j + \Delta t \dot{s}_j) + q_{s,j+1}^i) \quad (3.16)$$

$$f_{J0} = \frac{1}{\Delta t^3} \cdot (-q_{sss,j+1}^i \cdot s_j^3 + 3q_{ss,j+1}^i \cdot s_j (s_j + \Delta t \dot{s}_j) - q_{s,j+1}^i \cdot (s_j + \Delta t \dot{s}_j + \Delta t^2 \ddot{s}_j)) \quad (3.17)$$

3.2 Approximation des dérivées géométriques

Avant de débiter l'interpolation temporelle, le trajet programmé est discrétisé afin de calculer l'abscisse curviligne s . La discrétisation est choisie suffisamment fine pour évaluer l'abscisse curviligne et interpoler linéairement entre les points discrets sans introduire d'écart géométrique

significatif. Sur un trajet quelconque, on choisira typiquement un pas de discrétisation de l'ordre de 1 à 10 μm le long de l'abscisse curviligne, ainsi on peut obtenir des écarts de flèche d'un ordre de grandeur inférieur au micron. Cette discrétisation peut être aussi fine que nécessaire pour garantir le respect d'un écart de flèche spécifié. Ensuite, la transformation géométrique est appliquée sur les points discrétisés ce qui permet de considérer que l'interpolation linéaire dans l'espace articulaire introduit des défauts négligeables pour le processus de fabrication. Les dérivées géométriques sont également calculées à partir de cette discrétisation et interpolées linéairement. Finalement, on dispose d'un tableau de correspondance entre le trajet dans l'espace pièce, l'abscisse curviligne, le trajet dans l'espace machine et les dérivées géométriques premières, deuxièmes et troisièmes.

Dans les équations 3.11 à 3.13, les dérivées géométriques au point $j + 1$ sont utilisées, ces valeurs doivent être estimées puisqu'elles dépendent de s_{j+1} qui est inconnu. Comme l'évolution le long du trajet est très lissée, il est possible d'avoir une bonne approximation de s_{j+1} et donc des dérivées géométriques en s_{j+1} avec l'équation 3.18.

$$q_{s,j+1} = q_s(s_{j+1}) \simeq q_s(s_j + \Delta t(\dot{s}_j + \Delta t\ddot{s}_j)) \quad (3.18)$$

Cependant, les erreurs commises avec cette approximation des dérivées géométriques peuvent entraîner une mauvaise évaluation des contraintes et en particulier du jerk dans les zones de fortes variations géométriques. En effet, d'après le schéma de dérivation numérique 3.7, une très petite variation de la position ($< 1\mu m$) peut entraîner une variation importante du jerk.

Pour résoudre ce problème et éviter le dépassement des contraintes de jerk, le niveau de jerk est vérifié à chaque itération avec la formule de l'équation 3.19. Si le jerk est trop élevé, la position q_{j+1}^i est corrigée en inversant la formule avec J_{j+1}^i égal au jerk maxi de l'axe. Avec cette vérification, il est possible d'assurer que le jerk ne dépassera jamais la tolérance imposée sur le respect des contraintes. Généralement, le dépassement autorisé est fixé à 120% de la limite maxi. Si la limite de jerk est fixée à $10m/s^3$, le jerk maximum accepté est de $12m/s^3$. Le respect strict de la contrainte enlève une partie importante de l'espace de solution et aboutirait donc à l'obtention d'un profil de vitesse bien moins performant.

$$J_{j+1}^i = \frac{q_{j+1}^i - 3q_j^i + 3q_{j-1}^i - q_{j-2}^i}{\Delta t^3} \quad (3.19)$$

Les contraintes cinématiques sont importantes, mais on peut se demander si leur respect strict est absolument nécessaire. Les mesures sur la commande numérique 840D montrent que les algorithmes industriels s'autorisent à dépasser localement les contraintes dans les zones difficiles sans que ça soit préjudiciable pour l'usinage. Il est difficile de dire à partir de quel moment le non-respect des limitations de jerk entraînera des problèmes de vibrations sur la machine-outil. Cependant, on verra dans le chapitre 4 que les consignes calculées lors de l'interpolation temporelle sont possiblement filtrées par l'asservissement et par la structure mécanique. Il n'est

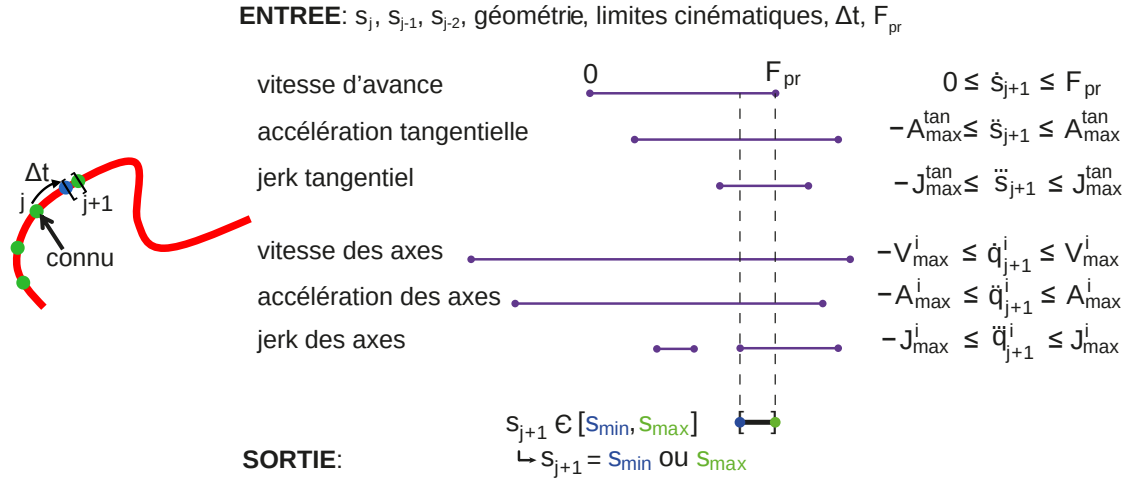


Figure 59 – Principe d'intersection des contraintes

donc pas anormal d'autoriser localement un léger dépassement des contraintes.

3.3 Principe d'intersection des contraintes

Le but de l'algorithme est de calculer le prochain point du trajet atteignable à une période Δt fixe connaissant les caractéristiques cinématiques sur les points précédents. Le principe d'intersection des contraintes est utilisé pour connaître la plage de variation admissible sur la position du prochain point. Un intervalle sur lequel la contrainte est vérifiée est obtenu en résolvant les inéquations 3.8 à 3.10. Finalement, comme on le voit sur la figure 59, l'intersection de tous ces intervalles donne l'intervalle solution $[s_{\min}, s_{\max}]$ sur lequel toutes les contraintes sont respectées. Il est possible d'obtenir un intervalle solution continu ou discontinu $([s_{\min}, s_2] \cup [s_3, s_{\max}])$. Dans tous les cas, les solutions retenues sont les positions extrêmes atteignables respectant les contraintes. Le choix de prendre $s_{j+1} = s_{\min}$ ou $s_{j+1} = s_{\max}$ plutôt que n'importe quel point appartenant à l'intervalle restreint l'espace de solutions accessibles, mais cela simplifie beaucoup l'algorithme. L'intervalle de solution peut également être vide, c'est le cas par exemple quand la vitesse d'avance est trop élevée à l'entrée d'un virage serré.

3.4 Fonctionnement détaillé de l'interpolation temporelle

Le principe itératif utilisé pour trouver la séquence $(s_{\min}, s_{\max})$ à utiliser est schématisé sur la figure 60, un ensemble de tests est effectué pour trouver les zones où il faut prendre la borne minimale de l'intervalle pour réduire la vitesse d'avance. Pour montrer précisément comment fonctionne l'algorithme développé, une explication point par point est fournie sur un exemple très simple. Pour l'exemple, le trajet à suivre est une droite et le but est d'atteindre la vitesse programmée. La vitesse d'avance est seulement limitée par les contraintes sur la vitesse programmée et sur le jerk qui sont respectivement de $5m/min$ et $5m/s^3$. La figure 61 montre

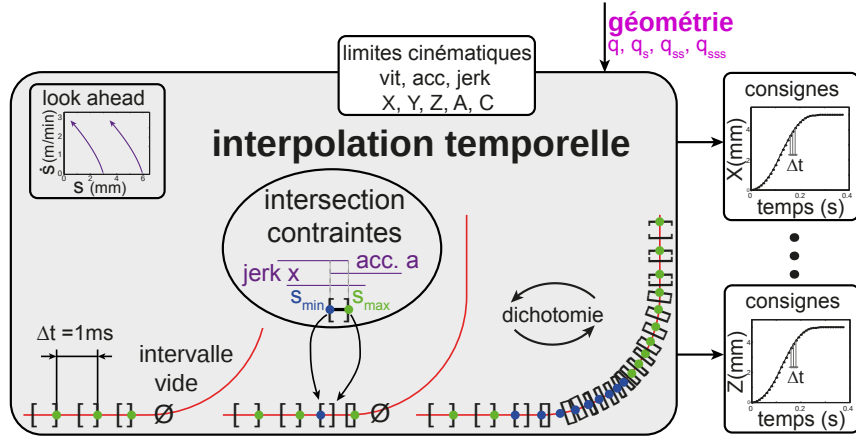


Figure 60 – Principe itératif de recherche du profil de vitesse

tous les points calculés par l'algorithme.

Sur la figure 61a, on peut voir que l'algorithme commence par aller le plus vite possible en prenant la borne maxi de l'intervalle à chaque pas. Au point $j = 18$, on se retrouve dans une situation où l'intersection des contraintes donne un intervalle vide, il n'y a plus de solutions pour ne pas dépasser la vitesse programmée tout en respectant la contrainte de jerk. Cela signifie que la séquence utilisée pour les points précédents n'est pas bonne. Pour trouver le point où il faut prendre la borne mini de l'intervalle au lieu de la borne maxi, une recherche par dichotomie est effectuée. L'idée est de dire que s'il est possible de trouver une séquence qui permet d'atteindre vitesse nulle ($\dot{s} = 0$), il sera toujours possible de moduler la vitesse par la suite pour atteindre la vitesse programmée. Pour atteindre $\dot{s} = 0$, il faut décélérer le plus possible donc une séquence qui utilise s_{min} à chaque pas est testée. Le dernier point à partir duquel il est possible d'attendre $\dot{s} = 0$ est identifié par dichotomie. Sur la figure 61b, s_{min} est choisi à partir du point $j = 9$ et $\dot{s} = 0$ est atteint, il est donc possible de rester à s_{max} plus longtemps. Pour $j = 13$, $\dot{s} = 0$ est atteint également. Donc en figure 61c, $j = 15$ est testé et on arrive de nouveau dans une situation où l'intervalle est vide. Le dernier point à tester pour la dichotomie est $j = 14$ et là encore aucune solution ne peut être trouvée. Après ces essais, il est certain qu'il faut choisir $s_{13} = s_{min}$ pour trouver une solution à l'interpolation temporelle. Une fois que la recherche par dichotomie est finie, l'algorithme recommence et on essaye à nouveau d'aller le plus vite possible en prenant s_{max} à chaque pas. Finalement, la figure 61d montre tous les points qui ont dû être calculés pour atteindre la vitesse d'avance programmée sans dépasser les contraintes. Sur la figure 61e, on peut voir que le profil temporel généré est lissé grâce à la contrainte sur le jerk. Finalement, la figure 61f montre bien que les contraintes de jerk sont respectées tout au long du profil. Après le point $j = 27$, le paramètre limitant est la vitesse d'avance programmée. La séquence de jerk trouvée par cet algorithme contient des pics et n'est pas la séquence parfaite qu'on pourrait attendre théoriquement (figure 47). Mais un algorithme discrétisé créera toujours ce genre de solution puisque la solution optimale n'est pas contenue dans l'espace des solutions

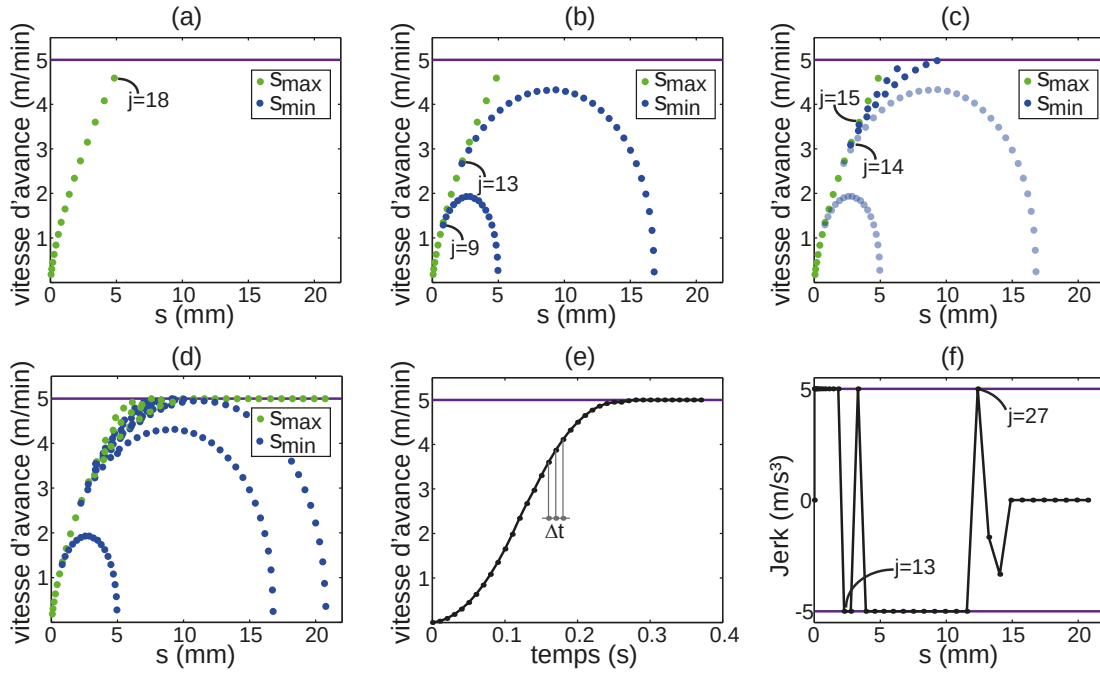


Figure 61 – Points calculés pour atteindre la vitesse programmée sur un trajet linéaire avec une contrainte de jerk

discrétisées atteignables. Une meilleure solution pourrait être atteinte en choisissant des points au milieu de l'intervalle $[s_{min}, s_{max}]$ mais ce serait aux dépens de la complexité et du temps de calcul de l'algorithme.

Le fonctionnement de l'algorithme est détaillé sur une droite, mais le même genre de problème est rencontré lors de l'interpolation d'un angle à forte courbure comme schématisé sur la figure 60. Donc en utilisant cette technique de dichotomie, on peut trouver le dernier point pour lequel $\dot{s} = 0$ peut être atteint. S'il est possible de trouver une séquence permettant d'atteindre $\dot{s} = 0$ (vitesse nulle), il sera en général possible de trouver une séquence qui respectera toutes les contraintes sur n'importe quelle géométrie. Ici, on suppose que s'il est possible d'atteindre $\dot{s} = 0$, on pourra toujours aller plus loin le long de la géométrie. En réalité, cet algorithme doit parfois revenir en arrière parce que si la décélération est trop forte, il n'est pas possible de trouver une solution permettant de s'arrêter avec $\dot{s} = 0$ et $\ddot{s} = 0$.

L'utilisation de la dichotomie permet de limiter énormément le nombre de calculs à effectuer et permet donc de proposer un algorithme avec un temps de calcul acceptable.

3.5 Algorithme de recherche de solution

Les principales étapes de l'algorithme d'interpolation temporelle sont décrites en pseudo-code. Il est clair que l'algorithme ci-dessous présente seulement les grandes lignes de la solution proposée. À partir de cette stratégie de recherche de solution, un travail de programmation non négligeable doit être réalisé pour obtenir un code robuste. Pour prouver la qualité des algorithmes Matlab développés, le programme peut être librement testé comme on le verra dans la

partie 4.5.

Contrairement à certains articles de la littérature, il n'y a pas de revendication sur le fait que la solution d'interpolation temporelle obtenue par l'algorithme VPOp soit optimale. En effet, suivant le pas de temps Δt et le schéma de dérivation utilisé, des solutions légèrement différentes peuvent être obtenues. L'algorithme présenté ici n'a pas pour but d'être optimal, mais il est robuste et fournit une solution qui est en général assez proche de la solution optimale.

Pseudo code :

Traiter la géométrie

Appliquer le look ahead pour chaque transition G1 et pour la fin du trajet

while la fin du trajet n'est pas atteinte **do**

 Calculer l'intervalle résultant de l'intersection des contraintes

if intersection vide **then**

while la fin de la dichotomie n'est pas atteinte **do**

 Utiliser la dichotomie pour trouver le point j où $s_j = s_{min}$ doit être choisi.

end while

else

$s_{j+1} = s_{max}$

end if

end while

3.6 Implémentation d'un look ahead

Dans la littérature, le mot « look ahead » est associé à différents algorithmes ou principes. Dans tous les cas, cela consiste à regarder à l'avance le trajet à interpoler. Cependant, cette analyse peut être faite au fur et à mesure de l'exécution où en amont du calcul. La procédure de look ahead utilisée dans cette thèse peut être effectuée complètement en amont de l'interpolation temporelle. En effet, sur un trajet G1, on sait par avance que la vitesse à la transition entre les segments sera probablement très basse. Donc un algorithme de look ahead est utilisé pour prévoir ces ralentissements, cela permet de réduire considérablement le nombre d'itérations nécessaires à la recherche du profil de vitesse. Avec le look ahead, le profil de décélération nécessaire pour franchir ces transitions entre blocs est estimé par avance. En prenant l'exemple de la figure 62, le chapitre 2 nous permet d'arrondir la discontinuité G1, on connaît donc le point B milieu de la courbe d'arrondissement. En choisissant de passer au point B avec une accélération et un jerk nul, il est possible de déterminer la vitesse V_B qui permet de franchir la discontinuité en respectant les contraintes cinématiques des équations 3.3 à 3.5. Avec ces conditions aux limites, l'algorithme d'interpolation présenté précédemment est appliqué en reculant le long du trajet et en prenant toujours la borne maxi de l'intervalle. Contrairement aux algorithmes en 2 passes, il n'y a pas besoin de connecter cette limite obtenue en reculant à un profil obtenu

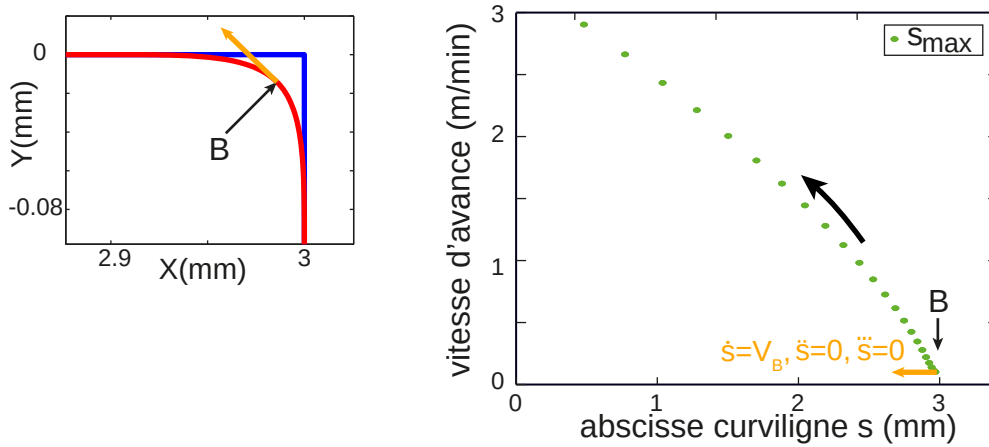


Figure 62 – Exemple d'application du look ahead

dans le sens normal. En effet, les points calculés par le look ahead sont considérés comme une contrainte supplémentaire à ne pas dépasser qui est ajoutée aux autres contraintes de la figure 59. Ainsi les points calculés par l'algorithme sont guidés par cette contrainte supplémentaire comme on le verra sur la figure 67.

Avec un trajet défini par une B-Spline, il n'y a pas d'indication à priori sur les zones critiques, on ne peut donc pas appliquer le look ahead par avance. De plus, sur les trajets 5 axes, la courbure ne donne pas vraiment d'indication sur les zones nécessitant un fort ralentissement. En effet, il est nécessaire de prendre en compte la transformation géométrique et les limites cinématiques des axes pour prédire les ralentissements. Donc pour les trajets B-Spline, cette technique de look ahead n'est utilisée que quand l'algorithme d'interpolation temporelle détecte une zone problématique de réduction de vitesse.

Après avoir présenté le fonctionnement global de l'algorithme développé, la suite de ce chapitre va permettre de montrer les résultats obtenus sur trois exemples représentatifs.

4 Simulations et résultats expérimentaux

Les essais sont effectués sur la machine 5-axis Mikron UCP710 du laboratoire dont les caractéristiques cinématiques sont fournies dans le tableau 1. Pour ces essais, la machine est pilotée par la commande numérique Siemens 840D qui offre la possibilité de mesurer les consignes de position en sortie d'interpolateur. Le temps de cycle de la boucle d'asservissement en position est de 6ms.

Les vitesses, accélérations et jerks de chacun des axes machine sont calculés à partir des mesures des consignes de position. Comme on peut le voir sur la figure 63, cette mesure est effectuée avant même l'asservissement. On évite ainsi d'introduire le bruit mécanique qui peut être mesuré sur les codeurs. Le temps de cycle Δt utilisé dans l'algorithme d'interpolation

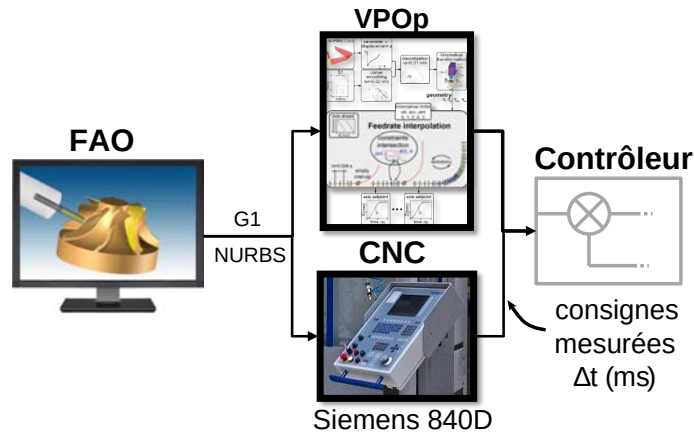


Figure 63 – Comparaison des consignes calculées par la commande numérique Siemens 840D et par VPOp.

VPOp (Velocity Profile Optimization) n'est pas limité. Cependant, pour faire une comparaison correcte, l'interpolation temporelle est effectuée avec un pas de temps de $6ms$. De plus, les dérivées sont toujours calculées de la même manière en utilisant l'équation 3.7.

Les temps de calcul obtenus sur un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core Duo P8700 2.53 GHz sont donnés pour information. Ces temps de calcul, qui sont de l'ordre de grandeur du temps d'usinage, sont tout à fait satisfaisants compte tenu du fait que l'ensemble des algorithmes est codé sous Matlab. En effet, une meilleure implémentation du code peut sans difficulté diviser le temps d'exécution par 10. Comme nous l'avons vu dans le chapitre d'introduction, l'interpolation n'est pas nécessairement extrêmement rapide, il suffit d'être un peu plus rapide que l'usinage.

4.1 Trajet 2 axes en B-Spline natif

Comme nous l'avons vu précédemment, la meilleure solution pour décrire un trajet courbe est d'utiliser un format polynomial au lieu de discrétiser et de réinterpoler un ensemble de points. Le format B-Spline est tout à fait bien adapté d'autant plus qu'il peut être généré par les logiciels de FAO et interprété par les commandes numériques industrielles. Ce format facilite

	X	Y	Z	A	C	tangentiel
V_{max} ($m/min - tr/min$)	30	30	30	15	20	F_{pr}
A_{max} ($m/s^2 - tr/s^2$)	2,5	3	2,1	0,83	0,83	10
J_{max} ($m/s^3 - tr/s^3$)	5	5	50	5	100	100

Tableau 1 – Limites cinématiques de la machine Mikron

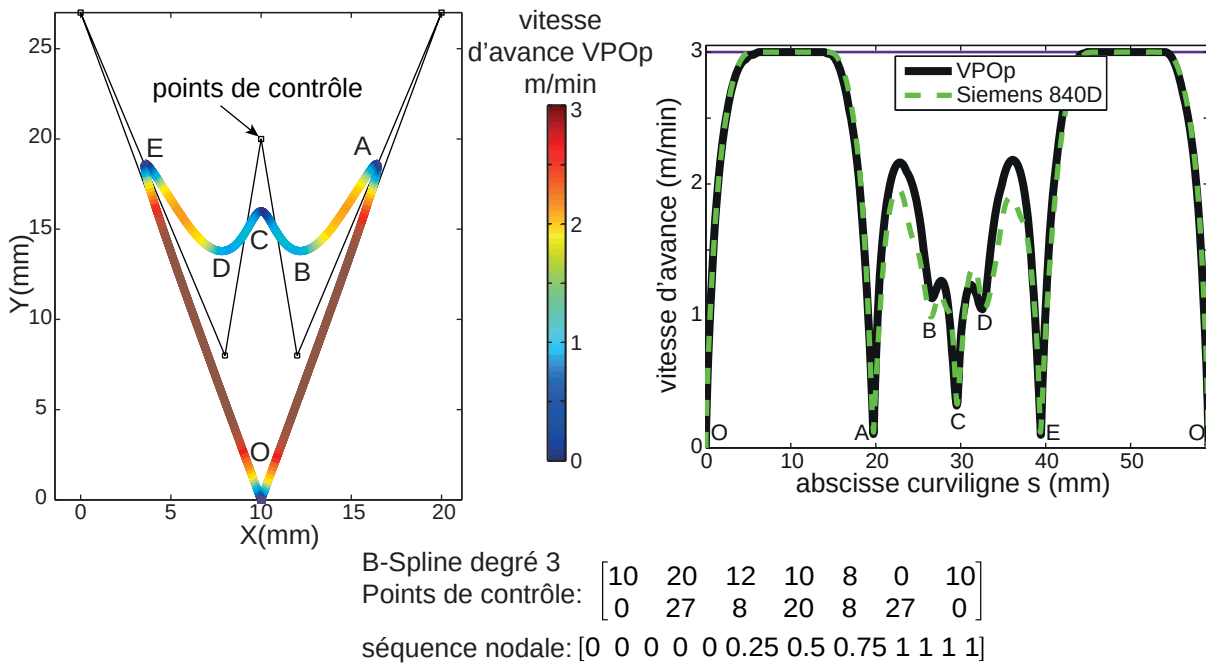


Figure 64 – Trajet trident format B-Spline

l'interpolation temporelle puisqu'il n'y a pas besoin d'effectuer de traitement sur la géométrie fournie, c'est pourquoi de nombreux articles de recherche utilisent exclusivement ce format. Avec une description B-Spline, le seul traitement à effectuer avant l'interpolation temporelle et de trouver la relation entre le paramètre u de la courbe et son abscisse curviligne s .

L'exemple du trajet B-Spline de degré 3 en forme de trident est inspiré de la courbe utilisée dans [Lin *et al.*, 2007]. Ce trajet a été modifié parce que le trident original était défini par une courbe de degré 2 qui n'est donc pas $\mathcal{G}^2$ à la connexion entre les arcs. Cet exemple est intéressant, car il contient des portions linéaires où la vitesse d'avance programmée peut être atteinte et des portions à forte courbure qui constituent des difficultés pour l'interpolateur. De plus, le trajet est symétrique donc dans l'idéal, le profil de vitesse devrait également être symétrique.

La figure 64 montre la géométrie du trident ainsi que la vitesse d'avance respectant les contraintes cinématiques. Sur ce trajet 2D, la vitesse d'avance est directement liée à la courbure. Ce lien est clair pour les trajets 2D avec deux axes cinématiquement équivalents, cependant on verra par la suite que la situation est tout à fait différente pour les trajets multi axes combinant des axes linéaires et rotatifs. Le profil de vitesse en fonction de l'abscisse curviligne est présenté sur la droite de la figure 64. Sur cet exemple, on peut voir quelques différences entre la vitesse mesurée sur la commande numérique Siemens 840D et la vitesse calculée par l'algorithme VPOp. En effet, la commande numérique Siemens trouve un résultat un peu moins performant. Sur la figure 65, on retrouve l'évolution de la position, de la vitesse, de l'accélération et du jerk pour les axes X et Y (calculés avec la formule 3.7). Pour cet exemple, les paramètres limitants sont les jerks des axes et la vitesse d'avance programmée. Les vitesses et accélérations

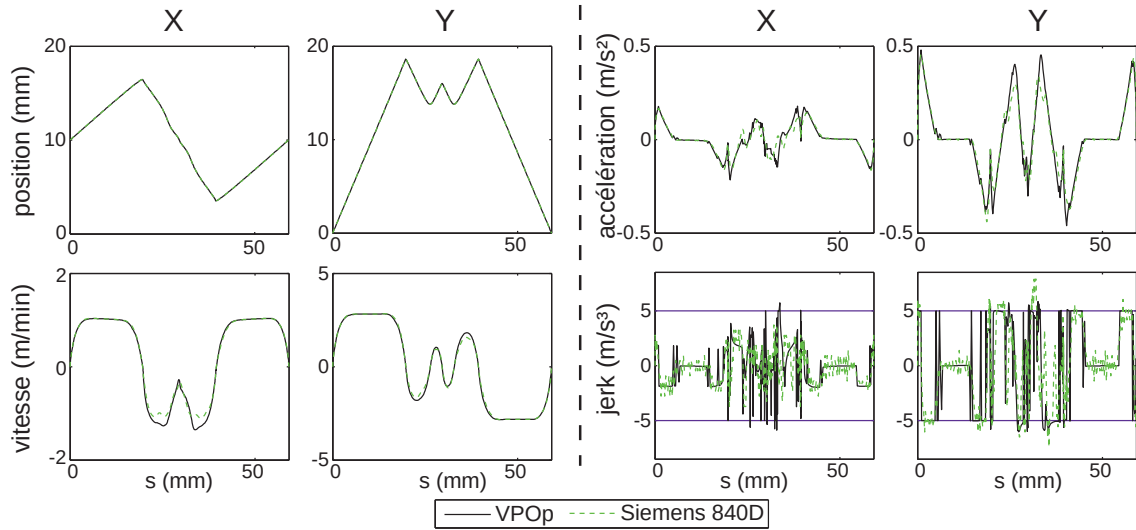


Figure 65 – Vérification des contraintes sur le trajet trident

maximales des axes ne sont jamais atteintes. Sur les graphiques en bas à droite, on peut voir que la limitation de jerk est dépassée par la commande numérique Siemens 840D, cependant comme l'algorithme est une boîte noire, il est seulement possible de deviner les raisons de ces dépassements. Sur ces graphiques, on peut aussi vérifier que le profil de jerk obtenu par l'algorithme VPOp respecte bien les contraintes avec le dépassement autorisé de 120%. Le temps d'usinage mesuré sur la Mikron est de $2.4s$, le temps d'usinage obtenu avec l'algorithme VPOp est de $2.3s$. Pour information, le temps de calcul pour obtenir ce résultat est de $6.2s$.

4.2 Trajet 2 axes en G1

Pour un trajet G1, l'arrondissement local des discontinuités présenté dans le chapitre 2 est effectué comme on le voit en haut de la figure 66a. Une tolérance classique de $0.02mm$ est utilisée pour arrondir les discontinuités dans la commande numérique. Cet exemple contient des segments courts le long desquels la vitesse d'avance programmée ne peut pas être atteinte et un arc de cercle discrétisé pour mettre en évidence les effets importants introduits par la discrétisation G1 des trajets. De plus, dans la portion circulaire discrétisée par des petits segments, la totalité de la tolérance d'arrondissement ne peut pas être utilisée, car les coins sont trop proches les uns des autres. Cet exemple contient donc des caractéristiques typiques que l'on peut retrouver lors d'opérations de contournage.

La figure 67 montre les points calculés lors de l'interpolation temporelle du début de la trajectoire. En violet, on retrouve la contrainte du look ahead qui permet de guider l'algorithme dans les zones difficiles que sont les discontinuités G1. Grâce à cette technique de look ahead, il est possible d'obtenir un profil de vitesse symétrique par rapport au milieu de l'arrondissement. La figure 66b permet de comparer les résultats de la commande numérique Siemens et de VPOp. Les deux solutions sont très proches, car elles sont toutes deux très proches de la

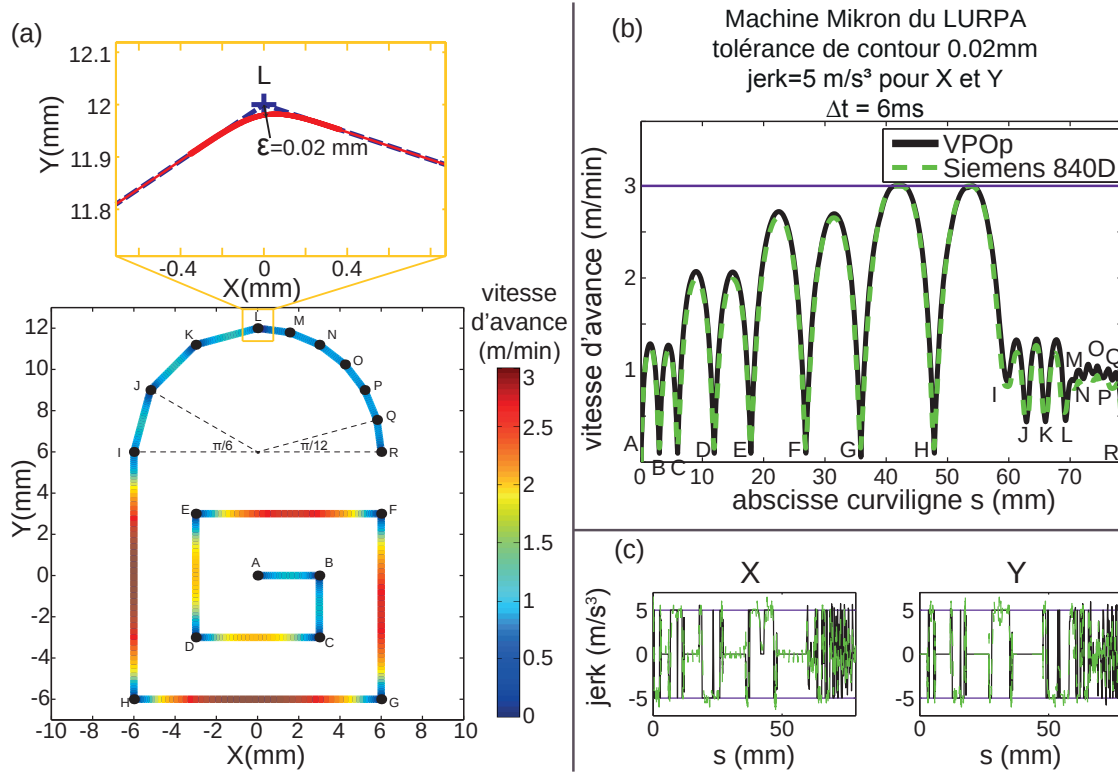


Figure 66 – Trajet G1 2D en forme de cadenas. (a)trajet, (b) profil de vitesse, (c) vérification des contraintes de jerk

solution optimale. Comme pour l'exemple précédent, les seuls paramètres limitants sont la vitesse programmée et le jerk des axes. On peut noter le comportement particulier dans la zone circulaire entre les points I et R. Cet exemple représentatif des cas d'interpolation difficiles montre bien que l'algorithme VPOp développé dans cette thèse peut à la fois servir à piloter une machine-outil dans des conditions classiques et à prédire la vitesse d'avance réelle de la commande numérique industrielle. Le temps d'usinage mesuré sur la machine Mikron est de $4.5s$ alors que celui obtenu par VPOp est de $4.2s$. Pour information, le temps de calcul est de $5.8s$.

Les oscillations de la vitesse d'avance (points I à R) sont dues à la géométrie du trajet discrétisé. Pour les points J,K et L, les segments sont suffisamment longs pour permettre des vitesses élevées, mais les discontinuités imposent des vitesses basses. Pour les points M à R, la longueur des segments est réduite, mais comme les discontinuités sont moins franches, le trajet arrondi est plus lisse. Ainsi, les fluctuations de vitesse sont moins importantes.

Des résultats similaires ont été mesurés sur la machine Mori Seiki du laboratoire MAL de Vancouver équipée d'une commande numérique Fanuc 30i ainsi que sur la machine DMG de l'ENS de Cachan équipée d'une commande numérique Siemens 840D, figure 68. Il est important de noter que le temps de cycle d'interpolation Δt doit nécessairement être adapté aux performances de la machine. La machine DMG est équipée de moteurs linéaires qui permettent d'atteindre des dynamiques bien plus élevées que les entraînements par vis à billes, il faut donc

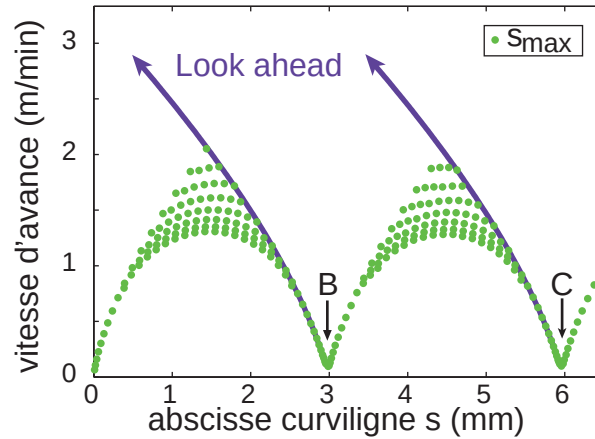


Figure 67 – Look ahead pour le cadena G1

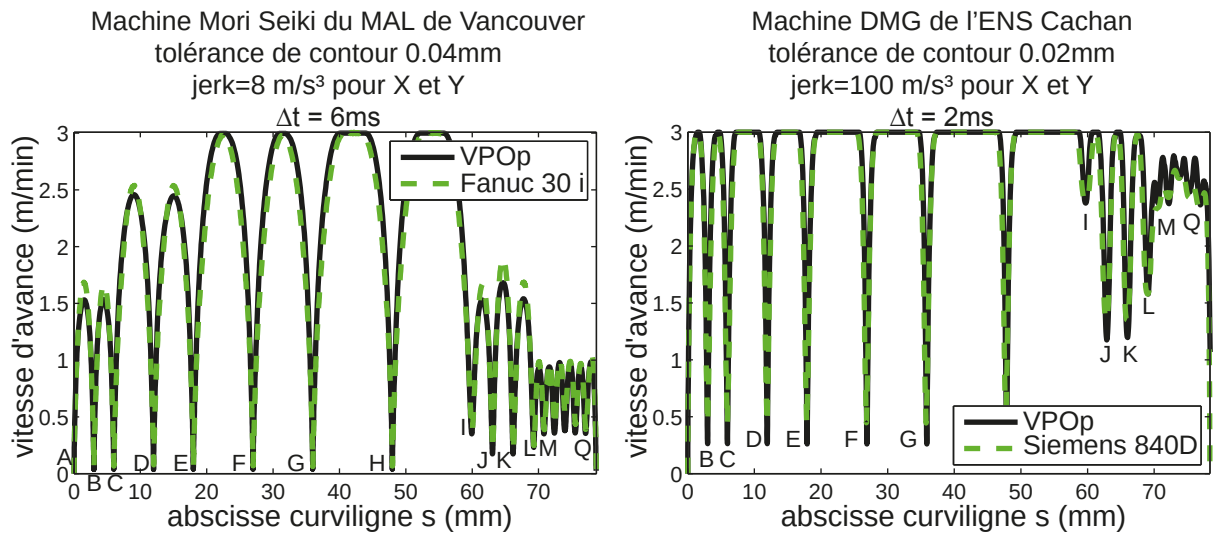


Figure 68 – Profil de vitesse sur le cadenas G1 pour une commande numérique Fanuc et une commande numérique Siemens très dynamique

avoir un pas de calcul plus petit pour faire une interpolation temporelle correcte.

Cet exemple montre clairement que la discrétisation du trajet G1 a une importance majeure sur la vitesse d'avance. Les oscillations de vitesse engendrées peuvent être dommageables pour la qualité de la pièce usinée. D'après une idée reçue, un nombre plus important de segments G1 entraîne un temps d'usinage plus long, mais en réalité le problème n'est pas si simple.

4.3 Trajet 5 axes en B-Spline natif, application à une machine-outil 5 axes et à un robot anthropomorphe

Pour démontrer que l'algorithme d'interpolation temporelle proposé est tout à fait général, l'interpolation temporelle d'un trajet 5 axes est effectué pour la machine Mikron du laboratoire ainsi que pour un robot anthropomorphe. La transformation géométrique pour le robot est fournie par la « Robotic Toolbox »[Corke, 2007]. Les caractéristiques cinématiques utilisées

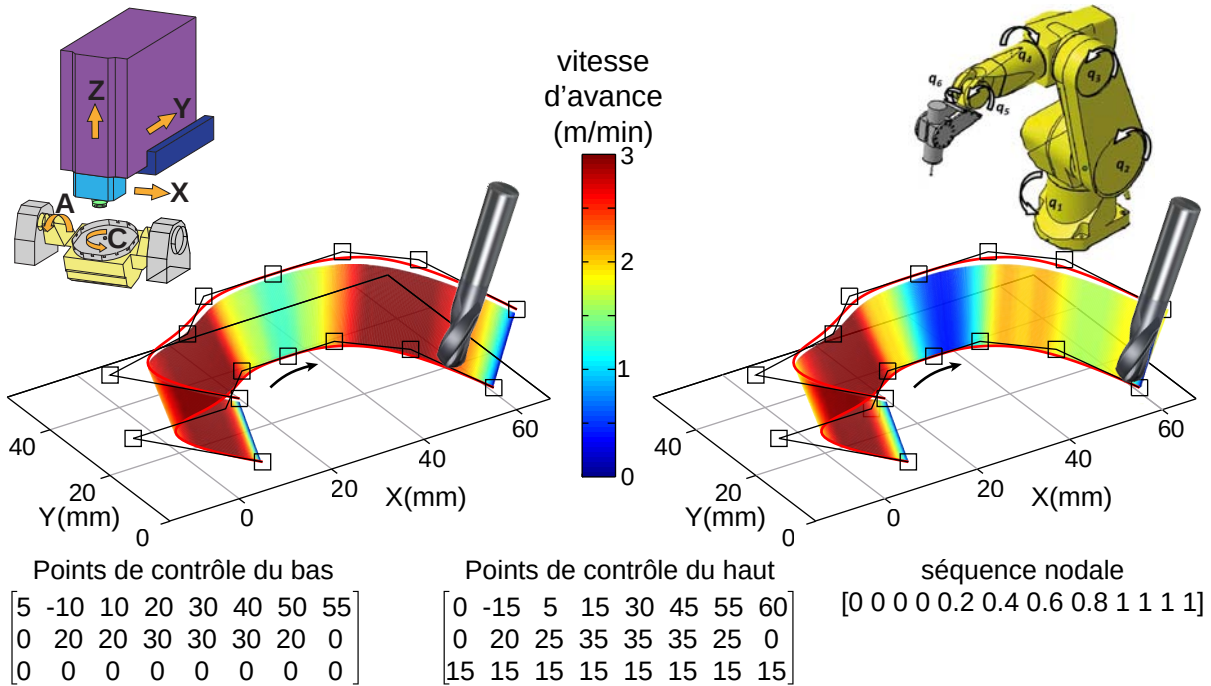


Figure 69 – Trajet de poche ouverte 5 axes en B-Spline natif

correspondent à celles du robot d'usinage RX170B de Stäubli [Olabi *et al.*, 2010] (figure 69 en haut à droite). Le trajet défini en 5 axes par deux B-Spline natives représente une opération d'usinage sur le flanc pour une poche ouverte. Pour définir le trajet, les points de contrôle sont fournis ainsi que la séquence nodale qui est identique pour les deux courbes définissant le trajet du bout de l'outil et le trajet d'un second point de l'axe outil. La vitesse d'avance calculée par VPOp est affichée en couleur sur les surfaces d'usinage de la figure 69. On peut voir sur cet exemple que les variations de vitesse n'ont rien à voir avec la courbure du trajet. Pour les trajets multi axes, les seuls paramètres significatifs sont les dérivées géométriques des trajets des axes.

La comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur la machine Mikron avec la commande numérique Siemens 840D et celui calculé par VPOp est présentée sur la figure 70. On remarque bien que les contraintes des axes de translation et de rotation sont prises en compte. Sur cet exemple, la vitesse d'avance est limitée par la vitesse d'avance programmée, par le jerk des axes X, Y et A mais également par la vitesse et l'accélération de l'axe C. En effet, les axes de rotation sont relativement lents sur la machine Mikron et on arrive donc rapidement à utiliser leurs vitesses et accélérations maximales. Sur le graphique de la vitesse tangentielle, on remarque que la vitesse obtenue par l'algorithme VPOp est supérieure à celle obtenue par la commande numérique Siemens 840D tout en respectant les mêmes contraintes. Même si la plupart du temps, les temps d'usinage obtenus sont très comparables, on retrouve une différence significative sur cet exemple qui vient peut être des contraintes temps réel imposées sur le calculateur industriel. Le temps d'usinage mesuré sur la machine Mikron est de 3.7s, celui obtenu par VPOp est de 2.8s. Pour information, le temps de calcul est de 10s sur cet exemple.

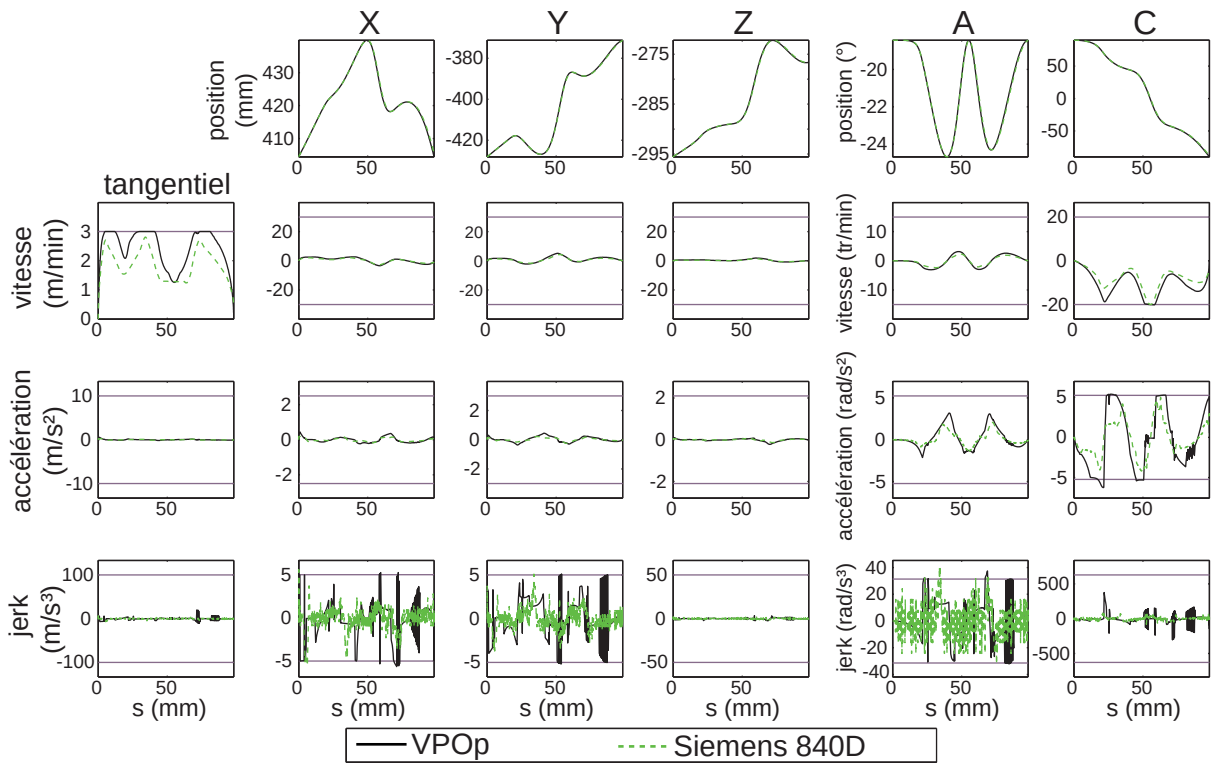


Figure 70 – Vérification des contraintes pour la poche ouverte 5 axes sur la machine Mikron

Tous les traitements géométriques sont effectués dans l'espace pièce donc la structure machine n'a pas d'influence sur ces algorithmes. Une fois que la géométrie du trajet est fixée, l'interpolation temporelle est réalisée à partir des trajets articulaires des axes et de leurs dérivées géométriques. Ainsi, avec l'algorithme développé dans cette thèse, l'interpolation temporelle à jerk limité peut être effectuée pour n'importe quel type de structure articulée à partir du moment où la transformation géométrique est connue. L'exemple le démontre pour une structure sérielle de robot anthropomorphe, il en serait de même pour une machine à architecture parallèle.

4.4 Difficultés liées à la méthode d'interpolation temporelle

L'interpolation temporelle est une tâche complexe, ce paragraphe donne un aperçu des difficultés qui peuvent être rencontrées.

Tout d'abord au niveau de la géométrie, le chapitre 2 a présenté une solution d'arrondissement des trajets G1. Il faut cependant gérer l'ensemble des configurations dans lesquelles la géométrie n'est pas suffisamment continue (connexion cercle / cercle, cercle / droite, droite / B-Spline...). Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, il est très difficile d'effectuer ces raccordements en respectant rigoureusement des contraintes très fortes sur la géométrie dans l'espace pièce. Il semble donc nécessaire de développer un algorithme de lissage articulaire et de relâcher le niveau d'exigence sur le suivi de la géométrie programmée.

Ensuite, le choix du temps de cycle d'interpolation Δt est également source d'interroga-

tions. Il semble que la valeur de la discrétisation doive être choisie uniquement en fonction des capacités cinématiques de la machine sans tenir compte de la fréquence des boucles d'asservissement. En effet, un choix judicieux de Δt consiste à avoir suffisamment de points interpolés pour bien représenter les évolutions du profil de vitesse. Si Δt est très faible, la recherche de solution est très difficile et la performance du profil de vitesse obtenu est très dégradée (en terme de temps d'usinage). Pour l'asservissement, il semble inévitable de réinterpoler la trajectoire ce qui repose la question du respect strict des contraintes cinématiques.

D'autre part, les chutes de vitesse très brusques sont difficiles à interpoler. Pour les trajets G1, les zones difficiles sont connues et l'application du look ahead à chaque transition est tout à fait satisfaisante pour résoudre ce problème. Cependant, les trajets B-Splines peuvent aussi comporter des variations brusques de géométrie. Au lieu d'attendre de rencontrer une difficulté, il serait peut être préférable d'appliquer par avance un look ahead basé sur l'approximation de la limite supérieure du profil de vitesse quitte à parfois dégrader la performance de l'interpolation. La robustesse de l'algorithme serait améliorée au détriment de la performance.

La méthode d'interpolation présentée ici a de nombreux avantages par rapport aux autres méthodes de la littérature, mais elle introduit une difficulté supplémentaire à la fin de la trajectoire comparée aux algorithmes à profil défini [Erkorkmaz et Altintas, 2001a] ou à deux passes [Dong et Stori, 2007]. Il est en effet difficile de trouver la solution discrétisée qui permet de s'arrêter avec $\dot{s} = 0$, $\ddot{s} = 0$ et $\dddot{s} = 0$. Même si le look ahead est appliqué pour l'arrêt en fin de trajectoire, il faut relâcher les contraintes pour permettre de trouver une solution d'interpolation.

À cause de tous ces éléments, l'algorithme utilisé est un peu plus compliqué que celui présenté dans la partie 3.5. L'approche rigoureuse au niveau du respect des contraintes et de la géométrie est nécessaire d'un point de vue scientifique, mais les commandes numériques industrielles ont probablement des solutions plus pratiques pour avoir des algorithmes robustes et performants. Des techniques de filtrage et de traitement du signal pourraient être développées pour lisser la géométrie à interpoler et pour lisser la trajectoire obtenue à la suite de l'interpolation temporelle.

Pour finir, la programmation de l'algorithme est également à améliorer. À l'heure actuelle, l'ensemble du trajet est traité d'un coup alors qu'il serait plus approprié d'utiliser une fenêtre glissante au fur et à mesure de l'interpolation. Ce problème d'implémentation limite la longueur des trajets interpolables. Dans l'état actuel, le logiciel développé permet d'effectuer toutes les validations scientifiques, mais une refonte du code est nécessaire pour son utilisation dans des situations industrielles.

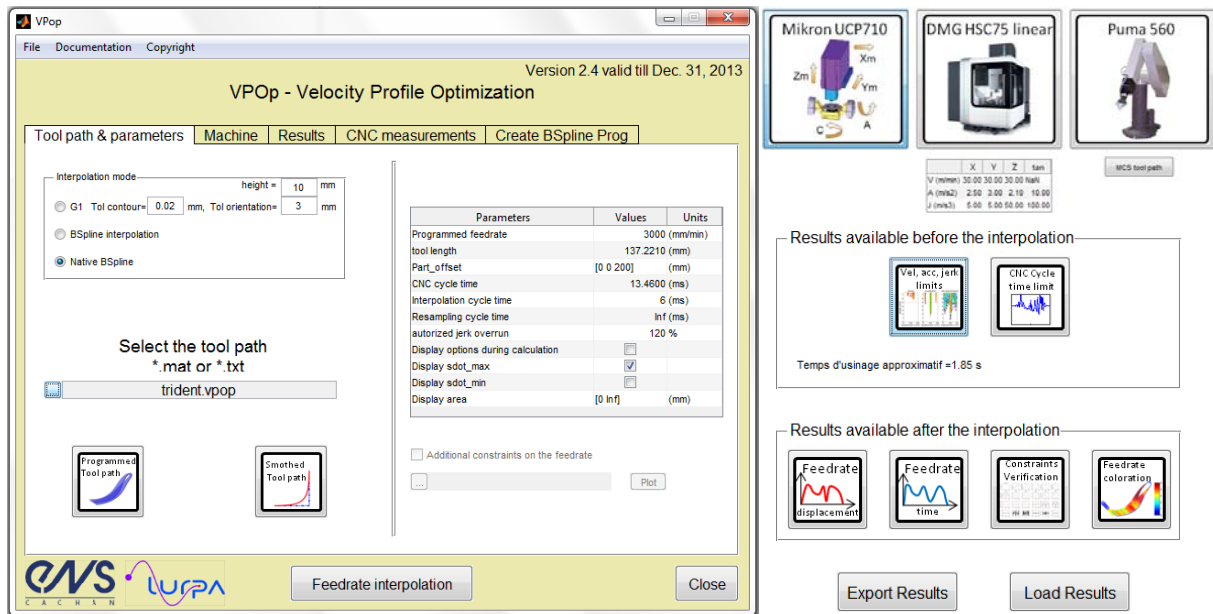


Figure 71 – Logiciel d'interpolation temporelle VPop

4.5 Présentation du logiciel VPop

L'ensemble des algorithmes présentés dans les chapitres 2 et 3 sont développés dans l'environnement Matlab. Cet important travail de programmation permet maintenant d'obtenir une solution d'interpolation correcte pour la grande majorité des trajets testés. Pour assurer une utilisation facile de ces algorithmes, une interface graphique a été développée, figure 71. Les différents onglets permettent de choisir les paramètres du trajet, les paramètres machine et de visualiser les résultats obtenus. La limite supérieure du profil de vitesse présentée dans la partie 2.3 du chapitre 2 peut être obtenue dès que le trajet est défini. Le profil de vitesse et la vérification du respect des contraintes sont accessibles après le calcul de l'interpolation temporelle.

Ce logiciel est compilé pour pouvoir être distribué librement sur internet. L'utilisation de l'exécutable ne nécessite pas de licence Matlab, les détails pour le téléchargement sont disponibles à l'adresse suivante

<http://webserv.lurpa.ens-cachan.fr/geo3d/premium/vpop>.

La version librement téléchargeable permet aux utilisateurs de faire de nombreux tests et de se persuader de la qualité de l'algorithme proposé. Des fichiers de résultats (.vpop) contiennent les exemples présentés dans ce manuscrit ainsi que les relevés expérimentaux effectués sur la commande numérique Siemens 840D de la machine Mikron. Ils pourront servir d'exemples de références pour les futurs travaux concernant l'interpolation temporelle. En effet, à notre connaissance, le logiciel VPop est le seul algorithme d'interpolation temporelle qui peut être téléchargé et testé librement par la communauté scientifique.

5 Conclusions

Les machines-outils d'usinage grande vitesse ont des dynamiques élevées, cependant il est souvent impossible d'atteindre la vitesse programmée à cause des limites physiques des axes. Ainsi, il est important que les consignes envoyées aux moteurs respectent les contraintes cinématiques de vitesse, d'accélération et de jerk. Les travaux réalisés sur une structure très simple montre l'influence du jerk et donnent les clefs pour déterminer les niveaux de jerk admissibles sur les axes d'une machine-outil en fonction des modes propres de la structure. La limitation du jerk est particulièrement importante pour limiter les vibrations de la structure et pour les structures poly articulées les niveaux maximums de jerk doivent être adaptés à la dynamique propre de chacune des articulations.

Ce chapitre présente donc un algorithme d'interpolation temporelle unifié permettant de respecter les contraintes de jerk sur chaque axe d'une machine-outil 5 axes et d'interpoler des trajets définis dans les formats B-Spline et G1, l'algorithme VPOp (Velocity Profile Optimization) proposé permet ainsi de résoudre un grand nombre de difficultés.

Cette méthode d'interpolation est basée sur une approche découplée qui sépare le problème géométrique (chapitre 2) du problème temporel abordé dans ce chapitre. Le principe d'intersection des contraintes permet d'intégrer les contraintes de jerk de chacun des axes, on pourrait également intégrer des contraintes venant du procédé ou des écarts de contour. L'algorithme de recherche des solutions par dichotomie couplé à la technique de look ahead développée permet d'appliquer le principe d'intersection des contraintes dans les cas les plus difficiles, c'est-à-dire sur des trajets 5 axes et en prenant en compte les contraintes de jerk de chacun des axes machine.

Plusieurs exemples 2 et 5 axes démontrent la performance et la robustesse de l'algorithme développé. En effet, les comparaisons avec les résultats obtenus par une commande numérique Siemens 840D montrent que les solutions obtenues sont d'un niveau performance équivalent aux standards industriels. Il est donc possible de s'appuyer sur l'algorithme VPOp pour proposer des améliorations de l'interpolation temporelle qui étaient jusque là inaccessibles avec les commandes numériques industrielles. De plus, la solution proposée à l'avantage d'être applicable à n'importe quelle structure articulée. Finalement, ces travaux sur l'interpolation temporelle à jerk limité en 5 axes ont donné lieu à une publication en revue [Beudaert *et al.*, 2012].

Avec les travaux présentés dans les chapitres 2 et 3, les algorithmes de base de la commande numérique sont maîtrisés. Il est maintenant possible de parfaitement contrôler le passage du trajet programmé aux consignes envoyées aux axes machine. Ceci permet de répondre à la première problématique de la thèse :

► Comment passer d'une géométrie et d'une vitesse d'avance programmée aux consignes envoyées aux axes machine ?

Maintenant que l'aspect numérique du processus de fabrication est bien maîtrisé, le chapitre suivant traitera de la réalisation physique.

Chapitre

4

Passage du monde numérique à la réalisation physique

Les chapitres précédents ont présenté les algorithmes nécessaires à la création des consignes à envoyer aux axes de la machine-outil. Ce chapitre permet de faire le lien entre ces développements numériques et l'implémentation physique de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sur une machine-outil 5 axes.

1 Introduction

Les algorithmes développés dans les chapitres précédents permettent de réaliser les opérations fondamentales d'une commande numérique. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la fonction principale étudiée dans cette thèse consiste à «relier la géométrie et le temps en intégrant les limitations physiques de la machine-outil». Le logiciel VPOp qui inclut les développements des chapitres 2 et 3 permet de réaliser cette fonction. En effet, ce logiciel calcule les consignes échantillonnées à envoyer aux axes de la machine-outil à partir d'un trajet programmé et de paramètres (notamment les limites cinématiques des axes de la machine-outil utilisée).

Le développement de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC nécessite un travail technique important pour arriver à maîtriser complètement les déplacements des axes machine sur un moyen industriel. Une présentation succincte des choix techniques donne un aperçu des travaux réalisés dans ce domaine. L'architecture de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC est fortement liée au matériel Siemens, car à l'origine la machine Mikron est équipée d'une commande numérique Siemens 840D avec des variateurs, des modules de puissance et des moteurs Siemens. Cependant, d'autres solutions matérielles sont tout à fait utilisables pour obtenir le même résultat et piloter directement les moteurs des axes d'un système poly articulé.

Nous avons vu dans le chapitre d'introduction de la thèse que même au niveau international, peu de laboratoires disposent d'un matériel d'expérimental pour tester les travaux effectués dans le cadre du développement de commandes numériques ouvertes. Dans la littérature, il n'y a quasiment aucune information sur le travail à réaliser pour piloter une machine-outil avec une commande numérique ouverte. La première partie de ce chapitre a donc pour objectif de présenter les solutions techniques retenues pour l'implémentation de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sur une machine-outil 5 axes.

Finalement, la dernière étape pour piloter une machine-outil consiste à réaliser le contrôle temps réel des axes. L'asservissement est la seule tâche qui est réellement effectuée en temps réel dans la commande numérique puisque par définition elle permet de corriger les écarts entre les consignes et les mesures effectuées par les différents capteurs présents sur chacun des axes.

De nombreux travaux de recherche proposent des structures d'asservissement innovantes pour le pilotage des machines-outils, mais comme nous allons le voir par la suite, les solutions classiquement utilisées sur les machines-outils industrielles sont performantes et parfois mal connues.

Cette thèse n'a pas pour objectif d'améliorer les techniques d'asservissement, l'intérêt du travail effectué à ce niveau est d'obtenir des résultats satisfaisants en termes d'écarts de contour pour permettre l'usinage d'une pièce dans des conditions UGV classiques. Pour cela, les travaux ne rentrent pas en détail sur les aspects théoriques, mais s'attachent plutôt à répondre aux problèmes d'implémentation et de mise en œuvre.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit : dans un premier temps, la mise en œuvre technique de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sur la machine Mikron du laboratoire est détaillée. Ensuite, les développements nécessaires pour effectuer le contrôle temps réel d'une machine d'usinage grande vitesse sont présentés et validés par des résultats expérimentaux.

2 Mise en œuvre technique de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC

La mise en œuvre technique de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC sur la machine 5-axes du laboratoire a demandé un travail d'intégration important. L'objectif étant de construire une commande numérique ouverte (au sens de la maîtrise de la trajectoire), la solution adoptée consiste à piloter directement les moteurs des axes. Les fonctions dites « annexes » de la machine-outil ne sont pas reproduites et continuent d'être effectuées par la commande numérique Siemens 840D. Ce choix technique permet de limiter le temps de développement et de conserver un niveau de sécurité élevé sur ce moyen industriel.

2.1 *Cohabitation de la commande numérique Siemens 840D et de la commande numérique ouverte*

Pour maîtriser complètement les déplacements effectués par la machine-outil, il est impératif d'avoir directement accès au pilotage des moteurs sans passer par les algorithmes internes du calculateur Siemens qui effectuent des traitements en boîte noire.

Initialement, les consignes générées par le calculateur Siemens 840D sont envoyées à des variateurs numériques 611D par l'intermédiaire d'un bus de communication appelé "Drive bus", figure 72. Ce bus utilise un protocole de communication propriétaire (Profibus-DP) qui ne nous permet pas de communiquer facilement avec ces variateurs numériques 611D. Pour contourner cette difficulté technique et piloter les variateurs, les variateurs numériques 611D sont remplacés par des variateurs universels 611U qui n'utilisent plus le "Drive bus". Pour les variateurs 661U, les consignes sont communiquées par une tension analogique $\pm 10V$ qui peut facilement être générée par n'importe quel système de commande. En bas à droite de la figure 72, on voit la configuration classique de la machine alors que sur la partie centrale de la photo, les trois

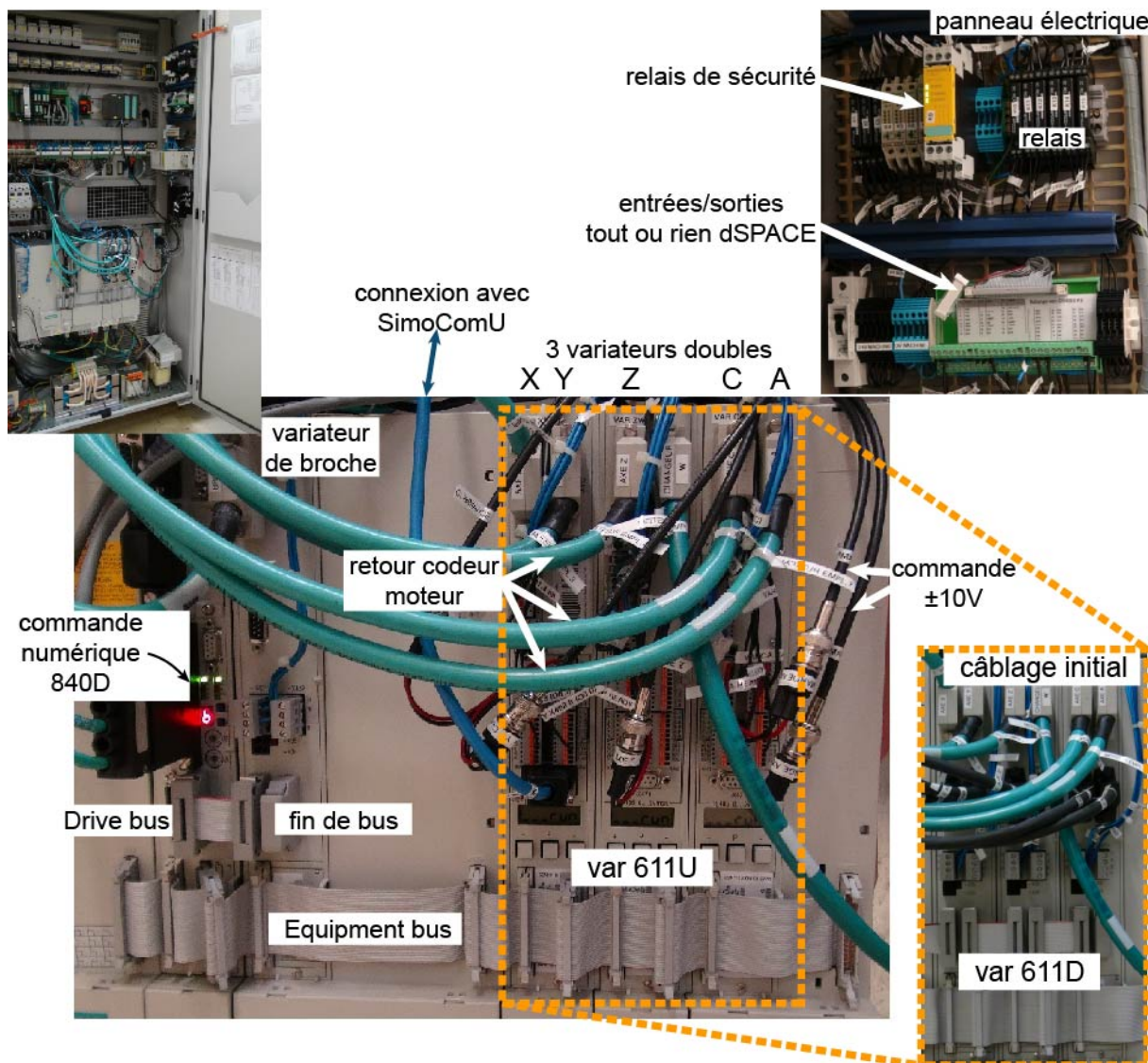


Figure 72 – Photos de l'armoire électrique de la machine Mikron

varianteurs 611U sont montés pour effectuer le pilotage de la machine grâce à la commande numérique ouverte. En dessous du "Drive bus", "l'Equipment bus" continue de relier l'ensemble des modules, mais il ne communique pas d'information particulière, il permet simplement l'alimentation du variateur avec plusieurs niveaux de tension et signaux d'activation. Un port série RS232 permet la connexion entre le variateur 611U et le logiciel de paramétrage et de test SimoComU fourni par Siemens.

Finalement, on remarque que le variateur de la broche reste piloté par la commande numérique Siemens. Pour les axes X,Y,Z,C et A, les consignes de vitesse sont générées par le système dSPACE et transmises sous forme de tension $\pm 10V$ par des câbles coaxiaux noirs. Les gros câbles verts transmettent l'information de vitesse mesurée à partir des codeurs des moteurs pour permettre au variateur de réaliser la boucle d'asservissement en vitesse.

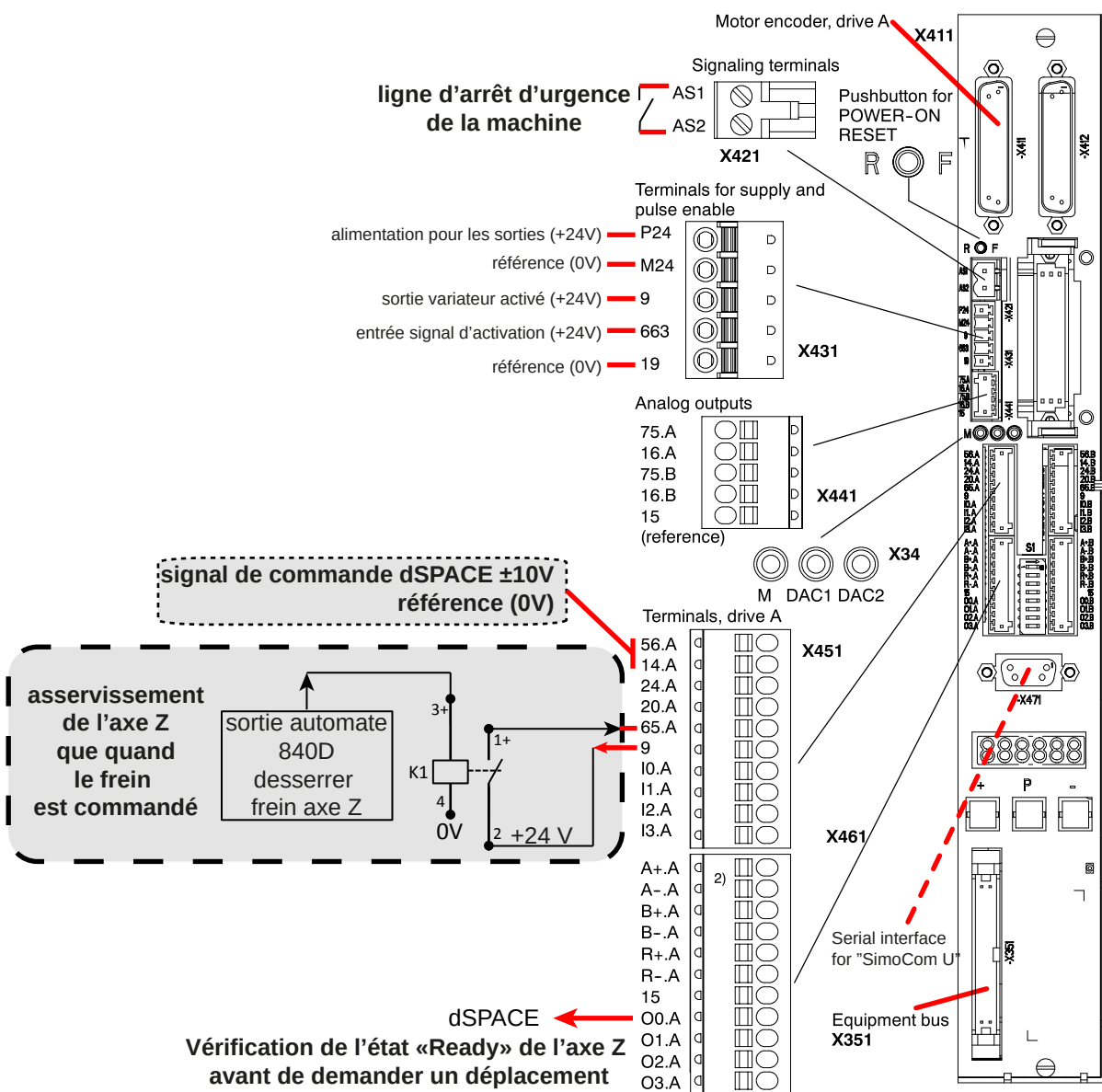
En plus de cette modification matérielle, la commande numérique Siemens 840D doit être reparamétrée pour qu'elle ne gère plus les axes de déplacement. Pour des phases de test, il est possible de simuler les déplacements comme s'il n'y avait pas de matériel physique connecté tout en continuant de contrôler les fonctions de l'automate. Ainsi, l'automate programmable de la commande numérique continue de fonctionner normalement et les mouvements réels des axes sont complètement transparents. Nous utilisons donc cette fonctionnalité pour dissocier la commande numérique Siemens 840D du pilotage des axes tout en conservant le comportement automate dont nous avons besoin. Pour basculer du fonctionnement normal au pilotage par la commande numérique PREMIUM-OpenCNC, une dizaine de paramètres doivent être modifiés sur chacun des axes. Ces modifications sont enregistrées dans des archives qui permettent de recharger rapidement le jeu de paramètres adapté pour le mode de fonctionnement choisi.

À l'intérieur de l'armoire électrique de la machine, un panneau a été rajouté pour fixer le matériel électrique nécessaire à la cohabitation de la commande numérique Siemens 840D et de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC (photo en haut à droite de la figure 72). Comme nous allons le voir par la suite, une quinzaine de relais font l'interface entre les entrées-sorties de la machine (0-24V) et les entrées-sorties dSPACE (0-5V) pour :

- activer les variateurs des axes freinés au bon moment,
- vérifier l'état de fonctionnement des variateurs,
- déclencher l'arrêt d'urgence de la machine (et ce de façon redondante).

La figure 73 présente en rouge les câblages à réaliser sur le variateur universel 611U de l'axe Z. C'est l'axe présentant le plus de difficultés, car il est soumis à la gravité et donc bloqué par un frein mécanique. Sur la partie supérieure, la ligne d'arrêt d'urgence de la machine est rebranchée sur les bornes AS1/AS2 qui sont identiques pour les variateurs universels 611U et pour les variateurs numériques 611D. La gestion des sécurités internes aux variateurs pour la configuration PREMIUM-OpenCNC est donc identique à celle de la configuration normale. Le bornier X431 situé juste en dessous sert principalement à l'alimentation et à l'activation du variateur. La broche 663 est également commune aux deux types de variateur, elle permet à la commande numérique Siemens 840D de désactiver les variateurs. Grâce à ces éléments communs entre les deux variateurs, une majorité des fonctions de sécurité sont conservées.

Les fonctions de sécurité liées aux axes sont évidemment désactivées, elles seront donc reconstruites dans la commande PREMIUM-OpenCNC. Le relais de sécurité (en haut de la figure 72) intégré dans la ligne d'arrêt d'urgence permet de déclencher l'arrêt d'urgence de la machine si un problème est détecté par le calculateur dSPACE. Par contre, les autres sécurités sur les portes, la broche, le serrage des outils... ne sont pas modifiées. Cette configuration hybride permet de maintenir le niveau de sécurité de ce moyen industriel. En effet, quand la configuration normale est utilisée, la seule modification est l'introduction du relais de sécurité ce qui ne fait pas baisser la classe de sécurité de l'installation électrique.



SIMODRIVE 611 universal Function Manual (FBU) - 05/2010 Edition

Figure 73 – Câblage du variateur 611U

Tout l'intérêt des variateurs universels 611U réside dans le fait qu'ils sont pilotés par un signal analogique $\pm 10V$. Suivant le paramétrage interne du variateur, ce signal de commande peut être pris comme une consigne de vitesse ou comme une consigne de courant. Cela permet au variateur de réaliser soit de la boucle de courant uniquement, soit les deux boucles courant et vitesse. Évidemment, l'ensemble des gains et des filtres sont paramétrables dans le variateur, mais la structure d'asservissement est figée (correcteur PID). Pour l'implémentation actuelle, le signal de commande fournit la consigne de vitesse et les deux boucles d'asservissement sont réalisées par le variateur, mais un pilotage en courant pourrait être réalisé notamment pour implémenter le contrôle par anticipation en accélération dans la commande.

En continuant de redescendre sur la figure 73, on rencontre une difficulté technique associée aux axes équipés d'un frein mécanique (Z, A et C dans notre cas). En effet, des sorties automates importantes sont notamment les consignes d'ouverture et fermeture des freins sur les axes soumis à la gravité. Étant donné que le correcteur de la boucle de vitesse est muni d'un terme intégral, il n'est pas possible d'activer l'asservissement de l'axe si celui-ci est freiné. En effet, les perturbations font augmenter le signal de commande et le moteur force contre le frein. Pour pallier à ce problème technique, il faut activer l'asservissement juste avant que le frein s'ouvre. La sortie automate « desserrer frein » est émise par la commande numérique Siemens 840D quand la puissance est enclenchée sur la machine. Ce signal qui pilote le pré actionneur commandant l'ouverture du frein est renvoyé sur le relais K1 pour enclencher l'asservissement. Ainsi, l'axe est piloté légèrement avant que le frein soit physiquement ouvert. Même sans connaître le programme automate il est donc possible de détourner le pilotage séquentiel initial de la machine en utilisant uniquement les signaux de commande émis.

Finalement, tout en bas de la figure 73, on voit qu'une sortie tout ou rien du variateur est utilisée pour vérifier que les axes sont prêts avant que le calculateur dSPACE n'envoie de consigne de déplacement. Cette procédure est nécessaire pour les axes de rotation, car les freins hydrauliques ne sont pas forcément ouverts même si la puissance de la machine est enclenchée.

Grâce à la modification du paramétrage de la commande numérique Siemens 840D et à la configuration matérielle des variateurs universels 611U, il est possible de commander les déplacements sans mettre en défaut la machine. L'objectif de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC qui consiste à maîtriser totalement la trajectoire exécutée est atteint tout en déléguant un maximum de tâches à la commande numérique Siemens 840D.

2.2 Architecture de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC

Nous venons de voir comment la commande numérique Siemens et la commande numérique PREMIUM-OpenCNC cohabitent d'un point de vue pratique. Le changement des variateurs permet de commander les moteurs grâce à une tension analogique, il ne reste plus qu'à générer



Description du système modulaire dSPACE

DS1006: AMD Opteron_QC processor (2.8 GHz)
 DS3002: Incremental Encoder Interface 6-channel
 DS2102: High Resolution D/A 6-channel 16-bit
 DS4003: Digital I/O 96-channels
 DS2002: Multi Channel A/D 32-channel 16-bit

Logiciels: ControlDesk Next Generation,
 Real Time Interface,
 Matlab & Simulink

Figure 74 – Description du système modulaire dSPACE

la tension de commande.

Sur le plan matériel, la commande numérique PREMIUM-OpenCNC s'appuie sur un calculateur temps réel dSPACE. Les sociétés National Instruments (NI) et dSPACE se disputent le marché des calculateurs temps réel dits de « prototypage rapide » qui permettent de développer des applications sans avoir besoin de construire un hardware spécifique. Habituellement, ces matériels de prototypage sont utilisés en phase de test puis sont remplacés par des cartes électroniques dédiées moins chères, mais moins flexibles. Les produits dSPACE sont plus coûteux que les produits NI, mais ils ont de meilleures performances électroniques. Un autre avantage très important pour les travaux de recherche est que la société dSPACE offre un environnement convivial de développement avec Matlab/Simulink et le logiciel ControlDesk ce qui facilite le travail.

La figure 74 présente le matériel utilisé pour réaliser la commande numérique ouverte. Ce système modulaire est composé d'une carte de calcul DS1006 très performante et de cartes entrées-sorties que l'on peut choisir en fonction des besoins. La carte DS3002 permet de lire les signaux des règles de mesure ; les sorties analogiques de la carte DS2102 sont utilisées pour piloter les variateurs. La carte d'entrées-sorties tout ou rien DS4003 permet de faire l'interface du comportement logique. Enfin, la carte entrée analogique DS2002 sert à récupérer le signal du potentiomètre des avances. L'avantage de ce système modulaire est de pouvoir disposer de nombreux types de connections pour par exemple connecter une platine d'effort sur les entrées analogiques ou un système de mesure optique sur le port série de la carte DS1006.

Nous avons vu que le système dSPACE est capable d'interpréter directement les signaux des codeurs. Les signaux des règles de mesure des 5 axes de la machine sont donc dupliqués grâce à des boîtiers spécifiques de la société Heidenhain. Ainsi, nous disposons du signal lu sur les règles pour faire des mesures externes lorsque la machine fonctionne en mode normal. Cette fonctionnalité a été très utile notamment au moment du développement de la procédure de prise d'origine sur les règles à distance codée. Grâce à une disposition spéciale des marques de

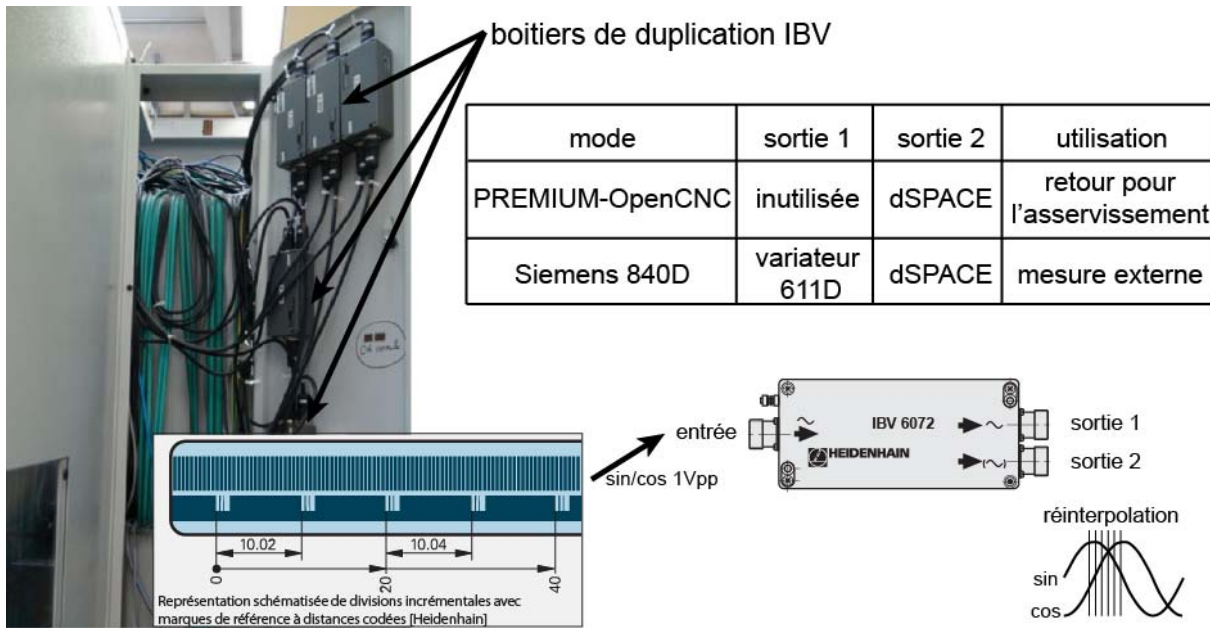


Figure 75 – Boitiers de duplication des signaux des règles de mesure

référence, un déplacement de 20 mm est suffisant pour retrouver l'origine de la règle. En effet, aucun contacteur électromécanique n'est utilisé ni pour définir une position d'origine ni pour obtenir l'information de fin de course. Initialement, toutes les sécurités contrôlant les courses de la machine sont gérées numériquement à partir des informations lues sur les règles. Pour plus de sécurité dans le développement de la commande numérique ouverte, des butées électriques de fin de course ont été installées ce qui permet d'arrêter la machine par une sécurité câblée en cas de mauvaise manipulation.

Étant donné que les signaux délivrés par les règles de mesure sont analogiques, il est possible d'effectuer une réinterpolation à partir des deux signaux sinus et cosinus mesurés pour avoir une résolution de mesure très fine ($\simeq 0,05 \mu m$). Ces boitiers sont installés de façon permanente sur la machine, même si la duplication des signaux n'est pas nécessaire pour le mode de fonctionnement PREMIUM-OpenCNC.

La solution matérielle utilisée est très robuste et a une puissance de calcul temps réel très importante ce qui permet de ne pas avoir à soigner particulièrement l'implémentation informatique.

Sur le plan logiciel, la figure 76 présente le modèle Simulink utilisé pour piloter la machine. Le matériel dSPACE utilisé pour faire le pilotage temps réel est lié à l'environnement Matlab/Simulink grâce à la librairie "Real Time Interface" qui permet l'échange des signaux entre le modèle Simulink et le matériel dSPACE. Ceci permet de bénéficier de l'ensemble des fonctionnalités offertes par Simulink. Le modèle créé est ensuite compilé automatiquement en langage C pour être envoyé sur la carte de calcul temps réel.

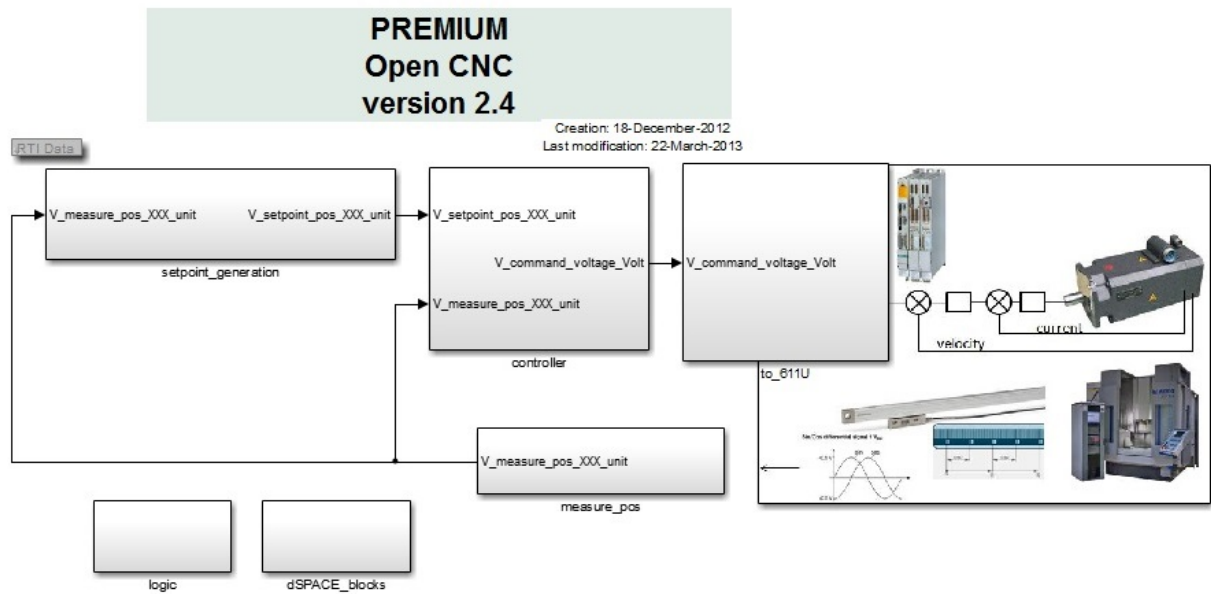


Figure 76 – Modèle Simulink / dSPACE de pilotage de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC

Le modèle est constitué des sous-systèmes :

- "setpoint_ generation" pour générer les consignes de position à envoyer aux axes.
- "measure_ pos" pour lire la position mesurée sur les règles
- "controller" pour réaliser l'asservissement des axes
- "to_ 611U" pour envoyer la commande $\pm 10V$ de vitesse aux variateurs
- "logic" pour gérer le comportement logique (sélection des modes de marche, gestion des sécurités...)

Chacun de ces sous-systèmes principaux est constitué de nombreux autres sous-systèmes, l'implémentation ne peut donc pas être détaillée davantage dans ce manuscrit. Parmi les tâches délicates à effectuer, il faut effectuer la prise d'origine mesure sur les règles Heidenhain à distance codée, mettre en place de nombreuses sécurités logicielles, créer les différents modes de marche (manuel, prise de référence, continu), gérer le potentiomètre des avances, développer le mode manuel avec sélection des axes et déplacement avec une manivelle... Ce modèle permet de piloter correctement la machine-outil, mais il mériterait d'être amélioré. Une remise à plat totale serait nécessaire pour bénéficier du recul et de l'expérience acquise durant cette thèse.

En plus du matériel, la société dSPACE développe un logiciel d'interfaçage entre le calculateur temps réel et l'ordinateur Windows. Le logiciel ControlDesk permet de rapidement avoir accès aux différents signaux utilisés dans le modèle. La figure 77 présente l'onglet principal de contrôle de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC. On retrouve les informations principales et les différents modes de marche, c'est l'équivalent du pupitre pour une commande numérique classique. L'équivalent du mode continu pour exécuter un programme est le mode

2. Mise en œuvre technique de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC

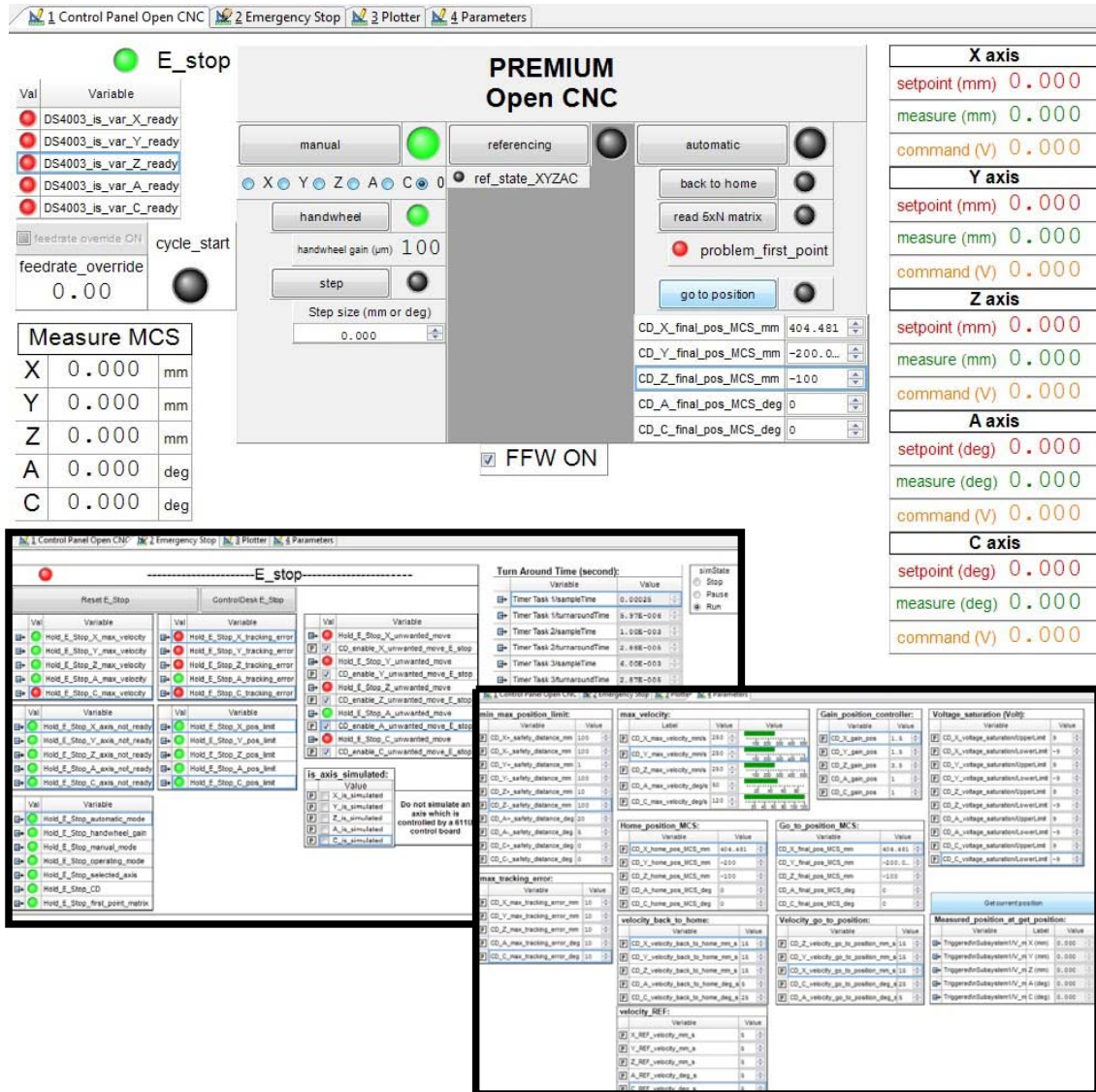


Figure 77 – Interface ControlDesk pour le pilotage de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC

"read 5xN matrix" qui permet de lire les consignes de position 5 axes générées par le logiciel VPOp. L'interpolation temporelle est effectuée "off-line" donc toutes les consignes échantillonnées sont calculées en amont sur un ordinateur standard avant d'être transférées au calculateur dSPACE. Cette situation n'est pas idéale, mais l'espace mémoire de la carte DS1006 permet de stocker des matrices de très grandes tailles (plus de 30 minutes d'usinage). Le calcul de l'interpolation temporelle en temps réel sur le calculateur dSPACE n'est pas inenvisageable, mais cela nécessiterait d'avoir de compétences avancées en informatique temps réel pour restructurer et implanter le code.

Les autres onglets (en bas de la figure 77) sont utilisés pour l'affichage des différentes sécurités logicielles intégrées dans le modèle de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC et pour de modifier à la volée les paramètres importants du modèle de pilotage.

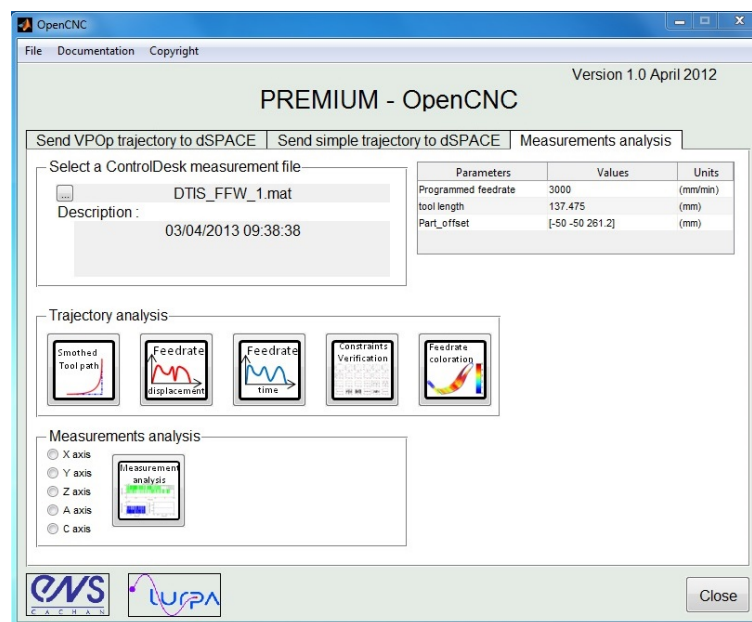


Figure 78 – Interface Matlab pour transférer les trajectoires et analyser les mesures

Associée à l'interface développée sur le logiciel ControlDesk, l'interface présentée sur la figure 78 permet de traiter rapidement les fichiers de mesures issus de ControlDesk. De plus, le premier onglet "Send VOP trajectory to dSPACE" permet d'écrire directement dans la mémoire du calculateur temps réel avec les fonctions MLIB de dSPACE pour transférer les trajectoires. Il est ainsi facile de transférer les « programmes » précalculés.

Le travail sur le développement des différentes interfaces utilisateurs est important pour faciliter l'utilisation de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC et pour limiter les risques d'erreur. En effet, ces interfaces permettent de rapidement vérifier les trajectoires avant leur exécution.

L'armoire de commande visible sur la gauche de la figure 79 contient l'ordinateur standard ainsi que les cartes dSPACE nécessaires au pilotage des 5 axes de la machine. Au-dessus du boîtier dSPACE, on retrouve les panneaux d'interface modulaire où sont branchées les entrées-sorties analogiques et les règles de mesure. Sur le montant de l'armoire, on voit également la manivelle dédiée au mode de pilotage manuel avec sa roue codeuse et ses sélecteurs pour déplacer les axes manuellement.

Pour conclure sur la mise en œuvre technique du matériel, ce travail permet de disposer des deux modes de pilotage (commande numérique industrielle Siemens 840D et commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC) sur une machine d'usinage 5 axes performante. La situation hybride avec le fonctionnement de la commande numérique Siemens en parallèle de la commande numérique ouverte a limité le travail d'ingénierie, mais ne pose pas de problème du point de vue du pilotage des axes. Il faut moins d'une heure trente pour passer d'une configura-

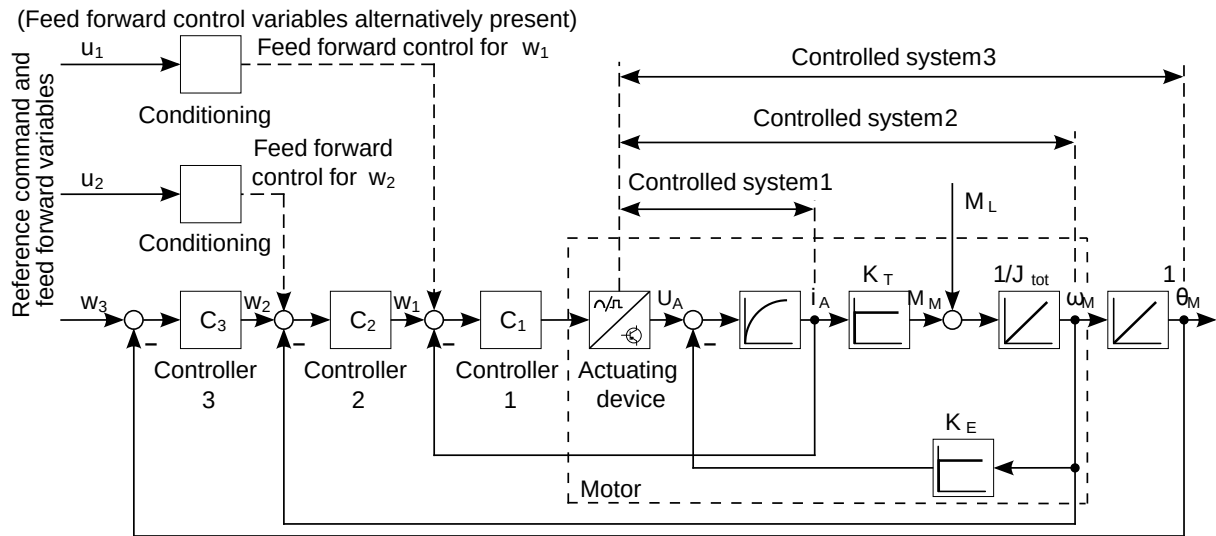


Figure 79 – Photo de l’armoire de commande dSPACE et de la machine-outil Mikron

tion à l’autre. Cela permet de faire des comparaisons entre les nouveaux travaux de recherche effectués et la solution industrielle performante classiquement utilisée.

Comme nous l’avons vu en introduction, la commande numérique PREMIUM-OpenCNC est ouverte dans le sens où le passage du trajet FAO au mouvement physique des axes est parfaitement maîtrisé. Comme nous allons le voir par la suite, cette maîtrise permet de modifier la structure de l’asservissement, de modifier l’algorithme d’interpolation, de proposer de nouvelles façons de calculer les trajectoires d’usinage...

La dernière étape avant d’usiner consiste à doter la commande PREMIUM-OpenCNC d’un asservissement performant.


 Figure 80 – Structure cascade avec anticipation [Groß *et al.*, 2001]

3 Contrôle temps réel des axes

Comme nous l'avons évoqué dans la partie 3.3 du chapitre 1, le contrôle temps réel des axes de machine-outil constitue un domaine à part entière de l'ingénierie des systèmes asservis. La figure 80 présente une structure classique d'asservissement d'axe. On retrouve la modélisation du moteur à courant continu avec en cascade le contrôleur 1 pour la boucle de courant, le contrôleur 2 pour la boucle de vitesse et le contrôleur 3 pour la boucle de position. La structure cascade offre de nombreux avantages tels qu'un réglage pas à pas en partant de la boucle interne pour aller vers les boucles externes, une possibilité de rejeter les perturbations directement dans les boucles internes afin ne pas perturber la boucle de position... [Groß *et al.*, 2001]. En effet, les boucles internes ont des bandes passantes plus grandes que les boucles externes, les fréquences de contrôle sont adaptées à ces différentes dynamiques. Pour le pilotage avec la commande PREMIUM-OpenCNC, la boucle de courant est fermée à une période de $125 \mu s$, celle de vitesse à $250 \mu s$ et celle de position à $1 ms$.

En plus des commandes en boucle fermée, des actions d'anticipation ("feedforward" ou FFW) sont utilisées sur les axes des machines-outils. Elles permettent d'envoyer directement soit la vitesse, soit l'accélération de commande au niveau des boucles internes. Comme nous le verrons sur des exemples, ces techniques d'anticipation réduisent beaucoup les écarts de contour à la trajectoire.

3.1 Structure d'asservissement avec anticipation

L'utilisation de l'anticipation sur les machines-outils est tout à fait classique, mais la littérature scientifique est très pauvre à ce sujet. Ce manuscrit tente de regrouper les références

disponibles et de clarifier le principe de fonctionnement et d'implémentation de l'anticipation. Dans sa thèse, David Prévost a travaillé sur la modélisation de l'asservissement de la machine Mikron en intégrant les anticipations en vitesse et accélération [Prévost, 2011]. Les modèles obtenus permettent de bien simuler les écarts, mais pour arriver à ce résultat, la structure d'asservissement est complexifiée par l'ajout de paramètres de recalage. Dans ce manuscrit, une structure d'asservissement classique sera conservée.

Dans la littérature, le terme "feedforward" peut être associé à différentes stratégies de contrôle. Le livre de [Groß *et al.*, 2001] fait référence pour ce qui est du contrôle des axes de machines-outils. Ce livre édité par Siemens donne des explications brèves, mais pertinentes sur l'anticipation, la suite tentera d'expliquer les idées principales cachées derrière cette technique de contrôle. L'article de [Lambrechts *et al.*, 2005] présente des résultats intéressants pour le contrôle de systèmes souples et fournit des bibliothèques Simulink très utiles. Comme l'indiquent ces deux références, il est préférable de ne pas dériver les signaux de position. En effet, l'interpolation temporelle donne les consignes de position, mais également les consignes de vitesse et d'accélération qui peuvent être utilisées directement.

Dans sa thèse, Richard Béarée étudie l'influence des paramètres d'asservissement sur le suivi de profil [Béarée, 2005]. Sur une structure d'anticipation légèrement différente de celle décrite dans [Groß *et al.*, 2001], de nombreuses expressions analytiques permettent notamment d'analyser l'influence du gain proportionnel de la boucle de position et de l'anticipation en vitesse.

La documentation Siemens décrit les paramètres qui sont utilisés pour réaliser l'anticipation. Des informations sont disponibles dans le document [Siemens, 2006b] à la rubrique "K3 Compensation" et plus particulièrement dans "Dynamic feedforward control (following error compensation)". On voit par exemple que pour l'anticipation en vitesse, le paramètre représentant la constante de temps équivalente de la boucle de vitesse est utilisé. La structure d'asservissement présentée ici se calque au maximum sur la structure classiquement utilisée dans la commande numérique Siemens 840D.

Le reste des travaux se concentre sur l'anticipation en vitesse sachant que les principes sont équivalents pour la mise en œuvre de l'anticipation en accélération. L'anticipation en accélération n'a pas été implémentée pour des raisons techniques. En effet, en plus de récupérer les signaux des codeurs de position des axes, il faudrait également mesurer la vitesse de rotation des moteurs pour réaliser les boucles de position et de vitesse dans le calculateur dSPACE.

La figure 81 présente la structure d'asservissement pour l'anticipation en vitesse. L'accélération a_s est intégrée une fois pour obtenir la vitesse n_s puis une deuxième fois pour obtenir la position x_s de consigne. Après interpolation, la consigne de vitesse est directement envoyée à l'entrée de la boucle de vitesse. Le facteur K_{nV} vaut 1, en dernier recours il peut être très légèrement modifié pour faire un réglage fin de l'anticipation. Le passage de ce facteur à 1.05 ou

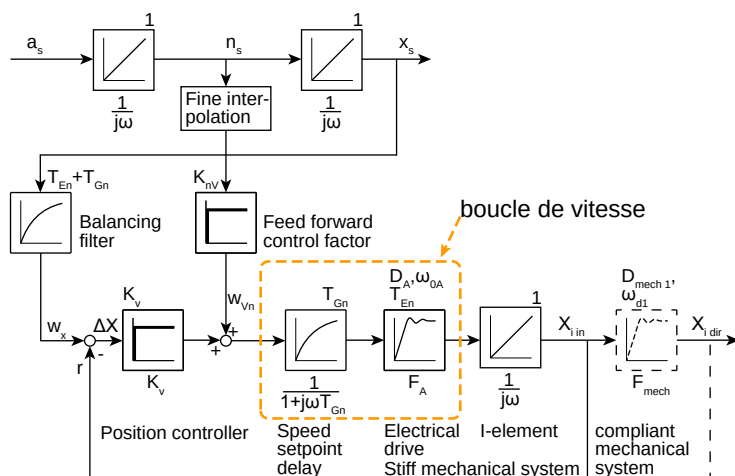


Figure 81 – Structure d’asservissement pour l’anticipation en vitesse [Groß *et al.*, 2001]

0.95 a déjà un impact très important sur le comportement de l'asservissement. La consigne de position n'est pas envoyée directement au comparateur de position, elle est adaptée par le "balancing filter" qui joue un rôle primordial. L'anticipation de vitesse porte bien son nom, il s'agit d'envoyer à l'avance le signal de commande en vitesse. Pour cela, la consigne de position est retardée grâce à ce filtre. Ce décalage permet de ne pas commander deux fois le système (par la correction proportionnelle et par l'action anticipatrice). La principale difficulté pour régler l'anticipation est de déterminer la constante de temps de ce filtre du premier ordre.

Si l'anticipation est parfaite, l'ensemble du signal de commande en vitesse provient du terme anticipatif et l'écart de poursuite ΔX doit être nul. En pratique, l'écart entre le modèle du premier ordre utilisé dans le balancing filter et la réponse réelle de la boucle de vitesse est compensé par le correcteur K_v de la boucle de position.

L'implémentation réelle de l'anticipation en vitesse dans la commande numérique PREMIUM-OpenCNC est légèrement différente de la structure présentée ici. En effet, en pratique il faut aussi gérer les différentes fréquences de pilotage puisque le signal d'anticipation est à la fréquence de la boucle de vitesse. Même si ce n'est pas optimal, les consignes de position sont dérivées et réinterpolées avec un polynôme cubique pour obtenir les consignes de vitesse envoyées toutes les $250 \mu s$. La figure 82 présente la structure d'asservissement réellement utilisée dans le calculateur temps réel pour le cas de l'axe A. La réinterpolation cubique est basée sur quatre échantillons ($t-1ms$, t , $t+1ms$ et $t+2ms$). Sachant qu'il y a un facteur quatre entre les fréquences des boucles de vitesse et de position, cette réinterpolation cubique permet de calculer les échantillons de position à $t+0.25ms$, $t+0.5ms$, $t+0.75ms$ en gardant la continuité de l'évolution. On remarque d'ailleurs que le signal est lissé avant d'être dérivé pour couper les hautes fréquences et éviter les problèmes dans la dérivation discrète.

Pour l'implémentation réelle, l'ensemble du modèle doit être discret, il est donc nécessaire d'utiliser la transformée en z qui est l'équivalent discret de la transformée de Laplace pour écrire

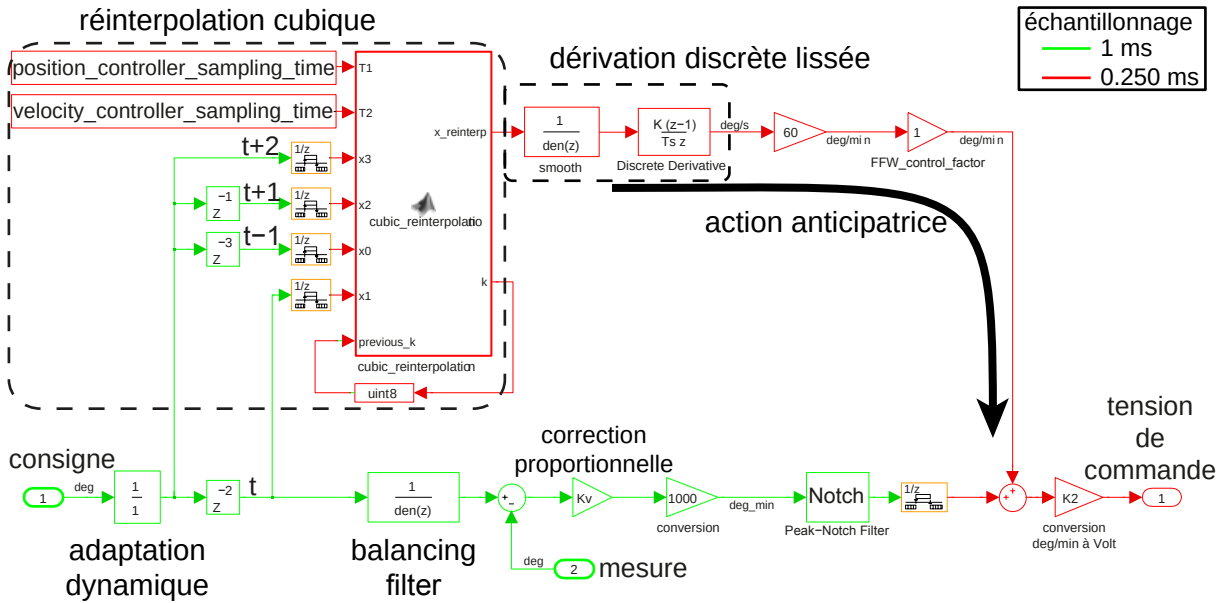


Figure 82 – Implémentation réelle de la structure d'asservissement avec anticipation en vitesse

les fonctions de transfert. En bas de la figure 82, on retrouve le balancing filter qui permet de retarder l'action proportionnelle par rapport à l'action anticipatrice pour ne pas commander doublement le système. Des mesures expérimentales montrent que quand le balancing filter est bien réglé, la correction proportionnelle K_v ne fournit que 1 à 5 % de la tension de commande de la boucle de vitesse. Un filtre de Notch (coupe-bande) inséré sur la correction proportionnelle permet d'éviter de piloter le système sur la bande de fréquences correspondant à la résonance de l'axe ce qui ne ferait qu'amplifier les vibrations.

La structure d'asservissement étant posée, il reste à régler les paramètres en fonction du comportement dynamique des axes. Le réglage des paramètres d'asservissement n'est pas une tâche aisée et cette thèse n'a pas pour objectif d'optimiser le comportement de l'asservissement. Ainsi, même si nous savons que le réglage de la commande numérique Siemens 840D n'est pas optimal, tous les paramètres communs sont recopiés dans les variateurs 611U de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC. Seuls le balancing filter et l'adaptation dynamique sont ré-identifiés expérimentalement.

3.2 Mesure de la réponse dynamique des axes

Comme nous l'avons vu précédemment, il est nécessaire de mesurer les temps de réponse de chacun des axes pour régler l'anticipation. Le logiciel SimoComU fourni par Siemens pour paramétrer les variateurs 611U peut être utilisé pour analyser le comportement dynamique des axes. En effet, il est possible de solliciter l'entrée des boucles de courant ou de vitesse par

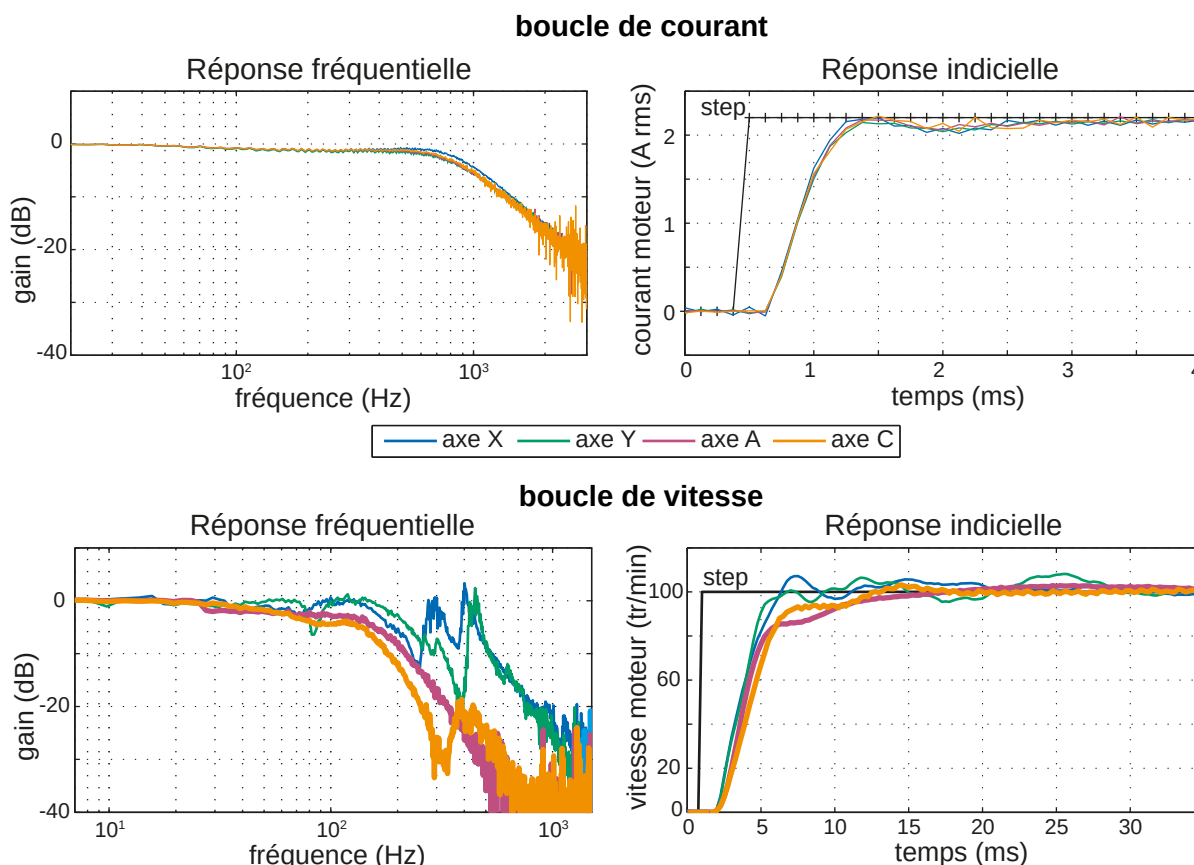


Figure 83 – Réponses fréquentielle et indicielle des boucles de courant et de vitesse

un échelon (step) ou par une fonction de balayage fréquentiel. Ainsi, on obtient la réponse fréquentielle et la réponse indicielle des axes. Sur la figure 83, on peut constater que la réponse de la boucle de courant est équivalente pour les axes X,Y, A et C. L'axe Z n'est pas testé pour des raisons de sécurité, car il est soumis à la gravité. On remarque que la bande passante de la boucle de courant est de l'ordre de 1000 Hz.

Au niveau de la boucle de vitesse, les comportements sont plus intéressants car des résonances apparaissent sur les axes X et Y aux alentours de 200 à 300Hz. La bande passante des boucles de vitesse est de l'ordre 100 Hz. On note aussi une différence de comportement entre les axes de translation et les axes rotatifs.

La toolbox Matlab "System Identification" est utilisée pour identifier un modèle à partir des réponses fréquentielles et indicielles. Sur les réponses à un échelon, on remarque qu'une modélisation fine du comportement devrait comporter un retard pur combiné à un système du premier ou du deuxième ordre. Cependant, la modélisation par un simple premier ordre est suffisante pour capter la majorité du comportement. Le temps de réponse identifié pour un système équivalent du premier ordre est de 0.87ms pour la boucle de courant. Étant donné la rapidité de cette boucle, elle peut être considérée comme idéale. Le temps de réponse équivalent

de la boucle de vitesse pour les axes de translation est identifié à 2.7 ms alors que celui des axes A et C est de 3.5 ms . Cette différence devra être compensée pour adapter les dynamiques comme nous allons le voir ci-après.

Ces essais permettent d'identifier un comportement équivalent de la boucle de vitesse pour déterminer la constante de temps du "balancing filter" utilisé pour l'anticipation en vitesse.

Il serait intéressant d'effectuer des essais pour connaître les réponses fréquentielles et indicielles des boucles de position. Mais cette boucle est réalisée dans la carte dSPACE et les fonctions d'analyse n'ont pas été développées.

3.3 Adaptation dynamique des axes

La mesure des temps de réponse des axes montre que les axes rotatifs répondent plus lentement que les axes de translation. Les axes A et C auront donc des écarts de poursuite plus grands que les axes X,Y et Z. Cette différence entraîne une désynchronisation des mouvements et des écarts de contour sur la trajectoire. Ici, le problème arrive en 5 axes, mais il est plus facilement compréhensible pour deux axes de translation. Pour une trajectoire à 45° sur deux axes XY, si les écarts de poursuite des deux axes sont identiques, l'écart de contour est nul. Pour obtenir des écarts de poursuite identiques, on pourrait diminuer le gain proportionnel K_v . En effet, l'unité du gain K_v est $(m/min)/mm$ ce qui signifie qu'avec un gain unitaire, un déplacement à 1 m/min génère un écart de poursuite de 1 mm . Cependant, la diminution de K_v aurait aussi pour effet de diminuer les performances au niveau du rejet des perturbations. Une autre solution consiste à retarder les axes les plus rapides. Cette technique s'appelle « adaptation dynamique » chez Siemens, voir [Siemens, 2006a] à la rubrique "G2 Velocities, Setpoint/Actual-Value Systems, Closed-Loop Control".

La figure 84 présente le principe de l'adaptation dynamique. L'axe 1 initialement plus rapide est ralenti par un filtre du premier ordre ayant pour constante de temps "DYN_MATCH_TIME" de sorte que $\text{Axis 2 equiv time} = \text{Axis 1 equiv time} + \text{DYN_MATCH_TIME}$. Ainsi, les dynamiques des deux axes sont rendues équivalentes.

Le principe est exactement le même que l'on parle d'axes de translation ou d'axes de rotation. Dans la commande PREMIUM-OpenCNC, un filtre du premier ordre est utilisé pour légèrement retarder ($3.7-2.5=0.8\text{ ms}$) les axes de translation par rapport aux axes de rotation. En effet, quand l'anticipation en vitesse est activée, le temps de réponse de l'axe est égal au temps de réponse de la boucle de vitesse précédemment identifié.

Pour un usinage 5 axes, l'adaptation dynamique des axes est particulièrement importante, car une petite désynchronisation peut entraîner un effet important sur l'écart de contour à cause du bras de levier sur les rotations.

L'ensemble des développements précédents sur l'anticipation en vitesse et sur l'adaptation

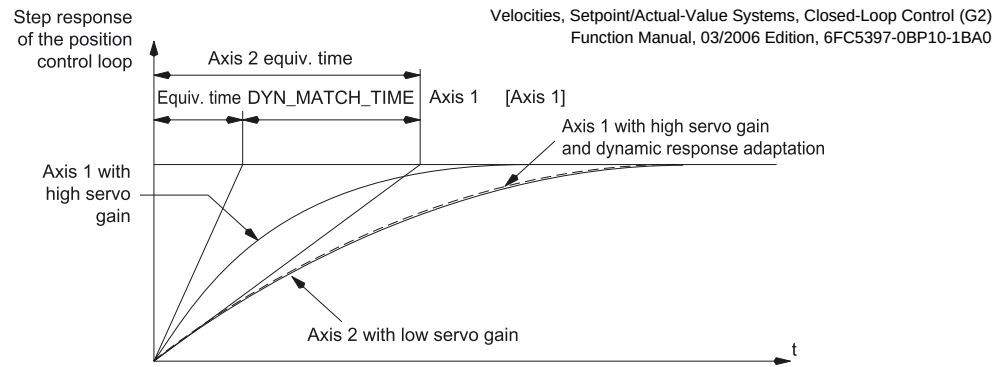


Figure 84 – Adaptation dynamique des axes [Siemens, 2006a]

dynamique permettent d'utiliser la machine au maximum de ses capacités tout en conservant des erreurs d'asservissement acceptables pour usiner. Des mesures expérimentales permettent d'attester des résultats obtenus.

3.4 Applications

Deux trajectoires sont utilisées pour montrer les gains apportés par l'anticipation en vitesse par rapport à un contrôleur proportionnel simple.

Un modèle de l'asservissement a été utilisé pour régler et analyser le comportement des correcteurs, mais dans la suite seuls les résultats expérimentaux sont présentés. Cependant, une modélisation simple de la boucle de vitesse par un système du premier ordre avec la constante de temps identifiée en 3.2 permet de relativement bien simuler les écarts de contour. Les modèles plus détaillés développés par David Prévost dans sa thèse [Prévost, 2011] ont également été utilisés pour mieux simuler le comportement dynamique.

3.4.1 Exemple 2 axes

La trajectoire du trident utilisée dans le chapitre 3 (figure 64) est reprise pour tester l'asservissement. Au niveau de la boucle de position, trois contrôleurs différents sont testés pour le pilotage de la machine Mikron : un contrôleur proportionnel simple (P), un contrôleur avec anticipation en vitesse telle que présenté en 3.1 (FFW) et un contrôleur prédictif de type "Generalized Predictive Controller" (GPC). La commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC permet de facilement basculer d'un contrôleur à l'autre et d'utiliser n'importe quelle structure d'asservissement. Ces trois contrôleurs sont également comparés à l'asservissement réalisé par la commande numérique Siemens 840D.

Le contrôleur prédictif est développé par Supélec et nous tenons en particulier à remercier Mr Pedro Rodriguez pour le réglage des polynômes R, S et T de ce contrôleur. Ces polynômes sont déterminés à partir des modèles de David Prévost et en utilisant les algorithmes de robustification développés par Supélec [Boucher *et al.*, 2003].

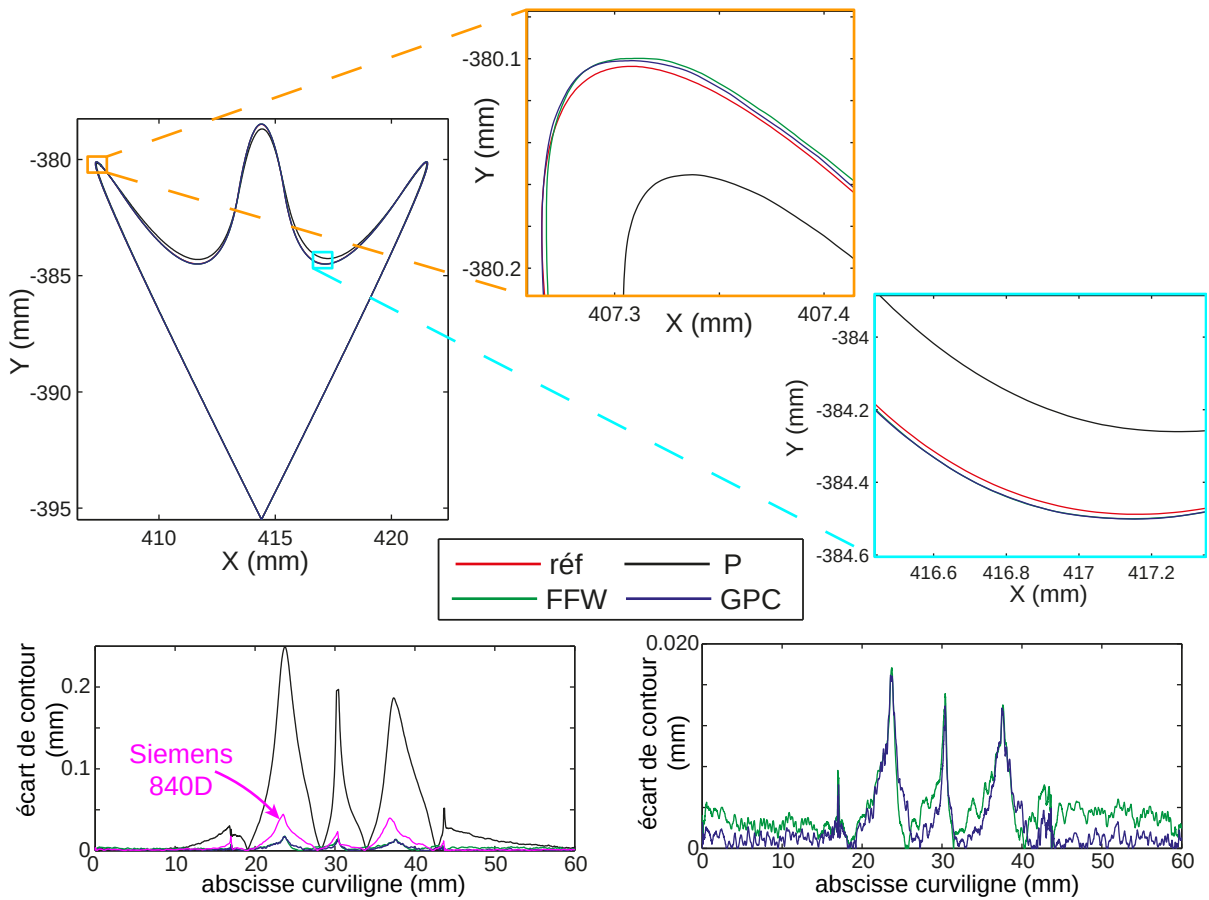


Figure 85 – Écarts de contour dus à l'asservissement sur la trajectoire du trident

La figure 85 présente les résultats obtenus par les différents contrôleurs. On remarque que le contrôleur proportionnel simple (P) n'est vraiment pas adapté pour réaliser l'asservissement d'une machine-outil de ce type. En effet, sur cette trajectoire les écarts de contour atteignent plus de 0.2 mm ce qui n'est vraiment pas acceptable pour une opération d'usinage. Les deux autres contrôleurs fournissent des résultats bien meilleurs en terme d'écarts de contour (inférieur à 0.02mm). Sur le graphique en bas à droite, on peut voir que le correcteur GPC est légèrement meilleur que le correcteur avec anticipation en vitesse (FFW).

Pour la trajectoire du trident, nous avons vu que les profils de vitesse calculés par la commande numérique Siemens 840D et par VPOp sont très proches, figure 64. Il est donc possible de comparer les écarts introduits par l'asservissement sur cette trajectoire. Les écarts d'asservissement relevés à l'aide des traces de servo de la commande Siemens 840D sont plus grands que ceux obtenus avec la commande numérique ouverte. En effet, l'écart maximum atteint 0.04 mm alors que l'anticipation en accélération est activée, cela prouve que les réglages de la commande numérique Siemens 840D peuvent être améliorés et que l'asservissement réalisé sur la commande PREMIUM-OpenCNC atteint un niveau de performance satisfaisant.

Les correcteurs FFW et GPC peuvent encore être perfectionnés, mais pour obtenir des gains significatifs en terme d'écart de contour, il semble nécessaire d'avoir accès à la boucle de vi-

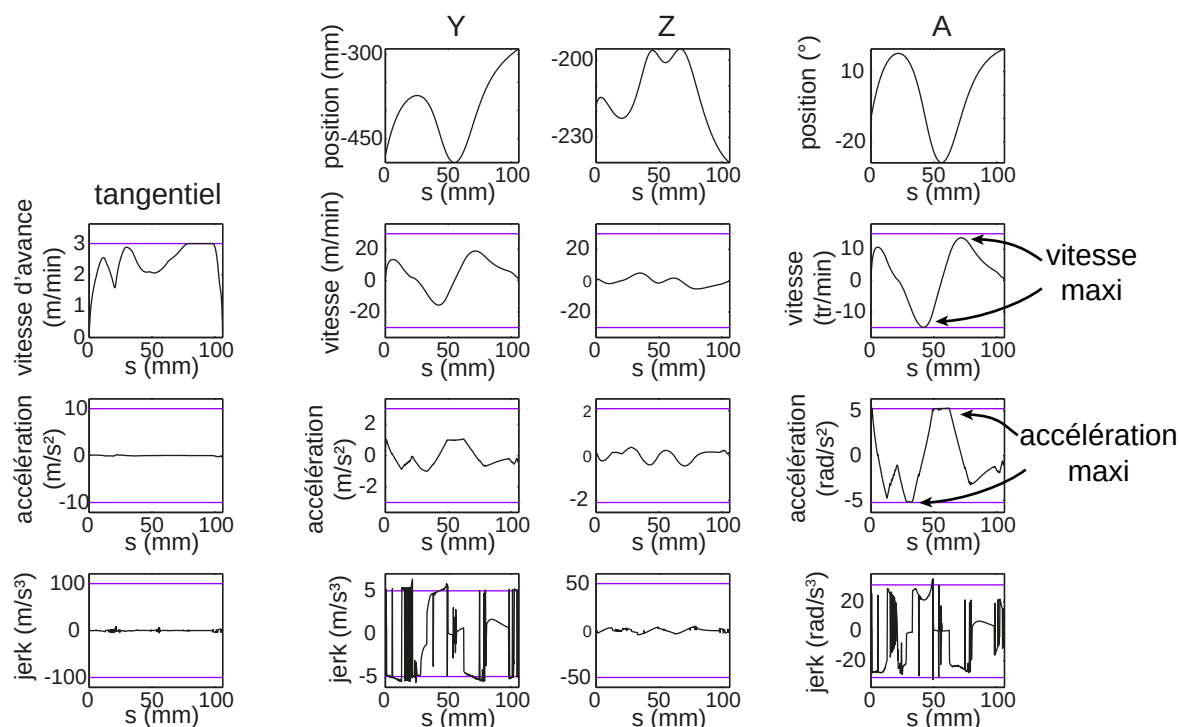


Figure 86 – Vérification des contraintes cinématiques pour la trajectoire complexe 5 axes

tesse. Cela permettrait par exemple d’implémenter l’anticipation en accélération et de commander plus rapidement le système.

L’utilisation de l’anticipation en vitesse a permis de diviser les écarts de contour maximum par un facteur 10 sur cet exemple. En général, on peut s’attendre à ce que l’ajout de l’anticipation en vitesse divise par un facteur 5 à 10 les écarts de contour. À priori, il est possible de réduire encore les écarts en introduisant l’anticipation en accélération.

3.4.2 Exemple 5 axes

Cette dernière étude sur l’asservissement est réalisée sur la trajectoire qui sera utilisée pour l’application finale de la thèse présentée au chapitre 5. La trajectoire du point piloté de l’outil est contenue dans le plan YZ, mais les axes Y,Z et A bougent simultanément comme on peut le voir sur la figure 86. Ainsi, la trajectoire est dite « 5 axes ». Cette trajectoire est particulièrement délicate à suivre, car elle sollicite au maximum l’axe A et car la synchronisation des axes est particulièrement importante puisqu’une petite désynchronisation de l’axe A entraîne un grand écart de contour sur la surface usinée.

Les écarts de contour obtenus avec le correcteur proportionnel et avec le correcteur FFW sont présentés sur la figure 87. Pour cette trajectoire, l’utilisation d’un correcteur proportionnel basique est catastrophique puisque cela produit des écarts de contour de plusieurs millimètres au niveau du point piloté de l’outil. L’anticipation en vitesse et l’adaptation dynamique des axes ont permis de réduire les écarts de contour à quelques centièmes de millimètres ce qui est

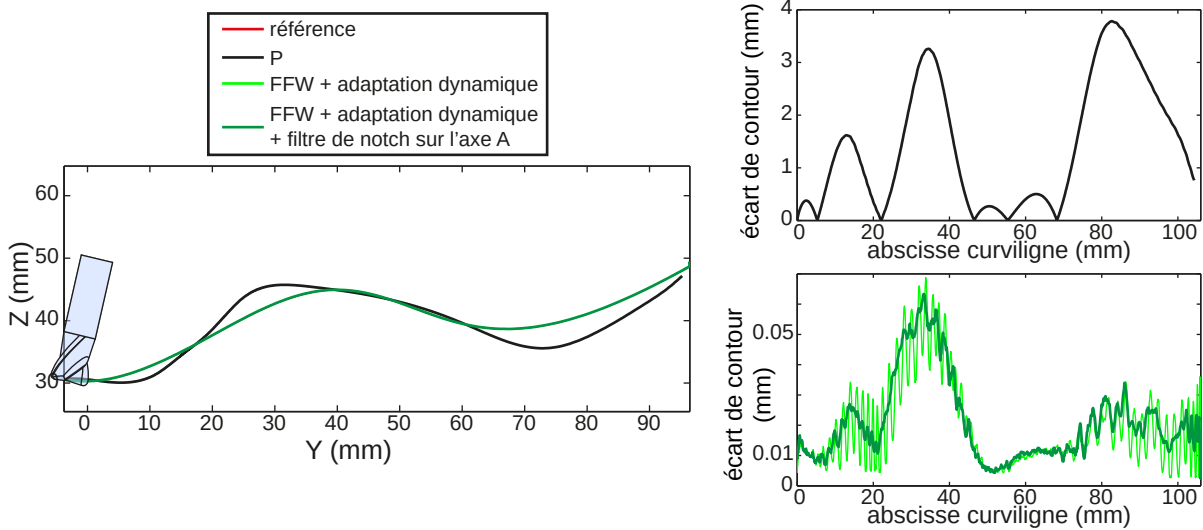


Figure 87 – Écarts de contour sur la trajectoire complexe 5 axes

tout à fait acceptable pour l'application visée par la suite. Cependant, une vibration de l'axe A produit une oscillation de l'écart de contour qui peut potentiellement laisser des marques sur la surface usinée. En effet, l'axe A a une flexibilité au niveau de la transmission entre le moteur et l'axe qui introduit une résonance à une fréquence de 25Hz. Pour ne pas exciter cette fréquence, un filtre de Notch est rajouté à la suite du gain K_v , figure 82. Ce filtrage permet de fortement limiter les oscillations de l'axe A et donc les oscillations de l'écart de contour mesuré comme on peut le voir sur le graphique en bas à droite de la figure 87. De petites oscillations sont encore présentes au niveau de l'axe Y, mais l'amélioration du comportement de l'asservissement n'a pas été poussée davantage. Cet exemple montre bien que la mise en œuvre expérimentale est importante pour obtenir un asservissement correct, car il est très difficile de modéliser l'ensemble des flexibilités de la machine.

Industriellement, la commande numérique Siemens utilise les positions mesurées sur le codeur du moteur et sur la règle attachée à l'axe pour détecter ce type de vibration. En effet, par comparaison il est possible d'isoler la contribution de l'entraînement qui n'est mesurée que par la règle montée sur l'axe. Des techniques d'amortissement actif sont utilisées pour réduire ce type de vibration.

Pour montrer l'intérêt de l'anticipation, la figure 88 présente la tension de commande générée par l'anticipation et la tension de commande générée par la correction proportionnelle pour l'axe A. On remarque que 99 % de la tension de commande vient de l'action anticipatrice et que l'action proportionnelle joue uniquement son rôle de correction. L'anticipation en vitesse permet d'obtenir un écart de poursuite très faible alors que l'axe est utilisé au maximum de ses capacités. Finalement, les travaux présentés dans ce chapitre aboutissent à un asservissement de qualité suffisante pour l'usinage d'une pièce dans des conditions UGV (vitesse maximum sur l'axe A et déplacement à 20 m/min de l'axe Y).

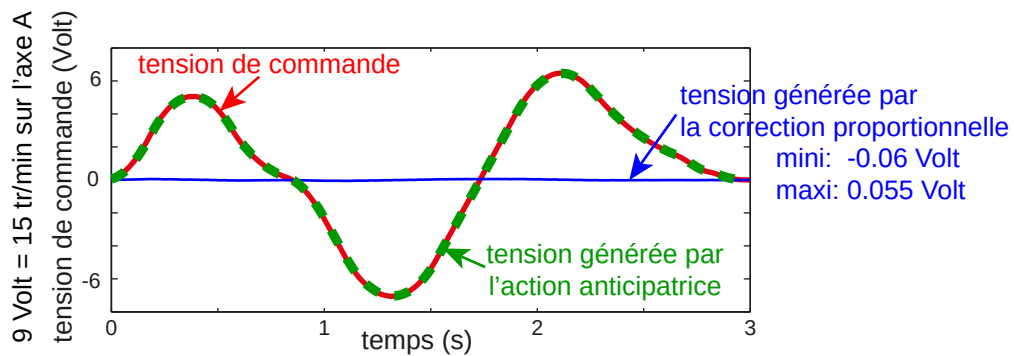


Figure 88 – Tension de commande sur l'axe A

Avec la structure d'asservissement présentée dans ce chapitre, il reste un problème sur l'écart statique. En effet, sans modèle de frottement ni terme intégrateur sur la boucle de position, le point piloté reste écarté d'un à deux microns de la position désirée.

L'objectif de la thèse n'est pas d'optimiser l'asservissement de la machine donc les travaux sur l'asservissement n'ont pas été poussés davantage. En effet, les écarts de contour obtenus grâce à l'anticipation en vitesse sont suffisamment petits pour l'application visée.

4 Conclusions

Ce quatrième chapitre de la thèse fait le lien entre les algorithmes numériques développés dans les chapitres précédents et l'implémentation physique sur une machine-outil.

La mise en œuvre technique de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sur la machine Mikron du laboratoire est présentée. Le passage de la maîtrise de la chaîne numérique à la maîtrise du déplacement des axes machine n'est pas aisé. En effet, l'utilisation d'un moyen industriel requiert un haut niveau d'exigence sur l'ensemble des tâches à effectuer, que cela soit au niveau des câblages électriques ou au niveau du modèle de pilotage. Sur l'aspect électrique, nous remercions en particulier Philippe Cornet et Patrice Lepoutre pour l'aide qu'ils ont fournie lors des phases de câblage.

La deuxième partie du chapitre développe la dernière brique de base de la commande numérique qui est le contrôle temps réel des axes. Au niveau de l'asservissement, il existe peu de documents expliquant comment piloter un axe de machine-outil. L'anticipation est une technique utilisée classiquement par les industriels pour piloter des machines d'usinage à grande vitesse, mais peu d'articles scientifiques se sont penchés sur cette technique. Les éclairages fournis dans ce chapitre permettent de mieux comprendre comment régler l'anticipation et des relevés expérimentaux montrent les gains apportés en terme d'écart de contour. Enfin, l'adaptation dynamique des axes est également un élément qui doit être pris en compte lors du réglage de l'asservissement d'une machine-outil.

Sur le plan technique, la bonne connaissance de la commande numérique Siemens 840D a été un atout important. Cependant, tout le travail sur l'intégration du système temps réel dSPACE était totalement nouveau pour le laboratoire ; de même que le paramétrage de la commande numérique Siemens pour qu'il soit possible de déplacer les axes sans que celle-ci se mette en défaut. À ce propos, nous tenons à remercier M. Mourier de l'ENISE (précédemment employé par Siemens) pour les échanges téléphoniques qui ont constitué une aide précieuse sur cet aspect. Finalement, le travail d'implémentation est long, mais il permet de toucher du doigt les problèmes techniques et physiques ce qui est nécessaire pour avoir une compréhension globale des problématiques.

Sur le plan scientifique, ce chapitre n'apporte pas de nouveautés, mais la mise en œuvre expérimentale est très importante pour valider les travaux de recherche. De plus, la structure d'asservissement avec anticipation est très classique industriellement, mais peu documentée. En plus des aspects pratiques présentés, il aurait été intéressant de développer les équations analytiques représentant le comportement de l'asservissement.

La mise en œuvre de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sur la machine Mikron représente l'aboutissement d'un travail important tant au niveau scientifique qu'au niveau technique. Étant donné que le laboratoire ne dispose pas d'ingénieur de recherche pour effectuer ce type d'implémentation technique, de nombreux mois de la thèse ont été nécessaires pour mener à bien ce projet. Finalement, grâce à cet investissement important, le laboratoire dispose maintenant d'un matériel expérimental rare même au niveau international avec une commande numérique industrielle et une commande numérique ouverte sur une machine d'usinage 5 axes performante.

Avec les travaux présentés dans ce chapitre, il est maintenant possible de piloter une machine d'usinage 5 axes et donc de réaliser des usinages avec la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC. Ceci permet de répondre à la deuxième problématique de la thèse :

► **Comment passer du monde numérique à la réalisation physique sur une machine-outil industrielle ?**

Maintenant que l'on dispose d'une machine d'usinage performante équipée d'une commande numérique ouverte, les contraintes imposées par les commandes numériques industrielles sont levées et il est possible d'améliorer le processus global d'élaboration des pièces usinées.

Chapitre

5

Interpolation de la trajectoire directement sur la surface à usiner

Les chapitres précédents permettent d'une part de calculer les consignes à envoyer aux axes de la machine et d'autre part d'exécuter une trajectoire sur une machine-outil 5 axes dans des conditions d'usinage grande vitesse.

Ce dernier chapitre de la thèse va montrer comment la maîtrise complète de la chaîne numérique permet d'améliorer le processus de fabrication. En effet, les barrières du postprocesseur et du code G sont tombées et on peut donc éviter les discrétisations et réinterpolations en décrivant le trajet d'usinage exactement. Le calcul de la trajectoire directement sur la surface à usiner permet d'obtenir des gains de productivité et de qualité importants pour l'usinage des surfaces complexes.

1 Introduction et bibliographie

Le format d'interpolation linéaire G1 est classiquement utilisé pour l'usinage des surfaces de formes complexes même si par définition ces surfaces sont composées de formes gauches difficilement représentables par une interpolation linéaire. Les problèmes liés au format d'interpolation ont déjà été évoqués dans le premier chapitre. Dans ce dernier chapitre, on analyse plus en détail deux inconvénients liés au format de description choisi : d'une part ces restrictions de formats induisent des écarts géométriques et d'autre part ils posent un problème au niveau de la vitesse d'avance atteinte le long des trajets plus ou moins fluides.

Sur la gauche de la figure 89, on retrouve l'interpolation linéaire G1 qui approxime la courbe à usiner par une polyligne. Les logiciels de FAO permettent de créer cette polyligne de sorte à respecter la tolérance d'usinage. La « tolérance d'usinage FAO » ou « tolérance de flèche » spécifie l'écart maximum autorisé au niveau du point piloté CL de l'outil. On parlera d'erreur de corde quand il s'agira des écarts engendrés sur la surface usinée (point CC). Un autre moyen de définir un trajet d'usinage est d'utiliser un format polynomial, ainsi l'outil suit une courbe, mais cette courbe est tout de même écartée de la courbe à usiner créant là encore un écart de flèche, figure 89 à droite.

Les erreurs de corde posent de nombreux problèmes, elles induisent par exemple l'effet dit

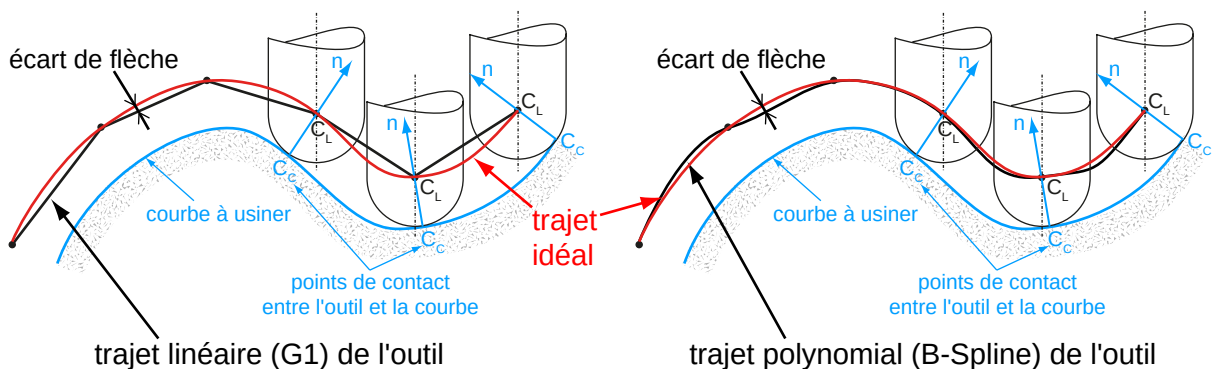


Figure 89 – Écart de flèche en interpolation linéaire et polynomiale

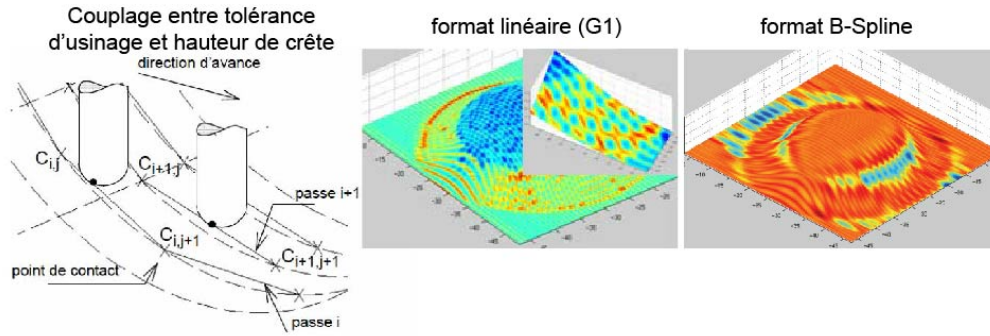


Figure 90 – Problèmes liés à l’erreur de corde et à l’effet peau d’orange [Lartigue *et al.*, 1999, Lartigue *et al.*, 2004]

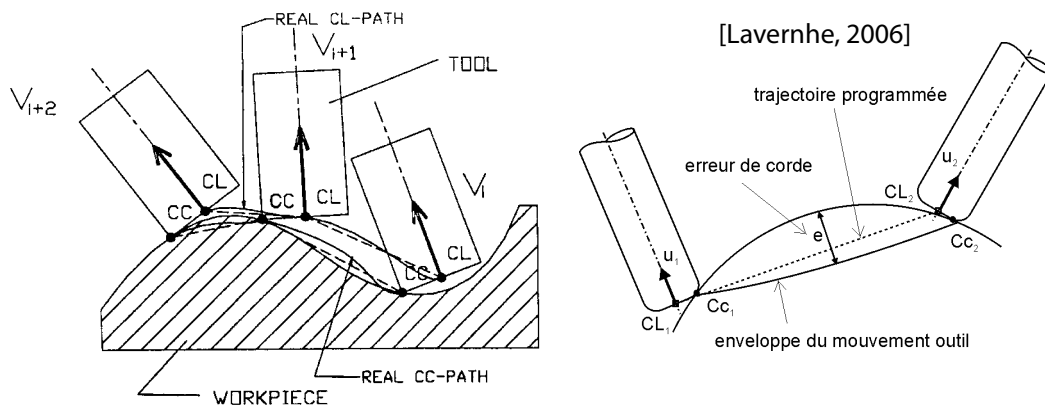


Figure 91 – Écart causé par la transformation géométrique 5 axes [Bohez, 2002]

« peau d’orange ». En effet quand deux passes adjacentes sont désynchronisées comme sur la gauche de la figure 90, le couplage entre l’erreur de corde (liée à la tolérance d’usinage) et la hauteur de crête (liée à la distance entre passes) induit un état de surface particulier comportant des cavités et rappelant la peau d’une orange. Le zoom de la figure centrale montre bien cet effet néfaste pour la qualité visuelle de la surface. Le format polynomial B-Spline est meilleur de ce point de vue et permet de limiter la création de cet effet peau d’orange, mais comme on le voit sur la droite de la figure 90, cela n’empêche pas d’avoir des écarts géométriques par rapport à la surface nominale. La synchronisation des passes permet de supprimer cet effet peau d’orange, mais cela fait apparaître des facettes sur la surface usinée. Même si le format polynomial n’est pas exempt d’erreur de corde, il est clairement plus adapté à l’usinage des surfaces de formes complexes que le format G1 [Duc, 1998]. Des méthodes permettant de créer les courbes B-Splines sont présentées dans [Lartigue *et al.*, 2001] et [Lavernhe *et al.*, 2004], la comparaison avec les stratégies G1 classiques démontre les avantages de ce format qui permet de réduire les temps d’usinage, la quantité de données...

En 5 axes, l’écart causé par la transformation géométrique non linéaire s’ajoute à l’erreur de flèche. En effet, comme on peut le voir sur la figure 91, la transformation géométrique va faire évoluer le point CC sur une courbe et non en ligne droite entre deux points programmés

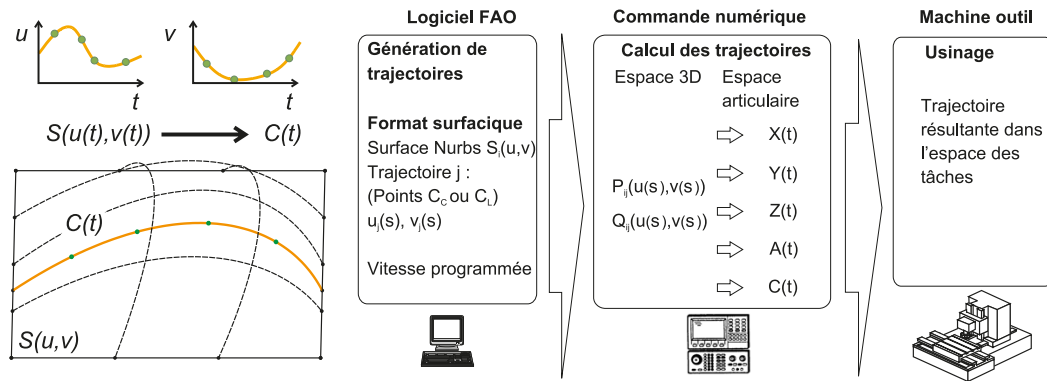


Figure 92 – Définition d'un trajet par des courbes paramétriques de la surface d'usinage [Lartigue *et al.*, 2004]

G1. L'erreur de corde résultante sur la pièce peut donc être plus importante que celle spécifiée dans le logiciel de FAO. S'il était possible de poser exactement l'outil sur la surface tout au long du trajet, ces problèmes seraient résolus. En effet, l'erreur de corde serait supprimée donc plus d'effet peau d'orange ni d'écarts géométriques par rapport à la surface que ce soit en 3 ou en 5 axes.

Les travaux de [Lartigue *et al.*, 2004, Tournier, 2009] proposent d'utiliser un format d'interpolation surfacique en reprenant le concept de surface d'usinage présenté dans [Duc *et al.*, 1999], figure 92. Il serait intéressant de définir un format surfacique interprétable par les commandes numériques et permettant de spécifier les trajets d'usinage dans l'espace paramétrique (u,v) de la surface d'usinage (offset de la surface à usiner). Que cela soit pour des courbes paramétriques appartenant à la surface à usiner, ou à la surface offset ; le développement de l'interpolation surfacique dans la commande numérique va tout à fait dans le sens du standard STEP-NC qui donne un cadre de description pour les entités géométriques surfaciques.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont proposé d'interpoler la trajectoire d'usinage à partir d'un format surfacique. On trouve par exemple [Koren et Lin, 1995] qui dès 1995 proposent d'introduire une nouvelle instruction « surface G code » dans le code G, figure 93. Une nouvelle architecture d'interpolation surfacique est présentée et testée, l'interpolateur temps réel à l'intérieur de la commande numérique reçoit la description de la surface à usiner en entrée et effectue la planification de la trajectoire. Cette méthode permet de calculer exactement la position de l'outil sur la surface à chaque pas d'interpolation. Ainsi, la surface usinée devrait être de meilleure qualité avec un temps d'usinage réduit. Lin poursuit les travaux [Lin, 2000] mais dans les deux articles, les contraintes cinématiques des axes ne sont pas prises en compte et un développement de Taylor au 2e ordre est utilisé pour obtenir une vitesse d'avance constante. Cette approche permet donc de mettre en valeur un premier avantage au niveau de la réduction des écarts de contour, mais la diminution potentielle du temps d'usinage n'est pas démontrée. Suite à ces travaux, on retrouve quelques articles traitant de l'interpolation surfacique. Cepen-

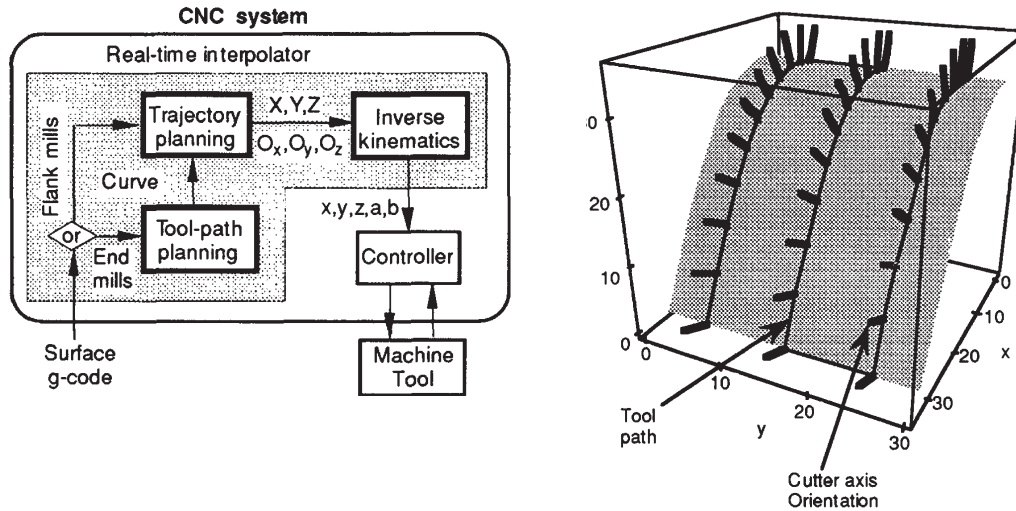


Figure 93 – Interpolation surfacique 5 axes [Koren et Lin, 1995]

dant, la littérature scientifique est assez réduite à ce sujet puisqu'après avoir énoncé le principe, il faut énormément de travail sur différents aspects pour mener cette idée à bien et démontrer expérimentalement les gains obtenus.

[Lo, 2000] présente différentes stratégies d'usinage posées directement sur la surface à usiner (iso-paramétrique, iso-crête, plans parallèles). Un intérêt particulier est porté à la planification de la vitesse d'avance au point de contact CC, mais là encore la vitesse d'avance est calculée constante. [Tsai et al., 2003] s'attache lui aussi à avoir une vitesse d'avance constante au point CC, au lieu de considérer classiquement la vitesse d'avance au niveau du point piloté de l'outil CL. Une première mise en œuvre expérimentale de cette approche surfacique est réalisée sur une table traçante 3 axes ce qui permet d'aller au bout de l'implémentation matérielle. Cependant, les contraintes cinématiques sur les axes machines qui découlent de l'usinage grande vitesse ne sont pas considérées. [Cheng et Tseng, 2006] présentent le même genre de développements avec là encore une attention particulière pour obtenir une vitesse d'avance constante au point de contact CC. [Liang et Li, 2009] travaillent également sur l'interpolation directement sur la surface tout d'abord en proposant un nouveau code G adapté à l'interprétation des surfaces, puis ils intègrent leurs travaux dans le standard STEP-NC [Liang et Li, 2013], figure 94. En effet, le modèle STEP-NC est très bien adapté pour recevoir la surface à usiner ainsi que la stratégie d'usinage. Ces informations peuvent être directement interprétées par une commande numérique compatible avec le standard STEP-NC pour réaliser l'interpolation surfacique en temps réel dans la CN.

Les travaux précédents sur l'interpolation de la trajectoire directement sur la surface montrent bien l'intérêt d'utiliser cette nouvelle façon de décrire les trajets d'usinage. Cependant, l'accent mis sur le calcul de la vitesse au point CC ne semble pas forcément très pertinent. En effet, d'un point de vue du procédé d'usinage, la différence entre une vitesse d'avance calculée au point

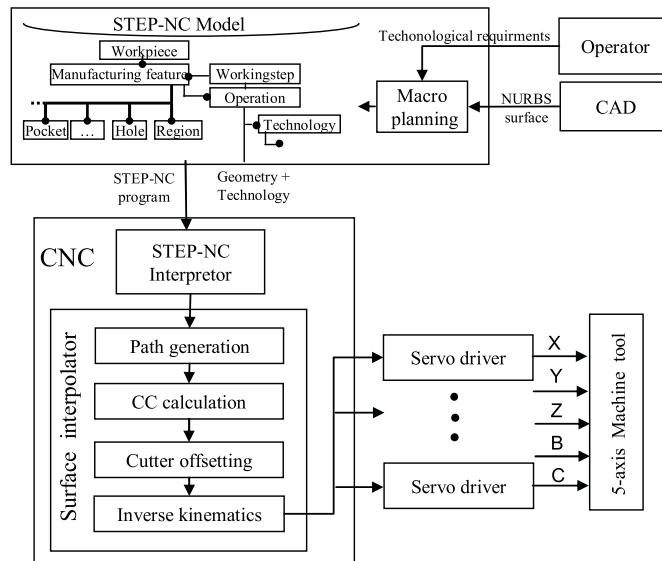


Figure 94 – Implémentation dans STEP-NC de l’interpolation surfacique [Li et Liang, 2011]

CL ou au point CC est souvent négligeable. D’autre part, il est bien plus important d’interpoler la trajectoire en respectant les contraintes cinématiques sur les axes et notamment le jerk pour limiter les vibrations de la structure de la machine-outil.

L’objectif de ce chapitre est donc de proposer une méthode d’interpolation de la trajectoire outil directement à partir de la surface à usiner. La méthode DTIS ("Direct Trajectory Interpolation on the Surface") apporte deux contributions importantes par rapport à la littérature. Tout d’abord, la trajectoire est exactement posée sur la surface à usiner tout en respectant les contraintes cinématiques de la machine-outil (vitesses, accélérations et jerks des axes). Ensuite, une démonstration expérimentale sur une pièce usinée dans des conditions UGV permet de montrer l’avantage de cette méthode par rapport aux meilleurs standards actuels. En comparant les résultats par rapport aux formats G1 et B-Spline, les gains au niveau des écarts macro-géométriques (tolérance d’usinage FAO), des écarts micro-géométriques (marques d’usinage dues à la vitesse d’avance) et du temps d’usinage seront démontrés sur une surface test. Cette surface test sera usinée en 5 axes avec un outil torique ce qui représente une des situations les plus difficiles, mais la méthode est également pertinente pour les usinages 3 axes avec un outil boule. La validation expérimentale constitue un élément très important qui oblige à résoudre l’ensemble des problématiques associées à l’usinage grande vitesse sur une machine-outil 5 axes.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit : dans une première partie, les écarts géométriques introduits dans la partie numérique du processus de fabrication sont présentés. Ensuite, la méthode de calcul de trajectoire DTIS est détaillée. Finalement, l’application de la méthode sur une surface usinée en 5 axes montre les gains rendus accessibles par la maîtrise globale de la chaîne numérique.

2 Étude des écarts géométriques introduits lors du processus de fabrication

Des écarts géométriques par rapport à la géométrie nominale définie en CAO apparaissent tout au long du processus de fabrication. Ici, nous nous intéresserons plus particulièrement aux écarts introduits dans la partie numérique du processus. Les écarts introduits par le contrôle temps réel des axes ont été traités dans la partie 3 du chapitre 4 et les problèmes liés au processus ne font pas l'objet d'étude dans ce manuscrit.

2.1 Présentation des écarts géométriques

La figure 95 présente les différents écarts géométriques introduits tout au long du processus de fabrication des pièces usinées. À partir de la géométrie CAO qui constitue le nominal à respecter, nous avons vu que les logiciels de FAO introduisent des écarts géométriques, appelés Δ_{FAO} , lors de la génération des trajets.

Une fois que le trajet est défini, l'étape d'interpolation peut également introduire des écarts géométriques. En effet, des mesures sur la commande numérique Siemens 840D montrent que l'interpolation temporelle à jerk limité est génératrice d'écarts géométriques qui sont notés Δ_{CN} . Pour étudier les écarts créés uniquement par l'algorithme d'interpolation temporelle, les consignes de position à l'entrée de l'asservissement sont mesurées alors que toutes les compensations sont désactivées. Ces compensations géométriques de la machine concernent d'une part l'orthogonalité et la rectitude des axes et d'autre part des compensations liées à la thermique. Certains écarts sont donc volontairement introduits pour compenser la géométrie machine et permettre d'améliorer la qualité géométrique de la pièce usinée.

Au niveau du contrôle temps réel, comme nous l'avons vu dans le chapitre 4, les réglages des asservissements ont une influence importante sur l'écart $\Delta_{\text{contrôle}}$. La stratégie d'asservissement développée dans cette thèse a des performances relativement proches des standards actuels des commandes numériques industrielles. Cependant, pour être perturbé par ces écarts dans les comparaisons, toutes les mesures de la géométrie sont faites en amont de l'étape d'asservissement.

Les écarts liés au procédé Δ_{process} ne sont pas étudiés ici. Seul l'aspect visuel de la pièce sera évalué suite à l'usinage sachant que les marques d'usinage sont principalement causées par la discrétisation FAO et par la vitesse d'avance réelle.

Les écarts Δ_{FAO} et Δ_{CN} interviennent au niveau purement numérique. Il peut sembler anormal d'introduire des écarts géométriques alors qu'aucun processus physique n'entre en jeu, les développements présentés dans ce chapitre vont s'attacher à supprimer ces écarts.

Dans la suite, on distinguera des écarts macro-géométriques dus à l'enveloppe du mouvement de l'outil, des écarts micro-géométriques dus au passage des dents de l'outil. Les écarts

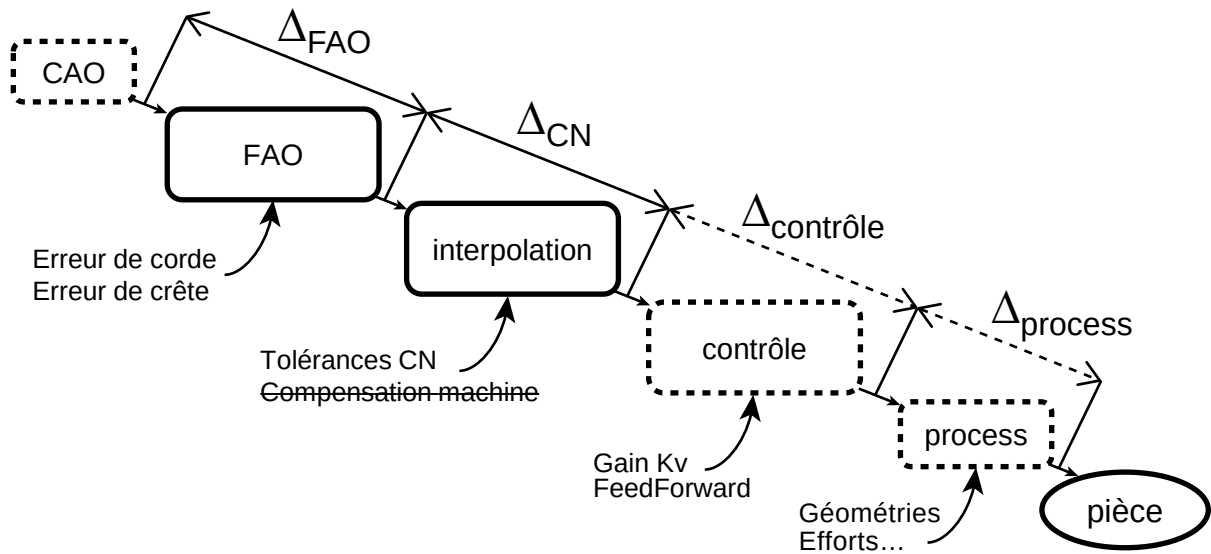


Figure 95 – Présentation des écarts géométriques introduits dans le process de fabrication

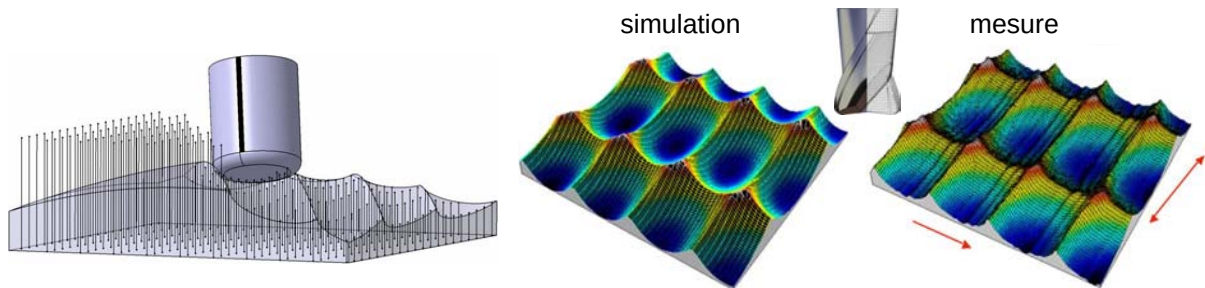


Figure 96 – Simulation de la surface usinée par Z-buffer [Lavernhe *et al.*, 2010]

macro et micro-géométries peuvent être simulés par la méthode dite « Z-buffer », [Jerard *et al.*, 1989]. Le principe est présenté sur la gauche de la figure 96, un ensemble de brins orientés suivant la direction Z sont coupés par l'outil. Après avoir déplacé l'outil suivant le trajet d'usinage, une vue discrétisée de la surface est récupérée. Cette méthode qui consiste à faire une multitude d'intersections entre les brins et les positions successives de l'outil est relativement simple en première approche. La difficulté réside dans le développement d'un code de calcul performant qui doit permettre de calculer rapidement toutes ces intersections. Sur la partie droite de la figure 96 on voit que cette technique permet de simuler finement le passage de dents et que cette simulation est très représentative des mesures micro-géométriques effectuées, [Lavernhe *et al.*, 2010]. En considérant l'outil comme une forme de révolution parfaite, les écarts macro-géométriques peuvent être simulés. En considérant un outil plus réaliste avec des dents, les phénomènes micro-géométriques peuvent être mis en évidence.

2.2 Écarts macro-géométriques introduits dans la chaîne numérique

Les écarts macro-géométriques sont bien connus et compris dans la littérature. La figure 97 présente le posage d'un outil torique sur une surface complexe. Le point CL est le point piloté de l'outil alors que le point CC est le point de contact entre l'outil et la surface à usiner. Sur la figure centrale, on voit que la distance entre passes Δ_p crée un écart géométrique entre la surface nominale et la surface usinée. Les écarts liés à la hauteur de crête (que l'on appellera « transversale ») ont fait l'objet de nombreux travaux. Il existe par exemple des stratégies dites iso-crêtes qui visent à créer un trajet d'usinage permettant d'obtenir une hauteur de crête uniforme sur toute la pièce usinée [Tournier, 2001]. Dans la suite du chapitre, on s'intéressera particulièrement au comportement le long d'une passe d'usinage, l'écart Δ_{FAO} traduit donc uniquement l'écart de contour lié à l'erreur de flèche. La crête transversale dépend de la stratégie d'usinage choisie. En effet, un posage exact peut permettre d'annuler l'erreur de flèche, mais l'erreur de crête dépend principalement de la distance entre passes Δ_p , elle est inhérente à cette technique de génération des surfaces. L'erreur de crête transversale ne sera donc pas étudiée dans la suite de ce chapitre.

La tolérance d'usinage (aussi appelée tolérance de flèche) est spécifiée dans le logiciel de FAO au moment du calcul du trajet. Il est en théorie possible d'approximer la courbe à usiner aussi finement que l'on veut en utilisant un très grand nombre de petits segments G1. Mais une tolérance d'usinage faible (inférieure au micron) nécessite la création de beaucoup de blocs dans le programme CN et la productivité s'en retrouve pénalisée étant donné certaines contraintes de traitement temps réel dans la CN. En effet, les commandes numériques ne peuvent pas traiter de façon performante une telle quantité de données. Et fondamentalement, il ne paraît pas naturel d'utiliser des milliers de lignes de code pour décrire une simple courbe polynomiale.

À l'heure actuelle, il n'existe donc pas de solution industrielle performante pour définir un trajet d'usinage complexe de manière exacte c'est-à-dire sans introduire d'erreur de flèche.

2.3 Écarts micro-géométriques introduits dans la chaîne numérique

Les écarts micro-géométriques sont créés par le passage des dents de l'outil. On appellera crête longitudinale la crête générée par le passage des dents lié à l'avance à la dent f_z , figure 97 à droite. L'avance par dent est calculée en fonction de la vitesse de rotation N de la broche et de la vitesse d'avance de l'outil. La crête longitudinale dépend donc de la vitesse d'avance ce qui va particulièrement nous intéresser par la suite. En effet, le passage de dents crée des motifs micro-géométriques sur la surface usinée qui peuvent générer des marques d'usinage et donc des défauts d'aspect sur la pièce usinée.

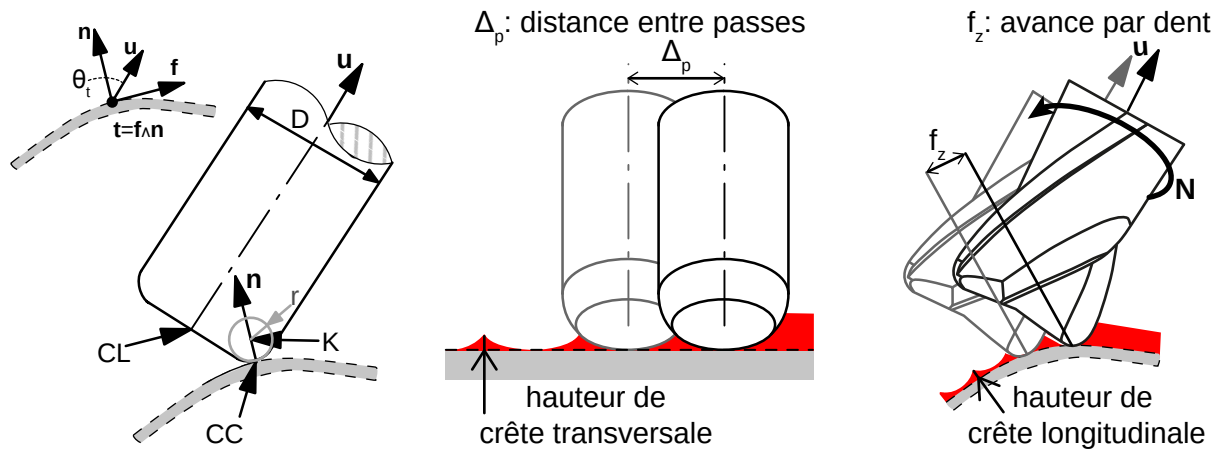


Figure 97 – Définition des hauteurs de crête transversales et longitudinales

La figure 98 présente schématiquement le processus de création des marques d'usinage liées à la variation de la vitesse d'avance. Une réduction brusque de la vitesse d'avance entraîne une variation brusque de l'avance par dent. La hauteur de crête longitudinale est donc localement beaucoup plus faible. Cette variation locale induit un défaut d'aspect que l'on appelle marque d'usinage. Plusieurs hypothèses sont évoquées pour expliquer ces marques : variation de la flexion d'outil, retour élastique de la matière coupée, vibrations... Il semble cependant que la majeure partie de ce phénomène soit explicable par une étude purement géométrique comme on le verra par la suite sur un exemple.

Les trajets interpolés en format G1 ou B-Spline sont moins fluides que le trajet idéal. La vitesse d'avance calculée le long de ces trajets peut donc présenter des variations brusques qui sont responsables des marques d'usinage. La stratégie d'interpolation DTIS proposée permet d'obtenir une géométrie lisse ce qui est un avantage important pour la suppression des fortes variations de vitesse d'avance constatées notamment sur les trajets G1. En effet avec une géométrie du trajet plus lisse, il est possible d'obtenir un profil de vitesse plus lisse et donc des variations de l'avance réelle par dent moins brusques. La méthode DTIS permet donc d'améliorer également la qualité micro-géométrique des surfaces usinées.

3 Méthode de calcul de trajectoires DTIS

La méthode de calcul de trajectoires DTIS pour "Direct Trajectory Interpolation on the Surface" permet d'interpoler la trajectoire directement sur la surface à usiner. Nous avons vu que des écarts de flèche sont introduits lors de l'étape de FAO. Ces écarts peuvent tout à fait être supprimés si les contraintes sur les formats d'échange de données entre la FAO et la CN sont levées. La méthode DTIS comporte deux aspects, d'une part la définition exacte du trajet outil posé sur la surface à usiner et d'autre part l'interpolation temporelle de ce trajet pour générer des consignes elles aussi exactement posées sur la surface.

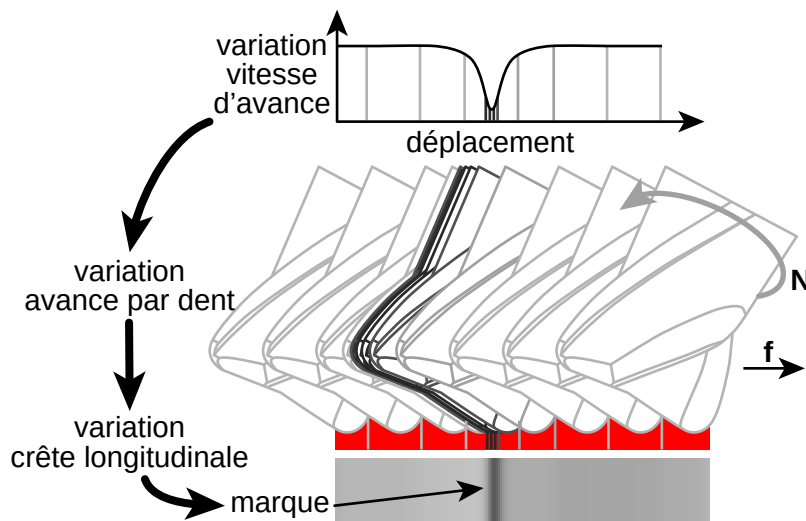


Figure 98 – Schéma de création des marques d'usinage liées à la vitesse d'avance

Idéalement, l'interpolation temporelle devrait être effectuée directement à partir de la définition exacte du trajet. Cependant, l'obtention de la géométrie du trajet peut ne pas être triviale et donc comme précédemment, les problèmes seront découplés. Ce découplage simplifie l'implémentation et introduit des écarts négligeables. Dans un premier temps, la géométrie du trajet est déterminée ; ensuite, l'interpolation temporelle est effectuée.

3.1 Définition du trajet d'usinage

Comme nous l'avons vu précédemment, les solutions actuelles pour décrire les trajets d'usinage ne permettent pas de spécifier des trajets complexes sans introduire d'écart géométrique. Avec la commande numérique ouverte développée, le format d'entrée de la CN n'est plus limité à l'interpolation linéaire ou polynomiale. Il est maintenant possible de définir un trajet d'usinage par n'importe quelle expression mathématique explicite ou implicite. La seule condition est de pouvoir calculer la position de n'importe quel point du trajet avec une précision aussi élevée que l'on veut.

Pour l'application proposée, le trajet d'usinage est déterminé par la définition :

- de la surface nominale à usiner,
- de la stratégie d'usinage (plans parallèles, iso-paramétriques, distance entre passes...),
- de l'outil utilisé (type, dimensions ...),
- du positionnement de l'outil en 5 axes (inclinaison, pivotement).

Cette définition des trajets d'usinage correspond tout à fait au concept développé dans STEP-NC qui contient déjà le formalisme adapté pour définir les éléments précédents. Par exemple, pour la définition de la stratégie d'usinage, la figure 99 présente les différentes classes prévues par la norme [ISO14649-11, 2004] pour l'usinage des surfaces de formes complexes. Le trajet est défini par des éléments de haut niveau comme les tolérances, le mode de balayage, le mode

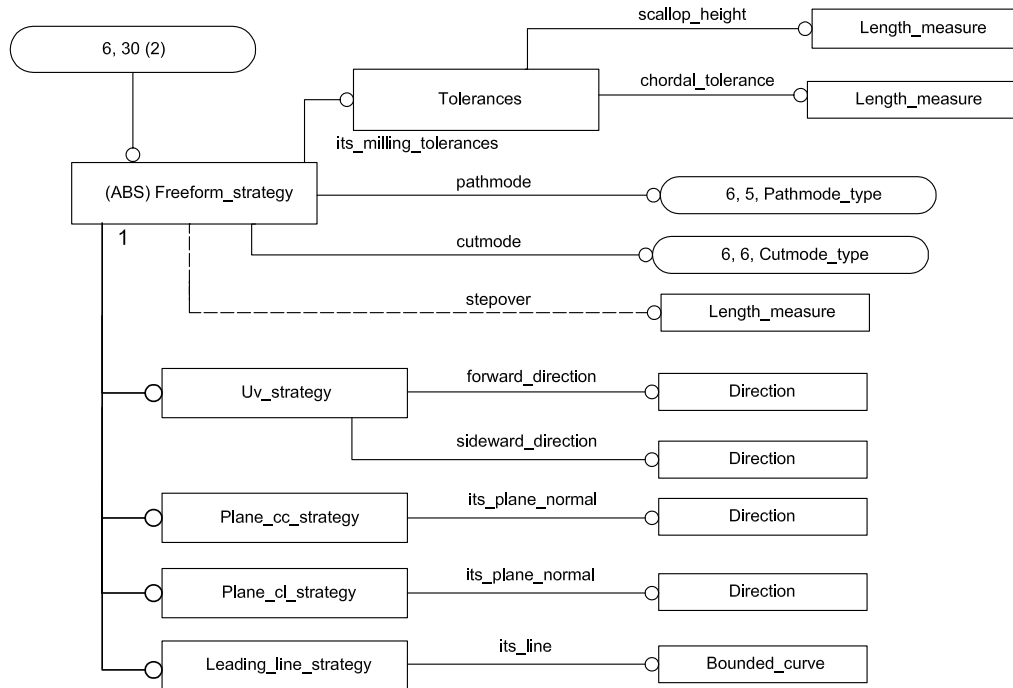


Figure 99 – Diagramme EXPRESS-G relatif aux stratégies "Freeform" [ISO14649-11, 2004]

d'usinage, la distance entre passes et la stratégie.

Pour ce qui est de la gestion des approches et retraits, un traitement spécial doit être effectué puisque ces trajets ne sont pas posés sur la surface à usiner. Il est possible d'extrapoler le carreau B-Spline pour créer des trajets tangents. Dans le cas des trajets 5 axes, si on ne veut absolument pas lisser la géométrie, il faut réutiliser les développements du chapitre 2 pour garantir une bonne connexion entre les trajets d'approche et de retrait et le trajet d'usinage. Par souci de simplification, cette gestion particulière des trajets d'approche et retrait n'est pas mise en œuvre ici. Cependant, la norme STEP-NC prévoit également une classe abstraite "Approach_retract_strategy" pour spécifier les trajets d'approches et de retraits ce qui permettra de résoudre ces problèmes.

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1, l'utilisation de ce type de définition des trajets permet d'éviter les ruptures de la chaîne numérique. La commande numérique reçoit ainsi des informations de haut niveau qui permettent par exemple d'avoir la définition de la surface à usiner au lieu d'avoir uniquement un ensemble de trajets qui balayent la surface. Comparée à la situation actuelle, la quantité d'informations à transférer est plus faible, les informations sont de meilleure qualité, mais des traitements plus lourds doivent être effectués par la commande numérique. C'est l'amélioration des échanges de données dans la chaîne numérique qui permet d'optimiser le processus de fabrication des pièces usinées.

3.2 Calcul exact du trajet

À partir des éléments de définition du trajet d'usinage, il est possible de connaître exactement la position du point piloté CL de l'outil ainsi que son orientation $\mathbf{u}$. De façon générale, l'ensemble des positionnements de l'outil le long du trajet doit respecter deux conditions :

$$\begin{cases} \text{posage exact du point de contact CC sur la surface } S(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \text{ à usiner} \\ \text{respect de la stratégie d'usinage} \end{cases} \quad (5.1)$$

Pour le posage d'un outil en 5 axes, nous utiliserons la notation la plus communément utilisée dans la littérature qui est basée sur les angles d'inclinaison θ_t et pivotement θ_n dans le repère local $(\mathbf{CC}, \mathbf{f}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$. Le vecteur $\mathbf{f}$ est tangent à la surface et orienté suivant la direction d'avance. Le vecteur $\mathbf{n}$ est normal à la surface usinée au point de contact CC. Enfin le vecteur $\mathbf{t}$ est calculé de sorte à obtenir une base orthonormée directe. Comme l'illustre la figure 100, l'angle θ_t représente l'inclinaison de l'outil entre le vecteur directeur de l'axe outil ($\mathbf{u}$) et le vecteur normal à la surface au point de contact CC autour du vecteur $\mathbf{t}$. L'angle θ_n représente le pivotement de l'axe outil autour du vecteur normal $\mathbf{n}$. Ces deux rotations sont définies par leur matrice de rotation dans la base $(\mathbf{f}, \mathbf{n}, \mathbf{t})$ par l'équation 5.2. L'orientation finale de l'axe outil est obtenue par la combinaison des deux rotations qui permettent d'orienter l'outil par rapport au vecteur normal à la surface comme exprimé dans l'équation 5.3.

$$Rot_{\theta_t} = \begin{bmatrix} \cos \theta_t & \sin \theta_t & 0 \\ -\sin \theta_t & \cos \theta_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Rot_{\theta_n} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 & \sin \theta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_n & 0 & \cos \theta_n \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{u} = Rot_{\theta_n} \cdot Rot_{\theta_t} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

À partir de la position du point de contact CC et de l'orientation outil, il est possible de calculer la position du point piloté CL avec la formule donnée dans l'équation 5.4 où D est le diamètre de l'outil et r le petit rayon du tore. Cette expression est également adaptée pour les outils sphériques ($r = D/2$) ou cylindriques ($r = 0$).

$$\mathbf{CL} = \mathbf{CC} + r \mathbf{n} + \left(\frac{D}{2} - r \right) \mathbf{v} - r \mathbf{u} \quad \text{avec} \quad \mathbf{v} = \frac{\mathbf{u} \wedge \mathbf{n}}{\|\mathbf{u} \wedge \mathbf{n}\|} \wedge \mathbf{u} \quad (5.4)$$

Pour une stratégie d'usinage suivant les iso-paramétriques de la surface ou toutes autres stratégies donnant directement le trajet du point CC dans l'espace paramétrique de la surface ("Uv_strategy"), le système 5.1 se résout de façon explicite. Par exemple, pour une passe d'usinage suivant une iso-paramétrique $u = cste$ de la surface $S(u, v)$, le lieu des points CC est

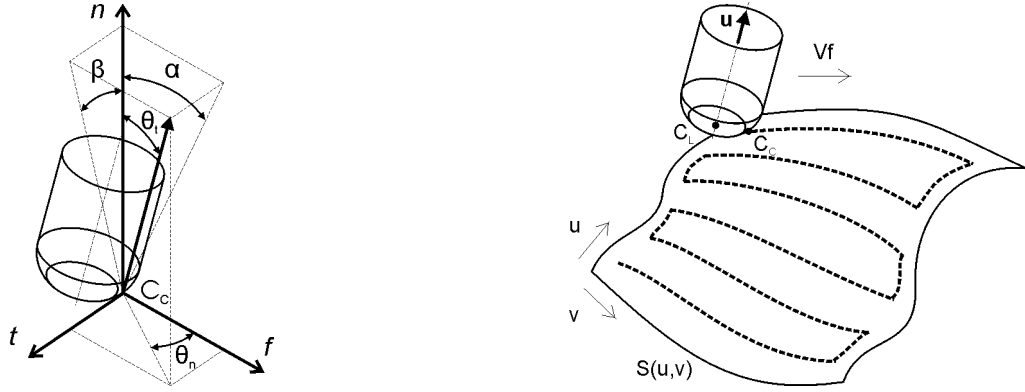


Figure 100 – Posage d'un outil sur une surface complexe en 5 axes [Lavernhe, 2006]

directement donné par $CC(v) = S(u = cste, v)$. Ensuite, l'orientation outil u et la position pilotée CL sont calculées avec les équations 5.3 et 5.4.

Le cas des stratégies par plans parallèles est plus complexe puisque la définition du trajet devient implicite. En effet, pour une stratégie d'usinage où le point CC se déplace suivant des plans parallèles Π ("Plane_cc_strategy") sur une surface complexe de type B-Spline $S(u, v)$, le système 5.1 s'écrit :

$$\begin{cases} CC \in S(u, v) \\ CC \in \Pi \end{cases} \quad (5.5)$$

L'intersection entre la surface et le plan de guidage ne peut pas être obtenue de façon explicite, une résolution numérique doit donc être utilisée. Le principe de résolution présenté dans [Lavernhe, 2006] est schématisé sur la figure 101. À partir d'une position initiale de paramètre (u, v) , on avance le long du trajet en cherchant le point (u^*, v^*) à une certaine distance ε_2 du point précédent et appartenant au plan de guidage. Un algorithme de Newton-Raphson est utilisé pour converger vers la solution avec des tolérances sur la distance au plan et la distance entre points. Les surfaces usinées étant relativement lisses, cet algorithme converge très rapidement même avec des tolérances extrêmement serrées. Finalement, la définition du trajet à partir de l'équation analytique de la surface à usiner permet d'obtenir n'importe quelle position du point de contact CC avec une précision aussi grande que nécessaire. Il en est donc de même pour la position du point piloté CL et l'orientation de l'outil.

Quand la stratégie utilisée consiste à garder le point piloté CL dans un plan ("Plane_cl_strategy"), le calcul du trajet est légèrement plus complexe. Pour cette stratégie, il faut inclure les équations 5.3 et 5.4 dans l'algorithme de résolution numérique permettant de connaître aussi précisément que nécessaire le trajet d'usinage et le système à résoudre devient :

$$\begin{cases} CC \in S(u, v) \\ CL \in \Pi \text{ en respectant les équations 5.3 et 5.4} \end{cases} \quad (5.6)$$

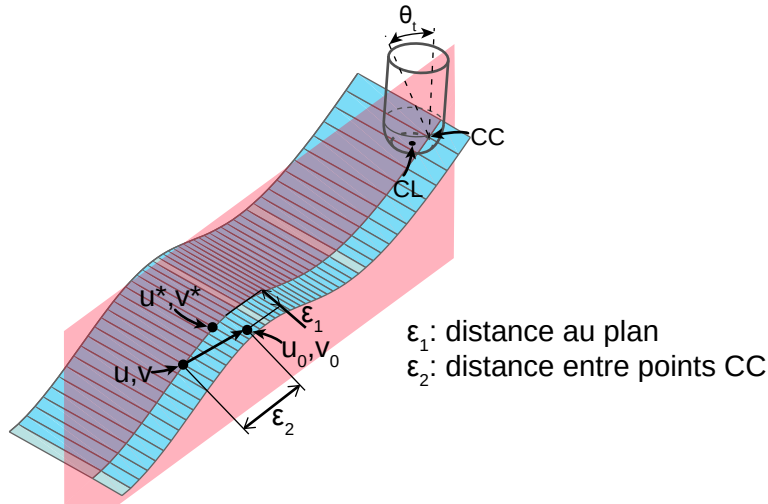


Figure 101 – Principe l’algorithme de posage exact d’un outil sur une surface complexe

Cependant, quelle que soit la stratégie d’usinage choisie, le trajet d’usinage est entièrement calculable même s’il n’y a pas d’expression mathématique explicite pour positionner l’outil.

Dans la méthode DTIS le but est de respecter exactement la surface à usiner donc le trajet n’est absolument pas lissé. Ainsi, il faut que la surface à usiner soit elle même suffisamment lisse pour permettre une interpolation à jerk limité sans passage à vitesse nulle. Nous avons vu dans le chapitre 2 qu’il est possible de lisser localement la géométrie du trajet pour obtenir ce résultat, mais dans l’idéal le carreau B-Spline à usiner doit être au moins de degré 4. En effet, étant donné que l’offset d’une surface fait perdre un degré de continuité, il faut une surface de degré 4 pour avoir un trajet au point CL continu de degré 3.

La définition exacte du trajet d’usinage permet de supprimer les écarts géométriques Δ_{FAO} et leurs conséquences néfastes sur la pièce usinée. Ainsi les effets peau d’orange et les facettes sont supprimés.

3.3 Interpolation temporelle

Le paragraphe précédent explique comment calculer la géométrie de la trajectoire, il faut ensuite effectuer l’interpolation temporelle pour calculer la vitesse d’avance à suivre le long de cette géométrie. Le but de l’interpolation temporelle est de calculer des consignes discrétisées à envoyer aux axes machines. Les consignes étant échantillonnées, on introduit forcément une erreur de flèche, mais à une échelle beaucoup plus faible que l’erreur de flèche introduite en FAO. À cette échelle, l’approximation linéaire entre deux échantillons n’a plus vraiment de sens puisque le système physique réalisera naturellement une sorte de lissage des consignes envoyées. On obtient donc au final la meilleure géométrie atteignable avec le temps de cycle Δt de l’interpolation temporelle.

Dans une vision idéale, les algorithmes d'interpolation temporelle et de calcul exact de la géométrie du trajet d'usinage devraient être intimement liés. En effet, l'interpolation temporelle nécessite la connaissance de la géométrie et des dérivées géométriques en certains points. Ces valeurs peuvent être calculées de façon exacte et le cheminement sur la surface peut n'être calculé qu'aux points utilisés lors de l'interpolation temporelle.

Cependant, l'algorithme VPOp présenté dans le chapitre 3 nécessite le calcul d'un très grand nombre de points de posage, et ce de façon désordonnée. D'un point de vue pratique, il est donc plus adéquat de calculer par avance les points CL exactement posés sur le trajet. Ces points sont calculés de sorte que l'écart de flèche entre deux points soit d'un ordre de grandeur inférieur à l'écart de flèche minimal généré par l'échantillonnage temporel des consignes. Il est ainsi possible de faire une interpolation linéaire entre les points CL calculés sans introduire d'erreur significative. Cette approche, plus adaptée pour l'implémentation que la vision idéale, est utilisée par la suite pour calculer la trajectoire. Pour permettre une implémentation temps réel, une fenêtre glissante pourrait être utilisée pour calculer les points du trajet un peu en avance par rapport à l'interpolation temporelle et ainsi limiter la quantité de données à stocker.

La norme STEP-NC [ISO14649-10, 2004] offre la possibilité de donner la vitesse d'avance à suivre le long du trajet. En effet, l'entité "toolpath" a un attribut optionnel "its_speed" qui permet de spécifier une courbe paramétrée suivant l'abscisse curviligne définissant la vitesse d'avance. Ainsi, l'approche "off-line" utilisée dans cette thèse pourra être utilisée dans les commandes numériques compatibles avec STEP-NC.

Finalement, l'algorithme VPOp est utilisé pour calculer le profil de vitesse à suivre le long du trajet exactement posé sur la surface. Étant donné que la géométrie exacte est plus lisse que n'importe quelle géométrie réinterpolée par un logiciel de FAO (y compris avec le format B-Spline), la vitesse d'avance atteignable le long du trajet exact devrait être plus élevée que celle atteignable sur une géométrie issue de la FAO classique. En effet, pour respecter la tolérance d'usinage, les logiciels de FAO rajoutent des points de contrôle là où le trajet B-Spline s'éloigne trop du trajet idéal ce qui peut entraîner des oscillations. L'application suivante montre qu'effectivement la limite supérieure du profil de vitesse définie dans la partie 2.3 du chapitre 2 est plus élevée avec la solution exacte.

La méthode DTIS d'interpolation de la trajectoire directement sur la surface permet des gains aux niveaux macro-géométrie (erreur de corde) et micro-géométrie (marques d'usinage) ainsi qu'au niveau de la productivité. L'application suivante montre l'ampleur des gains potentiels.

N°	Nom	FAO	Post-pro	CN
①	G1 10 μ m	Catia -> APT G1	Matlab	Siemens 840D
②	G1 1 μ m	Catia -> APT G1	Matlab	Siemens 840D
③	B-Spline 10 μ m	Catia -> APT Nurbs	Matlab	Siemens 840D
④	B-Spline 1 μ m	Catia -> APT Nurbs	Matlab	Siemens 840D
⑤	DTIS	Interpolation surfacique + VPOp + PREMIUM-OpenCNC		

Tableau 2 – Présentation des 5 stratégies d’usinage

4 Application

Pour illustrer la méthode DTIS présentée dans ce chapitre, une surface B-Spline de degré 5 suivant la direction Y et de degré 1 suivant la direction X est usinée, figure 102. L’utilisation de cette surface réglée a de nombreux avantages. D’une part, l’usinage en aller simple suivant des plans parallèles permet d’effectuer N fois la même passe d’usinage. Ceci va permettre de comparer différentes stratégies d’usinage. D’autre part, l’utilisation d’un outil torique incliné d’un angle de 10° par rapport à la normale à la surface génère une trajectoire 5 axes puisque sur une passe les axes Y, Z et A se déplacent simultanément. Ce mouvement 5 axes est plan ce qui permet d’analyser clairement les résultats obtenus en terme d’écart de contour. Cette surface offre des conditions favorables pour analyser les résultats, cependant la méthode DTIS est applicable à n’importe quelle surface B-Spline (ou autre) usinée en 3 ou 5 axes.

Les cinq bandes de cette surface sont usinées avec cinq stratégies différentes présentées dans le tableau 2. Les quatre premières bandes sont usinées dans des conditions industrielles classiques. Le logiciel de FAO Catia v5 est utilisé pour générer les programmes APT d’usinage. Les paramètres modifiés sont le format de sortie (G1 ou B-Spline) et la tolérance d’usinage FAO (10 μ m ou 1 μ m). Ensuite, un postprocesseur développé avec Matlab permet de transformer le code *.aptsources en code CN interprétable par la commande numérique Siemens 840D. Finalement, la machine est utilisée dans les meilleures conditions possible avec un asservissement utilisant l’anticipation en accélération. Les surfaces ① et ② sont usinées avec un processus classique G1 ; les surfaces ③ et ④ sont usinées avec des B-Splines nativement créées par le logiciel de FAO, c’est le processus le plus performant disponible industriellement. Finalement, la dernière bande de la surface est usinée avec la méthode DTIS (Direct Trajectory Interpolation on the Surface). Les activités de FAO - Post-pro - CN sont fusionnées pour éviter l’introduction des écarts de contour au niveau de la FAO. L’interpolation temporelle est effectuée avec l’algorithme VPOp (Velocity Profile Optimization) présenté dans le chapitre 3. Le pilotage et l’asservissement de la machine-outil sont réalisés grâce aux travaux présentés dans le chapitre 4.

Quelques millimètres sont enlevés au début et à la fin de la surface lors de la phase d’ébauche, ceci permet de ne pas à avoir à gérer les phases d’approche et de retrait par une extrapolation de la surface.

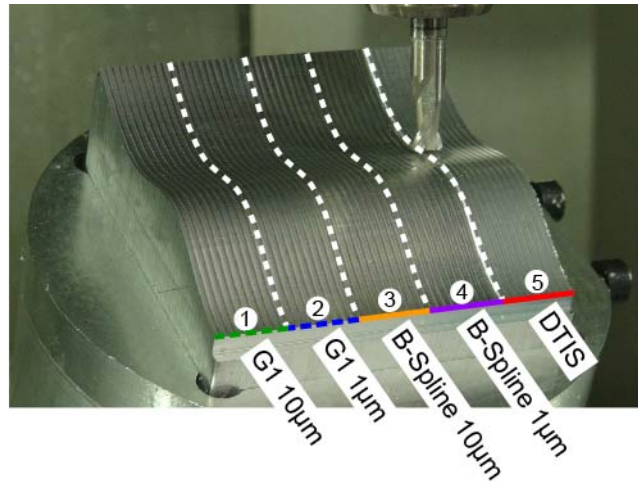


Figure 102 – Photo de la surface usinée avec les 5 stratégies différentes

Les 5 stratégies sont comparées d'un point de vue macro-géométrique pour ce qui concerne les écarts de contour, d'un point de vue cinématique pour ce qui concerne les temps d'usinage et d'un point de vue micro-géométrique pour ce qui concerne les marques d'usinage.

4.1 Comparaisons macro-géométriques

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2 présentant les différents écarts géométriques introduits tout au long du processus de fabrication, une tolérance d'usinage est spécifiée en FAO pour créer les trajets d'usinage. Sur la gauche de la figure 103, on vérifie bien que les points des programmes d'usinage G1 sont bien posés sur la géométrie à usiner, mais que l'interpolation linéaire entre deux points entraîne des écarts de contour fonction de la tolérance spécifiée en FAO. Les écarts sont calculés au niveau du point piloté CL de l'outil, il faudrait donc également rajouter à ces écarts les écarts induits par la transformation géométrique 5 axes présentés sur la figure 91. Sans connaissance particulière sur les algorithmes utilisés pour l'interpolation B-Spline dans le logiciel Catia v5, il est difficile de savoir pourquoi l'écart de contour atteint $12\ \mu m$ sur le trajet B-Spline $10\ \mu m$.

L'étape de traduction effectuée par le postprocesseur permet de passer du format *.aptsource au code CN. Elle n'introduit aucun écart, il s'agit simplement d'une traduction des instructions.

Les écarts entre le trajet FAO et le trajet idéal peuvent être calculés en tout point du trajet et sont donc représentés par des courbes continues. En revanche, les écarts entre les consignes CN et le trajet FAO sont calculés uniquement aux points échantillonnés calculés par la CN, c'est pour cela que les écarts sont représentés uniquement par des marqueurs sur le graphique de droite de la figure 103.

En exécutant les trajets avec une vitesse programmée de 3 m/min, on peut voir que des écarts géométriques sont introduits par l'algorithme d'interpolation temporelle utilisé dans la

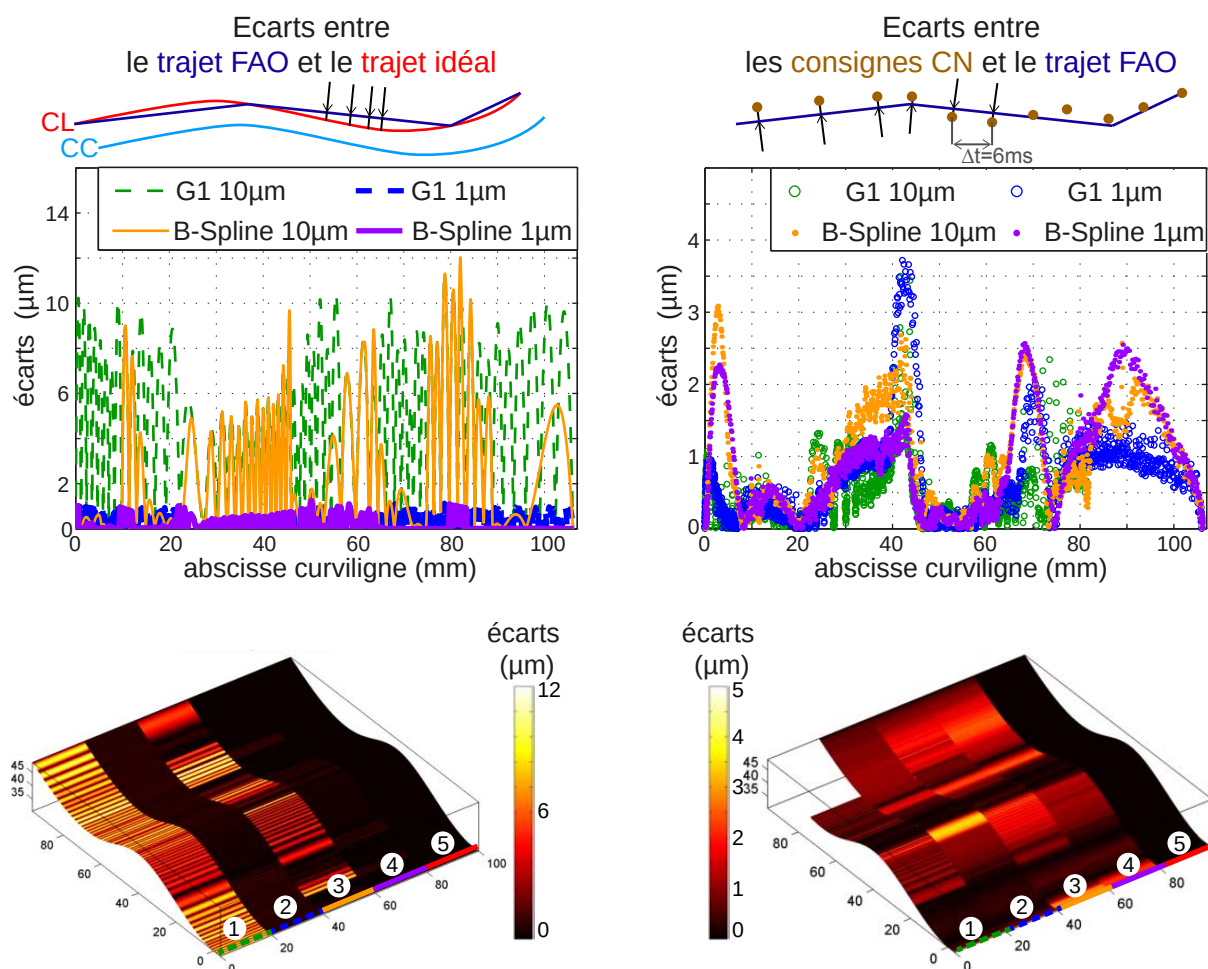


Figure 103 – Écarts de contour introduits par la FAO et par la CN

commande numérique Siemens 840D. En effet, le graphique de droite de la figure 103 montre que pour toutes les trajectoires plusieurs μm d'écart de contour apparaissent entre les consignes mesurées avant l'asservissement (sans compensation géométrique ni thermique) et le trajet FAO décrit dans le programme CN associé. Là encore, il est difficile de dire exactement d'où viennent ces écarts de contour puisque l'algorithme utilisé est une boîte noire. Cependant, la documentation Siemens indique que la limitation du jerk est effectuée en appliquant un filtre axe par axe ce qui introduit des écarts de contour. On remarque que pour le programme B-Spline 1 μm , l'écart de contour introduit par la commande numérique est plus important que celui introduit par la FAO. Sur la fin de la trajectoire G1 10 μm , les données sont manquantes, car la trajectoire est trop longue pour être mesurée précisément par les traces de servo de la commande numérique Siemens 840D.

Dans la méthode DTIS proposée, l'écart de contour correspondant à la FAO est nul. L'écart entre les consignes CN et le trajet idéal FAO est de 0.02 μm au maximum. En effet, avec la méthode proposée les consignes sont échantillonnées sur une discrétisation très fine du trajet. Cet écart n'est pas nul, mais la solution pratique qui permet de réaliser l'interpolation temporelle

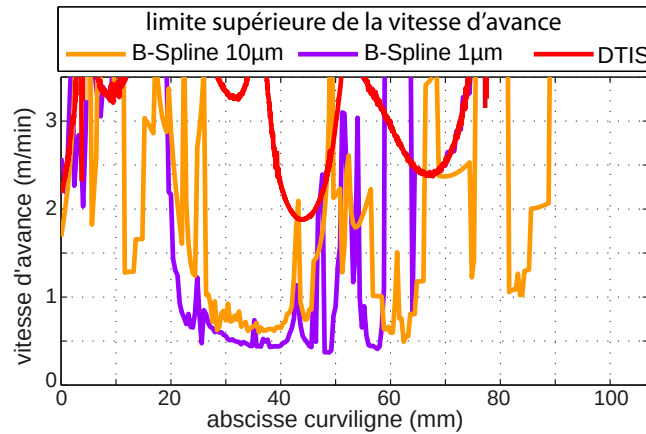


Figure 104 – Limites supérieures de la vitesse d'avance pour les deux stratégies B-Spline et la méthode DTIS

(vue en 3.3) permet de garantir que cet écart est largement inférieur à l'écart qui sera introduit par l'asservissement par exemple ; il peut donc être négligé. Pour information, l'erreur de flèche introduite par l'échantillonnage à 6 ms des consignes CN est de l'ordre de $0.3 \mu m$ au maximum. Cependant, à ce niveau, l'interpolation linéaire entre deux échantillons n'a plus vraiment de sens. Pour évaluer proprement cet écart, il serait plus adapté d'utiliser un modèle du comportement machine et de l'asservissement comme présenté dans le chapitre 4. Les écarts angulaires ne sont pas spécialement étudiés ici, mais la méthode DTIS proposée permet également de les réduire au minimum tout au long du trajet.

La méthode DTIS a donc le premier avantage de respecter précisément la géométrie à usiner.

4.2 Comparaisons cinématiques

Pour les 5 stratégies, la vitesse d'avance programmée est de 3 m/min, mais cette vitesse n'est pas atteinte par les quatre stratégies standards. Le tableau 3 récapitule les temps d'usinage mesurés pour les 5 stratégies. Quelle que soit la tolérance FAO, les stratégies B-Spline sont plus performantes que les stratégies G1. Par contre contrairement à l'idée reçue, l'augmentation de la tolérance FAO en G1 n'implique pas la réduction du temps d'usinage. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, il n'est pas si évident de connaître l'effet de la discrétisation sur le temps d'usinage. Ce qui est très intéressant, c'est de voir que le temps d'usinage obtenu par la méthode DTIS est entre 2.6 et 4.6 fois inférieur à celui obtenu par des stratégies industrielles. D'après les exemples du chapitre 3, l'algorithme d'interpolation VPOp n'est pas spécialement plus performant que l'algorithme d'interpolation temporelle de la commande numérique Siemens puisque les deux algorithmes permettent de trouver une solution d'interpolation proche de la solution optimale. Toute la différence vient de la géométrie du trajet. En effet, aucun trajet généré par les logiciels de FAO (par interpolation ou approximation) n'est plus lisse que le trajet exact. La figure 104 montre bien que la limite supérieure du profil de vitesse, calculée d'après l'équation 2.11 du chapitre 2, est relativement basse pour les deux trajets B-Spline. Les limites

N°	Format	Tolérance FAO (μm)	Temps d'usinage (s)	Nombre de lignes de programme CN
①	G1	10	14.4	59
②	G1	1	12.2	189
③	B-Spline	10	8	85
④	B-Spline	1	9	226
⑤	DTIS	-	3	-

Tableau 3 – Récapitulatif des temps d'usinage et du nombre de lignes de programme pour une passe

supérieures ne sont pas calculées pour les trajets G1, car pour cela il faudrait précisément savoir comment les discontinuités sont arrondies. Les fonctions de compactage de la commande numérique ne sont pas activées pour ces trajets G1. La fonction Compcad de Siemens réduirait probablement le temps d'usinage en ajoutant des écarts de contour, mais le résultat final ne serait probablement pas meilleur que celui obtenu par les stratégies B-Splines.

Sur la figure 105, la vitesse d'avance en couleur est superposée au trajet pour les 5 trajectoires. En regardant la stratégie G1 10 μm , on remarque bien des oscillations de la vitesse. On voit que la vitesse augmente sur les segments et qu'elle est réduite au niveau de chaque transition entre blocs du code G. On peut clairement voir les oscillations de la vitesse d'avance sur les graphiques de la figure 106. Avec la stratégie G1 1 μm , les positions outils sont plus resserrées et le trajet est d'une certaine façon plus lisse ce qui évite d'avoir ces oscillations de la vitesse d'avance. Pour les stratégies B-Spline, les trajets sont relativement lisses et il est difficile d'analyser les réductions de vitesse en fonction de la position des points de contrôle [Lavernhe et al., 2004]. Finalement, pour la méthode DTIS d'interpolation de la trajectoire directement sur la surface, on remarque que la vitesse d'avance est bien plus élevée. D'autre part, la vitesse d'avance est plus fluide, il n'y a pas de chute de vitesse brusque comme on pouvait le voir sur la trajectoire G1 10 μm . En supprimant ces variations brusques de vitesse, la qualité de surface micro-géométrique est améliorée comme on va le voir par la suite.

4.3 Comparaisons micro-géométriques

L'implémentation physique de la commande numérique ouverte prend tout son sens pour l'analyse des marques d'usinage liées à la micro-géométrie de la surface. En effet, en ayant la possibilité d'effectuer des usinages avec la commande numérique industrielle Siemens 840D et avec la commande numérique PREMIUM-OpenCNC sur la même machine, il est possible de démontrer les gains obtenus grâce à ces travaux de thèse. La synchronisation parfaite des passes permet de mieux mettre en évidence les marques. Cependant, il est difficile de montrer les marques d'usinage sur une photo, car ce sont les jeux de lumière qui les font particulièrement ressortir. La figure 107 tente de mettre en évidence les marques d'usinages créées par les

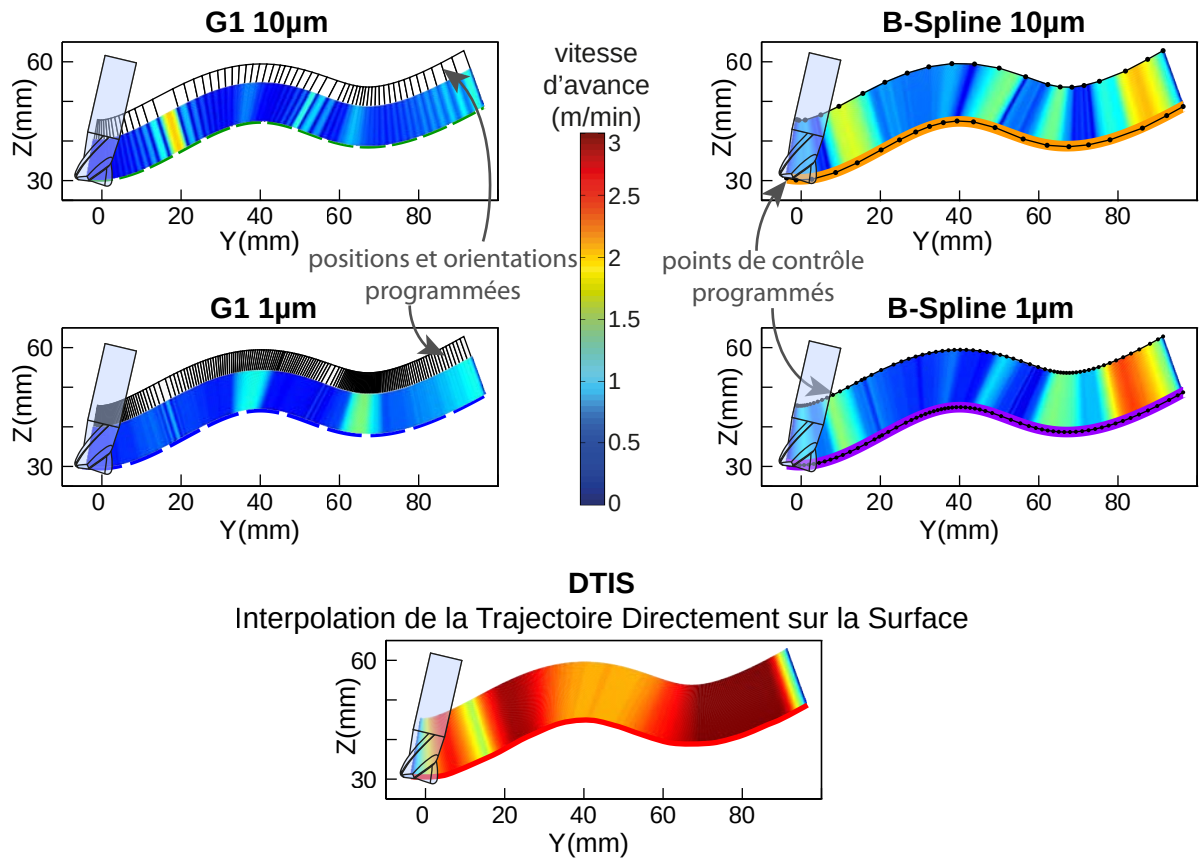


Figure 105 – Vitesses d'avance superposées au trajet pour les 5 trajectoires

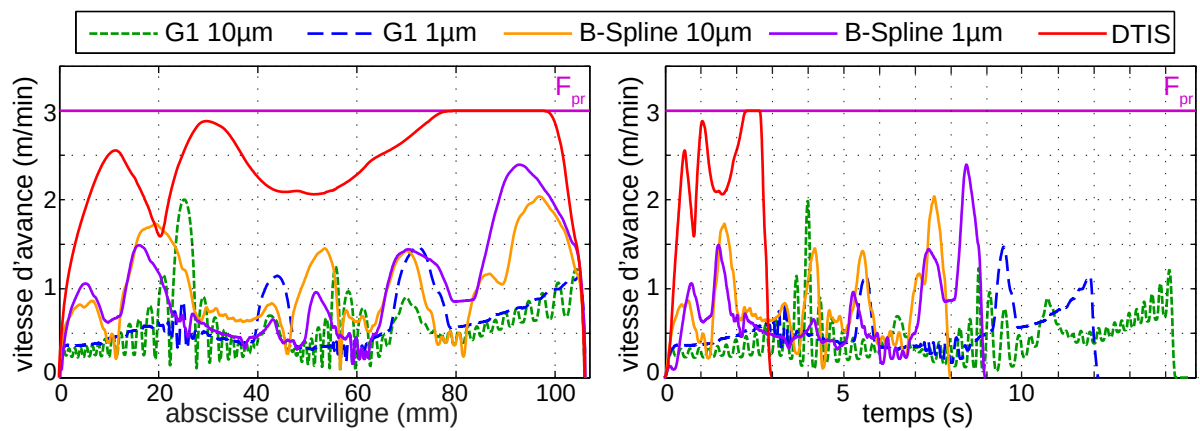


Figure 106 – Vitesses d'avance en fonction de l'abscisse curviligne et en fonction du temps

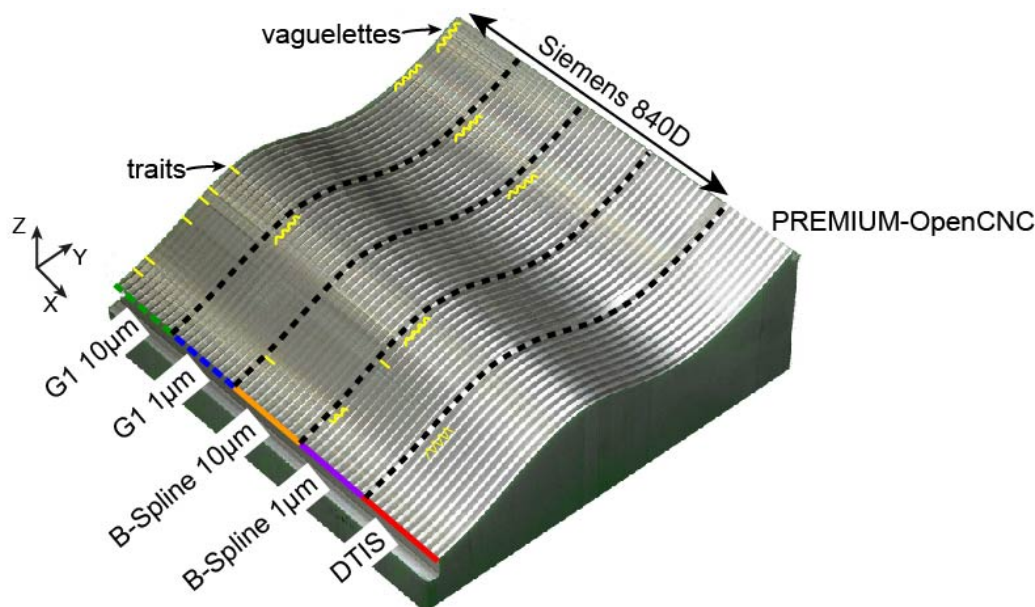


Figure 107 – Mise en évidence des défauts visuels

stratégies classiques. Un symbole de vaguelette est utilisé pour désigner les zones où l’aspect de la pièce est dégradé. Sur le trajet G1 $10\ \mu\text{m}$, les grandes variations de vitesse causent des marques très prononcées localisées par les petits traits noirs. Ces marques sur la surface usinée sont principalement dues aux variations de la vitesse d’avance. Sur les autres surfaces usinées avec la commande numérique Siemens 840D, on retrouve également des traits ou des vaguelettes liées aux variations de la vitesse d’avance même si les oscillations de la vitesse d’avance sont réduites. La méthode DTIS proposée dans ce chapitre permet d’améliorer l’aspect de la surface usinée, car comme la géométrie du trajet est plus lisse, la vitesse d’avance est également plus fluide. Finalement, la surface DTIS est de bien meilleure qualité visuelle que les autres surfaces.

Plusieurs études ont été effectuées pour analyser les marques d’usinage présentes sur les surfaces usinées. Tous les phénomènes se mélangent à la connexion entre les segments G1, en effet c’est à ces endroits que la géométrie est discontinue et que l’on peut voir apparaître des arêtes sur la pièce. C’est aussi là que la vitesse d’avance est réduite ce qui cause de fortes variations de l’avance par dent f_z et donc de la hauteur de crête longitudinale. À priori, les marques d’usinage sont principalement dues à ces fortes variations de hauteur de crête longitudinale, ce point est donc étudié plus en détail.

Grâce aux travaux précédents du laboratoire sur la simulation Z-buffer [Lavernhe *et al.*, 2010], un algorithme performant permet de simuler l’usinage de la surface en considérant chaque passage de dent de l’outil. La surface est finement maillée par une grille de brins espacés de $1\ \mu\text{m}$ dans la direction Y et de $10\ \mu\text{m}$ dans la direction X ce qui permet d’obtenir une très bonne représentation de la surface usinée avec les crêtes transversales et les crêtes

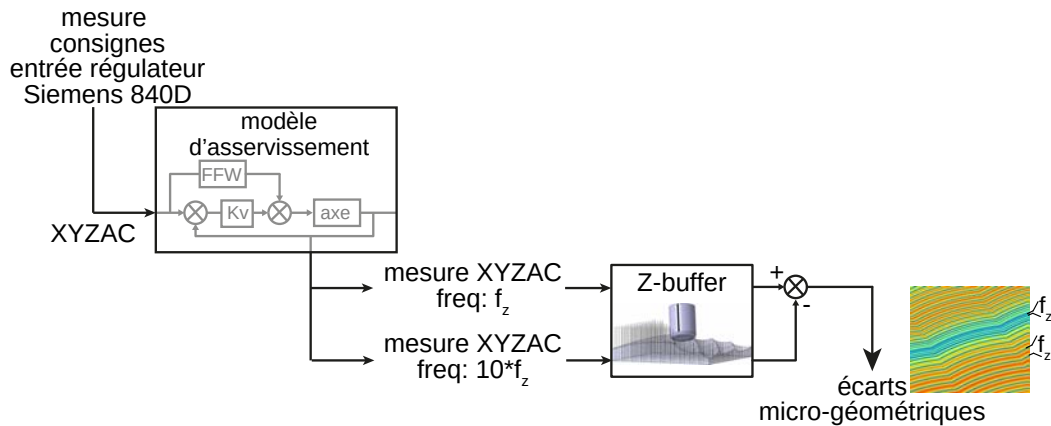


Figure 108 – Principe utilisé pour calculer les écarts micro-géométriques

longitudinales laissées par l’outil torique.

Une première solution pour visualiser les marques d’usinage est d’utiliser le logiciel CATIA. En effet, il est possible de faire ressortir les défauts de la surface maillée grâce à des jeux de lumière et aux options de rendu des surfaces.

Une deuxième solution consiste à isoler les écarts micro-géométriques en calculant la hauteur de crête longitudinale. Nous avons vu que de nombreux écarts sont présents entre la géométrie nominale et la géométrie usinée, mais l’œil ne voit que les différences d’aspect liées à la micro-géométrie qui sont indépendantes des écarts macro-géométriques. Pour supprimer les autres écarts, le Z-buffer est utilisé 2 fois comme on peut le voir sur la figure 108. Dans un premier temps, les consignes de position des axes machines sont mesurées au temps de cycle d’interpolation. Cependant, il faut réinterpoler ces positions pour obtenir la position de l’outil à chaque passage de dent. Pour cela, le plus réaliste est de réutiliser le modèle d’asservissement vu dans le chapitre 4 qui représente relativement bien le mouvement physique des axes. Grâce à ce modèle d’asservissement, il est possible d’obtenir la position des axes avec une fréquence d’échantillonnage égale à la fréquence de passage de dent f_z . Ces positionnements outils sont utilisés dans l’algorithme du Z-buffer pour générer la surface usinée. Finalement, pour supprimer l’ensemble des autres écarts géométriques, une deuxième simulation est effectuée avec une fréquence de passage de dent dix fois plus grande ce qui permet d’obtenir par différence l’écart micro-géométrique dû au passage de dent. Cet écart micro-géométrique est réappliqué sur la surface grâce à l’échelle de couleur ce qui permet de faire ressortir les marques d’usinage.

Pour conforter cette étude, une pièce est usinée avec la stratégie G1 $10\ \mu m$ mais en utilisant deux vitesses d’avance programmées, figure 109. La première bande est usinée avec une vitesse d’avance programmée $F=100\text{ mm/min}$ qui est suffisamment basse pour que la vitesse d’avance soit constante tout au long de la trajectoire. La deuxième bande est usinée avec une vitesse programmée $F=3000\text{ mm/min}$ qui n’est en réalité jamais atteinte, mais cette trajectoire

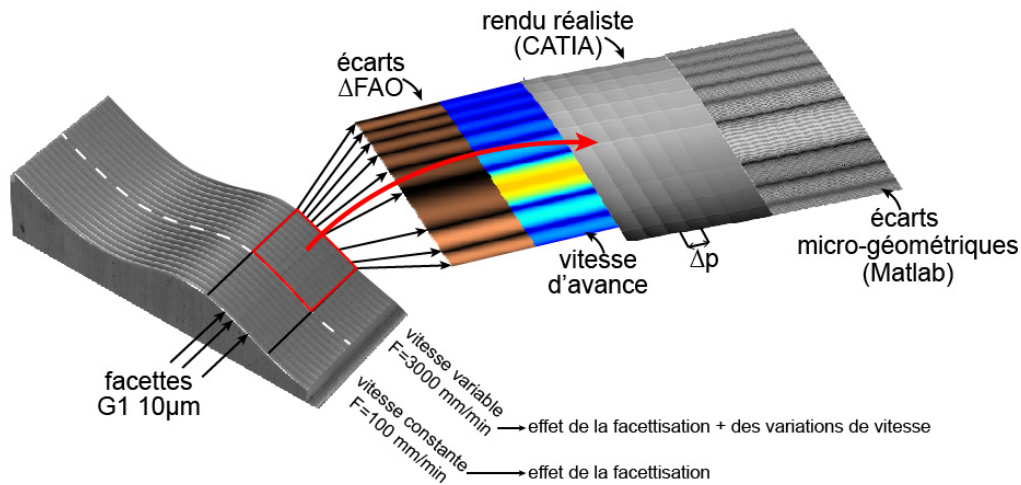


Figure 109 – Simulation des marques d’usinage pour le trajet G1 10 μm

présente de fortes variations de la vitesse d’avance réelle. La première bande permet de voir l’effet des facettes, la deuxième bande permet de juxtaposer l’effet des variations de vitesse. L’étude se focalise sur la portion de la surface usinée où les effets sont clairement visibles. La figure 109 permet de voir qu’effectivement les variations de vitesse coïncident avec les segments du trajet FAO. Les options de rendu réaliste de CATIA permettent de faire apparaître les marques d’usinage tout comme l’affichage des écarts micro-géométriques calculés sur le principe de la figure 108. Ces résultats montrent que les marques d’usinage vues sur la pièce usinée sont principalement causées par les variations de vitesse.

Grâce à l’amélioration de la fluidité géométrique du trajet, la méthode DTIS fournit un meilleur état de surface puisqu’elle permet d’éviter la génération de brusques variations de la vitesse d’avance. Les écarts micro-géométriques sont plus constants donc l’aspect visuel de la surface est meilleur.

Finalement, les surfaces usinées sont le reflet de l’ensemble du processus de fabrication et comportent donc un cumul de défauts. Des mesures complémentaires fournies dans l’annexe A permettent de mettre en évidence l’impact des écarts d’asservissement et des variations de la vitesse d’avance réelle sur la géométrie usinée.

5 Conclusions

Ce dernier chapitre de la thèse montre comment la maîtrise complète de la chaîne numérique peut permettre d’améliorer le processus de fabrication des pièces usinées. Il est courant d’utiliser l’interpolation linéaire G1 pour approximer avec une certaine tolérance d’usinage FAO un trajet d’usinage complexe, mais cette pratique comporte de nombreux inconvénients. En effet, ce

format de description des trajets d'usinage n'est pas adapté pour usiner des surfaces de formes complexes, car le trajet d'usinage obtenu est discontinu en tangence. Pour pallier à ce problème, le format B-Spline a été introduit. Il est ainsi possible de définir le trajet de manière continue, mais la génération des trajets d'usinage B-Spline en FAO n'est pas exempte d'écart de contour. Pour permettre de supprimer les écarts de contour liés à la tolérance d'usinage FAO, plusieurs articles de la littérature proposent de définir le trajet d'usinage de façon exacte à partir de la surface à usiner.

Après avoir étudié les différents écarts géométriques introduits tout au long de la chaîne numérique, la méthode d'interpolation des trajectoires directement sur la surface à usiner est présentée. Cette méthode appelée DTIS pour "Direct Trajectory Interpolation on the Surface" permet grâce à la définition exacte du trajet outil d'améliorer le processus de fabrication des pièces usinées. L'usinage 5 axes d'une surface complexe permet de valider l'ensemble des travaux réalisés dans la thèse et d'attester des gains apportés par la méthode DTIS.

Par rapport aux articles publiés jusque là dans la littérature à propos de l'interpolation surfacique, les travaux développés dans ce chapitre apportent plusieurs contributions. D'une part, les consignes à envoyer aux axes de la machine sont exactement posées sur la surface à usiner et respectent également les contraintes cinématiques des axes. Jusqu'à présent, aucune publication n'avait combiné ces deux aspects. D'autre part, la prise en considération des problèmes liés à la vitesse d'avance permet de montrer que l'utilisation d'une définition exacte de la géométrie du trajet d'usinage permet de nombreux gains. En effet, il est possible d'annuler les écarts géométriques introduits par la génération des trajets en FAO, de réduire fortement le temps d'usinage et d'améliorer la qualité visuelle de la pièce usinée. Toutes ces améliorations se font au prix d'une remise en cause de la façon de décrire les trajets d'usinage. Ce changement devrait être tout à fait accessible industriellement quand le nouveau standard de programmation STEP-NC sera intégré aux commandes numériques.

Pour conclure, des gains importants aussi bien pour la productivité que pour la qualité des pièces usinées sont possibles grâce à l'amélioration des échanges de données dans la chaîne numérique et la nouvelle méthode DTIS de génération des trajectoires d'usinage en atteste. Pour rendre ces marges de progrès accessibles industriellement, il faut permettre une nouvelle définition des trajets d'usinage dans les commandes numériques. Cela sera rendu possible par le développement de commandes numériques compatibles avec le standard STEP-NC.

5. Conclusions

Conclusions générales et perspectives

Le processus de fabrication des pièces usinées est un processus complexe constitué d'activités numériques et physiques. La commande numérique est au cœur de ce processus ; elle fait le lien entre la chaîne numérique allant de la définition de la pièce à fabriquer jusqu'à la création des trajectoires d'usinage et le processus physique de réalisation aboutissant à l'usinage. L'objectif final de cette thèse est d'améliorer le processus global de production des pièces usinées grâce aux nouvelles possibilités offertes par une commande numérique ouverte. Dans ce contexte, ces travaux se focalisent en particulier sur l'usinage des surfaces complexes et montrent les gains accessibles via l'amélioration des données d'entrée de la commande numérique.

Le premier chapitre de la thèse présente les problèmes principaux posés par l'utilisation des commandes numériques industrielles et met donc en évidence l'intérêt de disposer d'une commande numérique ouverte. Les inconvénients principaux des commandes numériques industrielles sont : la méconnaissance des algorithmes utilisés ce qui ne permet pas de prévoir leur comportement, la limitation au niveau des échanges de données et la difficulté d'effectuer des actions en temps réel lors de l'usinage. Ces trois limitations empêchent l'optimisation globale du processus de fabrication des pièces usinées. Pour lever ces barrières, cette thèse a pour but de maîtriser l'ensemble de la chaîne numérique grâce au développement d'une commande numérique ouverte.

Les chapitres 2 et 3 détaillent les algorithmes internes de la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC. En effet, la fonction principale de la commande numérique étudiée dans cette thèse consiste à calculer la trajectoire (évolution géométrique et temporelle) à partir du programme d'usinage et des limitations physiques de la machine. Cette tâche complexe est abordée de façon découplée : l'aspect géométrique est traité dans un premier temps, puis l'interpolation temporelle est effectuée.

Le chapitre 2 traite de l'aspect géométrique et permet de créer une géométrie suffisamment continue pour éviter les passages à vitesse nulle lors de la phase d'interpolation temporelle. En effet, même si les formats polynomiaux sont mieux adaptés pour l'usinage des surfaces de formes complexes, la majeure partie des programmes d'usinage utilise l'interpolation linéaire (G1) pour définir le trajet d'usinage. Ce format G1 introduit des discontinuités en tangence à la transition entre chaque segment qui doivent être lissées en respectant les tolérances géométriques spécifiées dans la commande numérique. Ce problème d'arrondissement local des

discontinuités est bien connu et a fait l'objet de nombreux travaux pour les trajets 3 axes. Ce chapitre propose un modèle d'arrondissement des discontinuités géométriques étendu aux trajets 5 axes. Les équations fondamentales faisant le lien entre la géométrie et la loi de mouvement (évolution temporelle) permettent de définir un indicateur de fluidité de l'orientation dans l'espace pièce. Cet indicateur est utilisé pour résoudre la difficulté principale qui consiste à obtenir une évolution continue de l'orientation outil. Finalement, suite à ce chapitre, la géométrie de la trajectoire d'usinage est figée.

Le chapitre 3 fait le lien entre la géométrie précédemment définie et l'aspect temporel. En effet, l'interpolation temporelle a pour but de générer les consignes échantillonnées envoyées aux axes de la machine-outil. Cette évolution temporelle le long de la géométrie doit être calculée de sorte à respecter les contraintes cinématiques des axes machine et notamment le jerk. En effet, nous avons vu que ce paramètre a une influence importante pour les applications d'usinage grande vitesse. Le chapitre 3 présente donc la résolution du problème d'interpolation temporelle en 5 axes en respectant les contraintes de jerk de chaque axe. Ce travail aboutit à la réalisation du logiciel VPOp (Velocity Profile Optimization) qui permet de librement tester l'algorithme itératif basé sur l'intersection des contraintes. Les chapitres 2 et 3 répondent à la première problématique qui est de passer d'une géométrie et d'une vitesse d'avance programmée aux consignes à envoyer aux axes machine.

Le chapitre 4 traite de la réalisation physique de la commande numérique. Le choix d'adopter une situation de commande hybride entre la commande numérique Siemens 840D et la commande numérique PREMIUM-OpenCNC a été fait pour concentrer les efforts sur la maîtrise de la trajectoire. Ainsi, les axes de déplacement sont déconnectés de la commande Siemens 840D et pilotés directement par le matériel temps réel dSPACE. La phase de mise en œuvre physique implique de se poser des questions sur le contrôle temps réel des axes surtout lorsqu'il s'agit de piloter un moyen de production industriel. Une structure avec anticipation a donc été implémentée, cet asservissement permet de piloter la machine-outil dans des conditions d'usinage grande vitesse. Les travaux présentés dans ce chapitre font le lien entre le monde numérique et l'implémentation physique.

Grâce au développement du logiciel VPOp et à l'implémentation technique réalisée, le projet PREMIUM-OpenCNC a permis la création d'une commande numérique ouverte sur la machine-outil d'usinage grande vitesse 5 axes du LURPA. Ce moyen de production performant offre de nombreuses opportunités pour les travaux de recherche futurs.

Pour faire le bilan sur la commande numérique PREMIUM-OpenCNC, on peut dire que son développement est suffisant pour réaliser les expérimentations nécessaires à ces travaux de recherche. Mais, dans l'état, cette commande numérique ne peut pas être utilisée pour usiner une pièce quelconque pour les raisons suivantes :

- l'utilisation de la commande PREMIUM-OpenCNC n'est pas aisée,
- les travaux sur l'interprétation sont trop succincts pour utiliser un programme CN classique,
- les algorithmes de traitement de la géométrie ne sont développés que pour le format G1,
- l'implémentation de l'algorithme d'interpolation temporelle ne permet d'interpoler que des trajets courts (≤ 1000 mm),
- il n'est pas possible d'effectuer de changement automatique d'outil...

Tous ces points sont évidemment à améliorer, mais cela demande un travail d'ingénierie encore plus important qui n'est utile que si l'état actuel ne permet pas d'atteindre l'objectif scientifique recherché.

Un regard critique peut être également porté sur le travail d'arrondissement des discontinuités en 5 axes. Le format G1 est très courant, il est donc nécessaire d'avoir une solution de lissage de la géométrie. Le modèle présenté en 3 axes est bien adapté et remplit parfaitement ce rôle. Par contre, avec le recul, la solution adoptée pour l'arrondissement en 5 axes n'est pas pertinente. Dès le départ, le choix d'arrondir la discontinuité dans l'espace pièce avec le modèle basé sur les deux courbes est très contraignant ; et la maîtrise si fine de la géométrie dans l'espace pièce n'est probablement pas nécessaire. Même si dans l'idéal il est souhaitable de contrôler la géométrie dans l'espace pièce, un lissage articulaire serait probablement plus simple à mettre en place pour lisser tous les types de discontinuité.

L'aboutissement de cette thèse a été d'utiliser l'ensemble des travaux scientifiques et techniques sur la commande numérique PREMIUM-OpenCNC pour optimiser l'usinage des surfaces complexes en allant jusqu'à la validation expérimentale.

Dans le dernier chapitre, les nouvelles possibilités offertes par la commande numérique ouverte sont utilisées pour interpoler la trajectoire directement sur la surface à usiner. En effet, les limitations des formats d'entrée des commandes numériques industrielles posent de nombreux problèmes. D'une part, des écarts géométriques sont introduits alors qu'aucun processus physique n'entre en jeu. D'autre part, même si la surface à usiner est très lisse, le trajet d'usinage calculé en FAO peut présenter des discontinuités. L'utilisation de la définition exacte du trajet permet d'avoir un trajet beaucoup plus lisse ce qui a plusieurs avantages. Tout d'abord, les écarts macro-géométriques introduits par la FAO sont supprimés, ensuite la productivité est augmentée et enfin la qualité micro-géométrique est améliorée. Cette application montre bien l'intérêt de faire évoluer les commandes numériques et donne un aperçu des marges de progrès disponibles grâce à l'introduction du nouveau standard de programmation STEP-NC.

Une première perspective importante pour ces travaux serait leur intégration complète dans le standard STEP-NC. En effet, tout au long de la thèse, nous avons vu que les travaux effectués peuvent bénéficier du développement de ce nouveau langage de programmation. De nouvelles avancées scientifiques peuvent être réalisées en poursuivant sur la base actuellement développée, mais l'utilisation du formalisme STEP-NC faciliterait les échanges et la diffusion avec la communauté scientifique.

Il serait également opportun de profiter de ce nouvel environnement pour permettre l'utilisation des algorithmes d'interpolation temporelle en « pseudo temps réel ». En effet, comme nous l'avons vu au chapitre 3, une réorganisation du code doit être effectuée pour optimiser l'algorithme notamment en faisant l'interpolation sur une fenêtre glissante. D'autre part, pour l'implémentation temps réel, des profils de vitesse dégradés doivent être calculés quand l'algorithme peine à interpoler un passage difficile. Au niveau géométrique, il faudrait continuer à développer les algorithmes de lissage des trajets qui semblent incontournables pour l'utilisation pratique d'une commande numérique. Au chapitre 2, une solution spécifique est présentée pour la connexion de deux portions G1, mais il serait intéressant de disposer d'une solution générale pour connecter n'importe quelle géométrie (segment, cercle, spline). Cette solution générale passe probablement par une maîtrise de la géométrie moins bonne que pour l'arrondissement des trajets G1.

D'un point de vue technique, l'implémentation de l'anticipation en accélération serait souhaitable pour diminuer encore les écarts de suivi. Ce travail nécessite l'achat d'une nouvelle carte d'entrée pour les codeurs moteurs et une modification du câblage des variateurs, mais cela ne posera pas de problème à priori. L'utilisation des blocs Simulink permet de construire le modèle de pilotage de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC relativement facilement, mais il serait probablement mieux d'effectuer une implémentation en ligne de code pour faciliter les évolutions.

À la vue des résultats obtenus dans le dernier chapitre de cette thèse, il serait intéressant d'étudier plus en détail la relation entre les marques d'usinage et les caractéristiques cinématiques de la trajectoire. En effet, grâce à la commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC, il est possible de parfaitement maîtriser la cinématique outil/pièce (vitesse, accélération et jerk) pour effectuer des essais de caractérisation des marques d'usinage en fonction des variations cinématiques.

En élargissant un peu l'horizon de la thèse, les machines à commande numérique sont utilisées pour produire des séries de pièces. Cependant, pour la commande numérique, chaque pièce est usinée comme si c'était la première pièce de la série. Il n'y a aucune acquisition automatique d'expérience ni aucune amélioration du processus au fur et à mesure des usinages. On pourrait bénéficier des nouvelles possibilités offertes par la commande numérique ouverte pour acquérir et traiter des données mesurées lors du processus d'usinage afin d'optimiser la production.

La modification automatique du trajet semble très délicate sans vérification et approbation par l'opérateur. Par contre, la modification de la vitesse d'avance est relativement aisée. Actuellement, les programmes d'usinage définissent une vitesse d'avance programmée qui n'est pas respectée dans de nombreux cas. Il serait intéressant de spécifier l'objectif de ce choix de vitesse d'avance plutôt que le moyen d'y parvenir pour permettre l'optimisation de la vitesse d'avance. Par exemple, en finition, la vitesse d'avance est liée à un état de surface voulu ; en ébauche, elle sera plutôt contrainte par les efforts de coupe [Saikumar et Shunmugam, 2012]. Ces éléments pourraient être inclus dans l'algorithme d'intersection des contraintes de VPOp.

Sans développer un modèle d'effort de coupe très coûteux, la commande numérique ouverte peut utiliser les capteurs internes (courants des moteurs de broche et des axes, vitesse de broche...) pour mesurer les efforts et permettre l'optimisation de la vitesse d'avance lors des phases d'ébauche. En effet, même si des modèles d'efforts de coupe et d'optimisation de la vitesse d'avance se développent pour des usinages 5 axes [Layegh *et al.*, 2012], le seul calcul de l'engagement outil/pièce requiert des simulations très coûteuses. Cependant, des pièces doivent être usinées, il est donc possible d'utiliser l'usinage lui même pour mesurer les efforts de coupe et savoir s'il est possible d'augmenter localement la vitesse d'avance pour l'usinage de la prochaine pièce. Si ce type de fonctionnalités était intégré aux commandes numériques, la productivité des machines pourrait être fortement augmentée.

En continuant sur le thème de l'apprentissage, les techniques de contrôle par apprentissage itératif (Iterative Learning Control) sont très développées en robotique, mais peu utilisées pour le contrôle des machines-outils. Le principe consiste à optimiser les tâches répétitives en apprenant des erreurs effectuées sur les réalisations précédentes. On peut, par exemple, modifier la commande d'un système à partir des écarts de poursuite mesurés sur les itérations précédentes. [Bristow *et al.*, 2006] présentent les avantages et inconvénients de ces techniques à travers une revue de la littérature et des résultats expérimentaux. Il est tout à fait possible d'utiliser ce type de contrôle sur des machines d'usinage pour réduire itérativement les écarts de contour mesurés au fur et à mesure des usinages [Prévost, 2011, Tsai *et al.*, 2013]. Cependant, il n'existe que très peu d'articles sur cette thématique dans la littérature scientifique associée aux machines-outils.

Ces nouvelles voies d'optimisation du processus de fabrication liées à l'adaptation de la trajectoire en fonction du processus physique sont maintenant accessibles grâce à la maîtrise de la commande numérique.

Liste des références

[Altintas *et al.*, 2005]

ALTINTAS, Y., BRECHER, C., WECK, M. et WITT, S. (2005). Virtual machine tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(2):115 – 138.

[Altintas et Erkorkmaz, 2003]

ALTINTAS, Y. et ERKORKMAZ, K. (2003). Feedrate optimization for spline interpolation in high speed machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1):297 – 302.

[Altintas et Erol, 1998]

ALTINTAS, Y. et EROL, N. (1998). Open architecture modular tool kit for motion and machining process control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(1):295 – 300.

[Altintas et Khoshdarregi, 2012]

ALTINTAS, Y. et KHOSH DARREGI, M. (2012). Contour error control of CNC machine tools with vibration avoidance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):335 – 338.

[Altintas et Munasinghe, 1994]

ALTINTAS, Y. et MUNASINGHE, W. (1994). A hierarchical open-architecture CNC system for machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43(1):349 – 354.

[Altintas *et al.*, 2011]

ALTINTAS, Y., VERL, A., BRECHER, C., URIARTE, L. et PRITSCHOW, G. (2011). Machine tool feed drives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2):779 – 796.

[Annoni *et al.*, 2012]

ANNONI, M., BARDINE, A., CAMPANELLI, S., FOGLIA, P. et PRETE, C. A. (2012). A real-time configurable NURBS interpolator with bounded acceleration, jerk and chord error. *Computer-Aided Design*, 44(6):509 – 521.

[Baek et Ko, 2008]

BAEK, D. K. et KO, T. J. (2008). Feedrate scheduling for free-form surface using an NC verification model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(2):163 – 172.

[Béarée, 2005]

BÉARÉE (2005). *Prise en compte des phénomènes vibratoires dans la génération de commande des machines-outils à dynamique élevée*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

[Béarée *et al.*, 2004]

BÉARÉE, R., BARRE, P.-J. et BLOCH, S. (2004). Influence of high-speed machine tool control parameters on the contouring accuracy. application to linear and circular interpolation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 40:321–342.

[Barsky et Derose, 1989]

BARSKY, B. et DEROSE, T. (1989). Geometric continuity of parametric curves : three equivalent characterizations. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 9(6):60 – 69.

[BBF, 1982]

BBF (1982). Enrichissement du vocabulaire de l’informatique, Bulletin des Bibliothèques de France, 1982, numéro 6, p. 355-358, consulté le 1 février 2013.

[Beaucamp *et al.*, 2011]

BEAUCAMP, A., NAMBA, Y., INASAKI, I., COMBRINCK, H. et FREEMAN, R. (2011). Finishing of optical moulds to $\lambda/20$ by automated corrective polishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1):375 – 378.

[Beudaert *et al.*, 2012]

BEUDAERT, X., LAVERNHE, S. et TOURNIER, C. (2012). 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.

[Beudaert *et al.*, 2013]

BEUDAERT, X., LAVERNHE, S. et TOURNIER, C. (2013). 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 73(0):9 – 16.

[Beudaert *et al.*, 2011]

BEUDAERT, X., PECHARD, P.-Y. et TOURNIER, C. (2011). 5-axis tool path smoothing based on drive constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(12):958 – 965.

[Bi *et al.*, 2012]

BI, Q. Z., JIN, Y. Q., WANG, Y. H., ZHU, L. M. et DING, H. (2012). An analytical curvature-continuous bezier transition algorithm for high-speed machining of a linear tool path. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57(0):55 – 65.

[Bobrow *et al.*, 1985]

BOBROW, J., DUBOWSKY, S. et GIBSON, J. (1985). Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. *International Journal of Robotics Research*, 4(3):3 – 17.

[Bohez, 2002]

BOHEZ, E. L. J. (2002). Compensating for systematic errors in 5-axis nc machining. *Computer-Aided Design*, 34(5):391 – 403.

[Bouard *et al.*, 2011]

BOUARD, M., PATELOUP, V. et ARMAND, P. (2011). Pocketing toolpath computation using an optimization method. *Computer-Aided Design*, 43(9):1099 – 1109.

[Boucher *et al.*, 1990]

BOUCHER, P., DUMUR, D. et RAHMANI, K. F. (1990). Generalized predictive cascade control (GPCC) for machine tools drives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39(1):357 – 360.

[Boucher *et al.*, 2003]

BOUCHER, P., DUMUR, D. et RODRIGUEZ, P. (2003). Robustification of cnc controllers for machine tools motor drives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1):293 – 296.

[Brecher *et al.*, 2011]

BRECHER, C., QUINTANA, G., RUDOLF, T. et CIURANA, J. (2011). Use of NC kernel data for surface roughness monitoring in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12):953–962.

[Brecher *et al.*, 2006]

BRECHER, C., WECK, M. et YAMASAKI, T. (2006). Controller-integrated predictive oscillation compensation for machine tools with parallel kinematics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2):142 – 150.

[Brecher *et al.*, 2008]

BRECHER, C., WENZEL, C. et KLAR, R. (2008). Characterization and optimization of the dynamic tool path of a highly dynamic micromilling machine. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(2):86 – 91.

[Bristow *et al.*, 2006]

BRISTOW, D. A., THARAYIL, M. et ALLEYNE, A. G. (2006). A survey of iterative learning control. *Control Systems, IEEE*, 26(3):96–114.

[Broquere *et al.*, 2010]

BROQUERE, X., SIDOBRE, D. et NGUYEN, K. (2010). From motion planning to trajectory control with bounded jerk for service manipulator robots. *In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4505 –4510.

[Castagnetti, 2008]

CASTAGNETTI, C. (2008). *Amélioration du comportement cinématique des machines par l'optimisation des trajets d'usinage 5 axes*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Institut Français de Mécanique Avancée.

[Castagnetti *et al.*, 2008]

CASTAGNETTI, C., DUC, E. et RAY, P. (2008). The domain of admissible orientation concept : A new method for five-axis tool path optimisation. *Computer-Aided Design*, 40(9):938 – 950.

[Chameleon Projet, 2013]

CHAMELEON PROJET (2013). Chameleon projet (2008-2011), www.chameleonproject.eu, consulté le 1 février 2013.

[Cheng et Tseng, 2006]

CHENG, C.-W. et TSENG, W.-P. (2006). Design and implementation of a real-time NURBS surface interpolator. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30: 98–104.

[Corke, 2007]

CORKE, P. (2007). Matlab toolboxes : robotics and vision for students and teachers. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 14(4):16 –17.

[Dietmair et Verl, 2009]

DIETMAIR, A. et VERL, A. (2009). Drive based vibration reduction for production machines. *Modern Machinery Science Journal*, 3(4).

[Dong et al., 2007]

DONG, J., FERREIRA, P. et STORI, J. (2007). Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum-time trajectories. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(12-13):1941 – 1955.

[Dong et Stori, 2006]

DONG, J. et STORI, J. A. (2006). A generalized time-optimal bidirectional scan algorithm for constrained feed-rate optimization. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128:379 – 390.

[Dong et Stori, 2007]

DONG, J. et STORI, J. A. (2007). Optimal feed-rate scheduling for high-speed contouring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129:63 – 76.

[Duc, 1998]

DUC, E. (1998). *Usinage de formes gauche : contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Duc et al., 1999]

DUC, E., LARTIGUE, C., TOURNIER, C. et BOURDET, P. (1999). A new concept for the design and the manufacturing of free-form surfaces : The machining surface. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(1):103 – 106.

[Dugas, 2002]

DUGAS, A. (2002). *CFAO et UGV - Simulation d'usinage de formes complexes*. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes - Université de Nantes.

[Dumur et Boucher, 1994]

DUMUR, D. et BOUCHER, P. (1994). New predictive solutions to very high speed machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43(1):363 – 366.

[Dumur *et al.*, 1998]

DUMUR, D., BOUCHER, P. et RÖDER, J. (1998). Advantages of an open architecture structure for the design of predictive controllers for motor drives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(1):291 – 294.

[Dumur *et al.*, 2008]

DUMUR, D., SUSANU, M. et AUBOURG, M. (2008). Complex form machining with axis drive predictive control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1):399 – 402.

[Erkorkmaz et Altintas, 2001a]

ERKORKMAZ, K. et ALTINTAS, Y. (2001a). High speed CNC system design. Part I : jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(9):1323 – 1345.

[Erkorkmaz et Altintas, 2001b]

ERKORKMAZ, K. et ALTINTAS, Y. (2001b). High speed cnc system design. Part III : high speed tracking and contouring control of feed drives. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(11):1637 – 1658.

[Erkorkmaz *et al.*, 2011]

ERKORKMAZ, K., ALZAYDI, A., ELFIZY, A. et ENGIN, S. (2011). Time-optimal trajectory generation for 5-axis on-the-fly laser drilling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1):411 – 414.

[Erkorkmaz et Heng, 2008]

ERKORKMAZ, K. et HENG, M. (2008). A heuristic feedrate optimization strategy for NURBS toolpaths. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1):407 – 410.

[Erkorkmaz *et al.*, 2006]

ERKORKMAZ, K., YEUNG, C.-H. et ALTINTAS, Y. (2006). Virtual CNC system. Part II. high speed contouring application. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(10):1124 – 1138.

[Ernesto et Farouki, 2012]

ERNESTO, C. et FAROUKI, R. (2012). High-speed cornering by CNC machines under prescribed bounds on axis accelerations and toolpath contour error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1):327 – 338.

[ESPRIT, 2000]

ESPRIT (2000). Newsletter issue 1, 2000, www.step-nc.org, consulté le 1 février 2013.

[Farouki, 2007]

FAROUKI, R. (2007). *Pythagorean-hodograph curves : algebra and geometry inseparables*. Geometry and Computing, Vol. 1. Springer.

[Farouki *et al.*, 1998]

FAROUKI, R., MANJUNATHAIAH, J., NICHOLAS, D., YUAN, G.-F. et JEE, S. (1998). Variable-feedrate CNC interpolators for constant material removal rates along pythagorean-hodograph curves. *Computer-Aided Design*, 30(8):631 – 640.

[Farouki et Tsai, 2001]

FAROUKI, R. T. et TSAI, Y.-F. (2001). Exact taylor series coefficients for variable-feedrate CNC curve interpolators. *Computer-Aided Design*, 33(2):155 – 165.

[Fleisig et Spence, 2001]

FLEISIG, R. V. et SPENCE, A. D. (2001). A constant feed and reduced angular acceleration interpolation algorithm for multi-axis machining. *Computer-Aided Design*, 33(1):1 – 15.

[FoFdration, 2013]

FOFDATION (2013). Fofdration project (2010-2013), www.fofdation-project.eu, consulté le 1 février 2013.

[Gasparetto et Zanutto, 2008]

GASPARETTO, A. et ZANOTTO, V. (2008). A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3):415 – 426.

[Gasparetto et Zanutto, 2010]

GASPARETTO, A. et ZANOTTO, V. (2010). Optimal trajectory planning for industrial robots. *Advances in Engineering Software*, 41(4):548 – 556.

[Ge *et al.*, 2007]

GE, W., HUANG, Z. et WANG, G. (2007). Interpolating solid orientations with a C2-Continuous B-Spline quaternion curve, Technologies for E-Learning and Digital Entertainment. *Lecture Notes in Computer Science*, 4469:606 – 615.

[Groß *et al.*, 2001]

GROSS, H., HARMANN, J. et WIEGÄRTNER, G. (2001). *Electrical feed drives in automation*. SIEMENS, MCD corporate Publishing.

[Guiot, 2012]

GUIOT, A. (2012). *Modélisation et simulation du procédé de prépolissage automatique sur centre d'usinage 5 axes*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Heng et Erkorkmaz, 2010]

HENG, M. et ERKORKMAZ, K. (2010). Design of a NURBS interpolator with minimal feed fluctuation and continuous feed modulation capability. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(3):281 – 293.

[Ho *et al.*, 2003]

HO, M.-C., HWANG, Y.-R. et HU, C.-H. (2003). Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(12):1259 – 1267.

[ISG GmbH, 2013]

ISG GMBH (2013). Isg-kernel, www.isg-stuttgart.de/kernel.html, consulté le 1 février 2013.

[ISO14649-10, 2004]

ISO14649-10 (2004). Industrial automation systems and integration - physical device control - data model for computerized numerical controllers - part 10 : General process data.

[ISO14649-11, 2004]

ISO14649-11 (2004). Industrial automation systems and integration - physical device control - data model for computerized numerical controllers - part 11 : Process data for milling.

[Jerard *et al.*, 1989]

JERARD, R. B., DRYSDALE, R. L., HAUCK, K., SCHAUDT, B. et MAGEWICK, J. (1989). Methods for detecting errors in numerically controlled machining of sculptured surfaces. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(1):26 – 39.

[Koren, 1980]

KOREN, Y. (1980). Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 102(4):265 – 272.

[Koren et Lin, 1995]

KOREN, Y. et LIN, R.-S. (1995). Five-axis surface interpolators. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44(1):379 – 382.

[Laguionie, 2010]

LAGUIONIE, R. (2010). *Intégration de la programmation basée entités pour la fabrication sur machines à commandes numériques dans un contexte multi-process*. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

[Lai *et al.*, 2008]

LAI, J.-Y., LIN, K.-Y., TSENG, S.-J. et UENG, W.-D. (2008). On the development of a parametric interpolator with confined chord error, feedrate, acceleration and jerk. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(1-2):104 – 121.

[Lambrechts *et al.*, 2005]

LAMBRECHTS, P., BOERLAGE, M. et STEINBUCH, M. (2005). Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems. *Control Engineering Practice*, 13(2):145 – 157.

[Langeron *et al.*, 2004]

LANGERON, J. M., DUC, E., LARTIGUE, C. et BOURDET, P. (2004). A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves. *Computer-Aided Design*, 36(12):1219 – 1229.

[Lartigue *et al.*, 1999]

LARTIGUE, C., DUC, E. et TOURNIER, C. (1999). Machining of free-form surfaces and

geometrical specifications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 213(1):21–27.

[Lartigue *et al.*, 2001]

LARTIGUE, C., THIEBAUT, F. et MAEKAWA, T. (2001). CNC tool path in terms of B-spline curves. *Computer-Aided Design*, 33(4):307 – 319.

[Lartigue *et al.*, 2004]

LARTIGUE, C., TOURNIER, C., RITOU, M. et DUMUR, D. (2004). High-performance NC for HSM by means of polynomial trajectories. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1):317 – 320.

[Lavernhe, 2006]

LAVERNHE, L. (2006). *Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoires 5 axes UGV*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Lavernhe *et al.*, 2004]

LAVERNHE, S., DUAN, X., TOURNIER, C. et LARTIGUE, C. (2004). Performance of off-line polynomial CNC trajectories within the context of HSM. *ASME Conference Proceedings*, 2004(47136):275–281.

[Lavernhe *et al.*, 2010]

LAVERNHE, S., QUINSAT, Y. et LARTIGUE, C. (2010). Model for the prediction of 3d surface topography in 5-axis milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51:915–924.

[Lavernhe *et al.*, 2008]

LAVERNHE, S., TOURNIER, C. et LARTIGUE, C. (2008). Optimization of 5-axis high-speed machining using a surface based approach. *Computer-Aided Design*, 40(10-11):1015 – 1023.

[Layegh *et al.*, 2012]

LAYEGH, S. E., ERDIM, H. et LAZOGLU, I. (2012). Offline force control and feedrate scheduling for complex free form surfaces in 5-axis milling. *Procedia CIRP*, 1(0):96 – 101.

[Li et Liang, 2011]

LI, X. et LIANG, H. (2011). Development of a STEP-NC controller for 5-axis machining of NURBS surfaces. *Advanced Materials Research*, 317:1940–1948.

[Liang et Li, 2009]

LIANG, H. et LI, X. (2009). A 5-axis milling system based on a new G code for NURBS surface. *International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2:600–606.

[Liang et Li, 2013]

LIANG, H. et LI, X. (2013). Five-axis STEP-NC controller for machining of surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–10.

[Lin *et al.*, 2007]

LIN, M.-T., TSAI, M.-S. et YAU, H.-T. (2007). Development of a dynamics-based NURBS interpolator with real-time look-ahead algorithm. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(15):2246 – 2262.

[Lin, 2000]

LIN, R.-S. (2000). Real-time surface interpolator for 3D parametric surface machining on 3-axis machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(10):1513 – 1526.

[LinuxCNC, 2013]

LINUXCNC (2013). EMC2 - enhanced machine control, www.linuxcnc.org, consulté le 1 février 2013.

[Lo, 2000]

LO, C.-C. (2000). CNC machine tool surface interpolator for ball-end milling of free-form surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(3):307 – 326.

[MAL Inc., 2013]

MAL INC. (2013). Virtual cnc, www.malinc.com/vcnc.html, consulté le 1 février 2013.

[Merdol et Altintas, 2008]

MERDOL, S. D. et ALTINTAS, Y. (2008). Virtual cutting and optimization of three-axis milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(10):1063 – 1071.

[Nam et Yang, 2004]

NAM, S.-H. et YANG, M.-Y. (2004). A study on a generalized parametric interpolator with real-time jerk-limited acceleration. *Computer-Aided Design*, 36:27 – 36.

[Olabi *et al.*, 2010]

OLABI, A., BÉARÉE, R., GIBARU, O. et DAMAK, M. (2010). Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots. *Control Engineering Practice*, 18(5):471 – 482.

[Otsuki *et al.*, 2004]

OTSUKI, T., OGINO, H., IDE, S. et CHIBA, T. (2004). Curve interpolation method, Japan, Fanuc LTD. Yamanashi (US Patent 6823234 B2).

[Pardo-Castellote et Cannon, 1996]

PARDO-CASTELLOTE, G. et CANNON, R. H. (1996). Proximate time-optimal algorithm for on-line path parameterization and modification. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2(2):1539 – 1546.

[Pateloup, 2011]

PATELOUP, S. (2011). *Modélisations et aptitudes à l'emploi des machines-outils à structure parallèle : vers une optimisation dirigée du processus*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal – Clermont II.

[Pateloup, 2005]

PATELOUP, V. (2005). *Amélioration du comportement cinématique des machines outils UGV - Application au calcul de trajets d'évidement de poches*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Institut Français de Mécanique Avancée.

[Pateloup *et al.*, 2010]

PATELOUP, V., DUC, E. et RAY, P. (2010). Bspline approximation of circle arc and straight line for pocket machining. *Computer-Aided Design*, 42(9):817 – 827.

[Péchard, 2009]

PÉCHARD, P.-Y. (2009). *Génération de trajectoires d'usinage grande vitesse 5 axes par flanc d'outil : intégration d'un critère de fluidité*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Pechard *et al.*, 2009]

PECHARD, P.-Y., TOURNIER, C., LARTIGUE, C. et LUGARINI, J.-P. (2009). Geometrical deviations versus smoothness in 5-axis high-speed flank milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6):454 – 461.

[Pessoles, 2010]

PESSOLES, X. (2010). *Aide au choix du posage en usinage 5 axes continus par la modélisation du comportement cinématique des machines - outils*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

[Pritschow *et al.*, 2001]

PRITSCHOW, G., ALTINTAS, Y., JOVANE, F., KOREN, Y., MITSUISHI, M., TAKATA, S., van BRUSSEL, H., WECK, M. et YAMAZAKI, K. (2001). Open controller architecture - past, present and future. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50(2):463 – 470.

[Prévost, 2011]

PRÉVOST, D. (2011). *Modélisation avancée du couple Machine Outil / Commande Numérique dans un contexte UGV pour l'optimisation du calcul de trajectoires multi axes*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Quaschner *et al.*, 2003]

QUASCHNER, B., REICHEL, T., SCHAEFERS, E., WESTERMEYER, W. et WIEGAERTNER, G. (2003). Jerk-limitation with adaptation of the path dynamics. Siemens US Patent 6,580,245.

[Rauch, 2007]

RAUCH, M. (2007). *Optimisation de la programmation des MOCN - Application aux machines à structure parallèle*. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

[Saikumar et Shunmugam, 2012]

SAIKUMAR, S. et SHUNMUGAM, M. (2012). Development of a feed rate adaption control

system for high-speed rough and finish end-milling of hardened EN24 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(9-12):869–884.

[Sekler *et al.*, 2012]

SEKLER, P., VOSS, M. et VERL, A. (2012). Model-based calculation of the system behavior of machine structures on the control device for vibration avoidance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9-12):1087–1095.

[Sencer et Altintas, 2009]

SENCER, B. et ALTINTAS, Y. (2009). Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools Part II : Precision contour controller design. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(3):031007.

[Sencer *et al.*, 2008]

SENCER, B., ALTINTAS, Y. et CROFT, E. (2008). Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(7-8):733 – 745.

[Sencer *et al.*, 2009]

SENCER, B., ALTINTAS, Y. et CROFT, E. (2009). Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools Part I : Modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131(3):031006.

[Shin et McKay, 1985]

SHIN, K. et MCKAY, N. (1985). Minimum time trajectory planning for industrial robots with general torque constraints. *The university of Michigan*.

[Shoemake, 1985]

SHOEMAKE, K. (1985). Animating rotation with quaternion curves. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 19(3):245–254.

[Siemens, 2006a]

SIEMENS (2006a). *SINUMERIK 840D sl/840Di sl/840D/840Di/810D - Basic Functions*, DocOrderNo. 6FC5397-0BP10-1BA0.

[Siemens, 2006b]

SIEMENS (2006b). *SINUMERIK 840D sl/840Di sl/840D/840Di/810D - Extended Functions*, DocOrderNo. 6FC5397-1BP10-1BA0.

[Siemens, 2009]

SIEMENS (2009). *Sinumerik - 5 axis machining*, DocOrderNo. 6FC5095-0AB10-0BP1.

[Susanu, 2005]

SUSANU, M. (2005). *Commande prédictive hiérarchisée pour le positionnement des axes de machine-outil à architecture ouverte*. Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay.

[Tapie, 2007]

TAPIE, L. (2007). *Décomposition topologiques des outillages de forge pour la génération de trajectoires UGV*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Terrier, 2005]

TERRIER, M. (2005). *Optimisation du processus de fabrication en usinage à grande vitesse sur machines-outils à structure parallèle*. Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes.

[Tournier, 2001]

TOURNIER, C. (2001). *Contribution à la conception de forme complexes : La surface d'usinage en fraisage 5 axes isocrête*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Tournier, 2009]

TOURNIER, C. (2009). *Contribution à l'amélioration de la qualité des surfaces fabriquées sur centre d'usinage à 5 axes*. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.

[Tournier et al., 2006]

TOURNIER, C., CASTAGNETTI, C., LAVERNHE, S. et AVELLAN, F. (2006). Tool path generation and post-processor issues in five-axis high speed machining of hydro turbine blades. *In Fifth International Conference on High Speed Machining*.

[Tsai et al., 2003]

TSAI, M. C., CHENG, C. W. et CHENG, M. Y. (2003). A real-time NURBS surface interpolator for precision three-axis CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(12):1217 – 1227.

[Tsai et al., 2008]

TSAI, M.-S., NIEN, H.-W. et YAU, H.-T. (2008). Development of an integrated look-ahead dynamics-based NURBS interpolator for high precision machinery. *Computer-Aided Design*, 40(5):554 – 566.

[Tsai et al., 2010]

TSAI, M.-S., NIEN, H.-W. et YAU, H.-T. (2010). Development of a real-time look-ahead interpolation methodology with spline-fitting technique for high-speed machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8):621–638.

[Tsai et al., 2013]

TSAI, M.-S., YEN, C.-L. et YAU, H.-T. (2013). Integration of an empirical mode decomposition algorithm with iterative learning control for high-precision machining. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 18(3):878–886.

[Verl et Frey, 2012]

VERL, A. et FREY, S. (2012). Improvement of feed drive dynamics by means of semi-active damping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):351 – 354.

[Yau *et al.*, 2006]

YAU, H.-T., LIN, M.-T. et TSAI, M.-S. (2006). Real-time NURBS interpolation using FPGA for high speed motion control. *Computer-Aided Design*, 38(10):1123 – 1133.

[Yutkowitz et Chester, 2005]

YUTKOWITZ, S. J. et CHESTER, W. (2005). Apparatus and method for smooth cornering in a motion control system, United States, Siemens Energy & Automation, Inc. Alpharetta, GA (US Patent 6922606).

[Zhang *et al.*, 2012]

ZHANG, K., YUAN, C.-M. et GAO, X.-S. (2012). Efficient algorithm for time-optimal feedrate planning and smoothing with confined chord error and acceleration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–13.

[Zhao *et al.*, 2013]

ZHAO, H., ZHU, L. et DING, H. (2013). A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 65(0):88 – 98.

Annexe

A

Mesure des surfaces usinées dans le chapitre 5

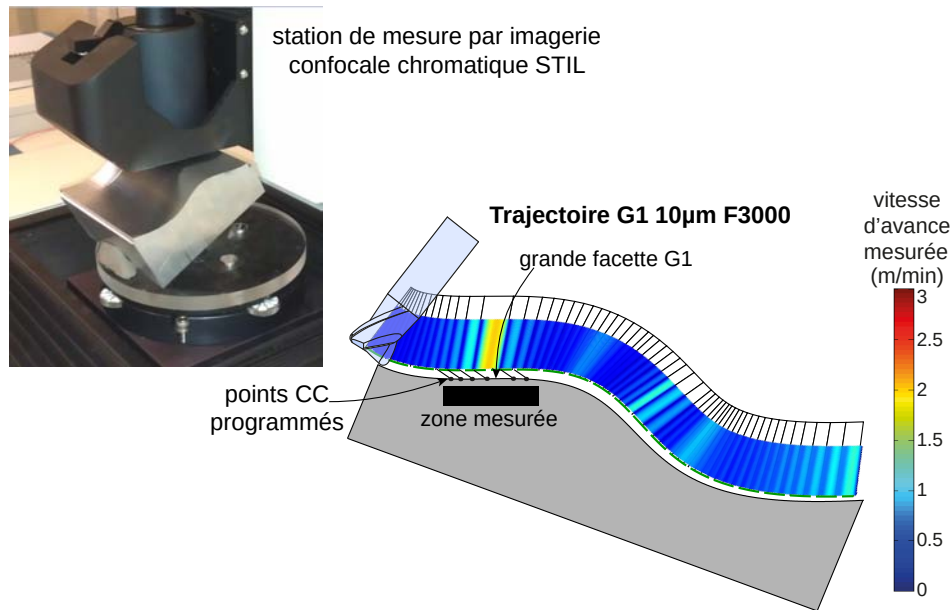


Figure 110 – Station de mesure STIL et localisation de la zone mesurée

Cette annexe fournit des mesures et analyses complémentaires sur la surface usinée dans le chapitre 5. La station de mesure STIL équipée d'un capteur confocal chromatique est présentée sur la figure 110. La pièce est orientée de sorte à mesurer une portion quasi plane aux alentours de la grande facette G1 de la stratégie G1 10 μm . La plage de mesure de 300 μm du capteur utilisé permet, avec un bon dégauchissage de la pièce, de mesurer une portion de surface d'environ 20 mm de long dans le sens de l'avance.

La surface usinée présente un ensemble de défauts combinés. Les gains apportés par la méthode DTIS ont été analysés en détail dans le chapitre 5. Les mesures réalisées dans cette annexe montrent d'autres aspects notamment liés à la performance des asservissements.

Sur la pièce usinée, il est possible de retrouver l'ensemble des défauts suivants :

- défauts sur les caractéristiques géométriques mesurées (porte-pièce, outil),
- défauts de posage de la pièce (dégauchissage ...),
- défauts de la géométrie machine. Des compensations géométriques incluant les défauts d'assemblage et les déformations thermiques sont réalisées par la commande numérique Siemens 840D (ces compensations ne sont pas effectuées par la commande numérique PREMIUM-OpenCNC),
- défauts induits par la tolérance d'usinage programmée en FAO,
- défauts induits par les différences de trajet entre le point piloté CL et le point de contact CC en lien avec la transformation géométrique 5 axes (cf. : figure 91),
- défauts liés à l'asservissement des axes,
- défauts liés au processus de coupe ...

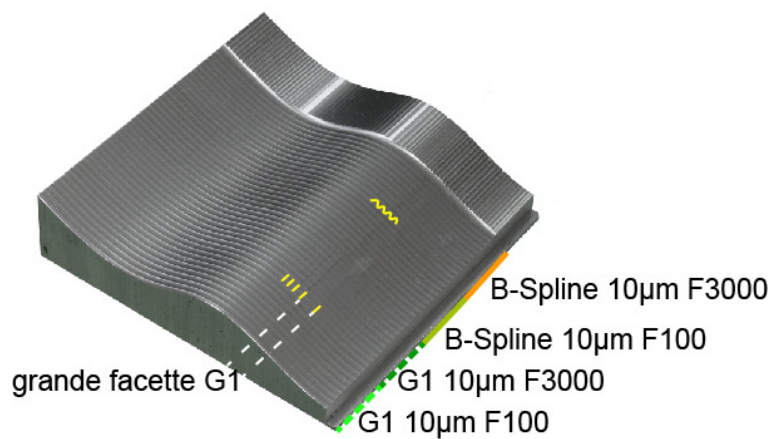


Figure 111 – Pièce usinée à basse et haute vitesses avec les stratégies G1 et B-Spline 10 μm

En plus de la pièce usinée avec les 5 stratégies qui a été analysée dans le chapitre 5, une autre pièce est usinée avec les stratégies présentées sur la figure 111. La première bande est usinée avec le format G1, une tolérance d'usinage de 10 μm et une vitesse d'avance très basse de 100 mm/min qui reste constante tout au long d'une passe. La seconde bande est usinée avec les mêmes points G1 programmés, mais en utilisant une vitesse d'avance programmée de 3000 mm/min. Nous avons vu dans le chapitre 5 que cette vitesse n'est pas respectée lors de l'usinage et que la vitesse d'avance réelle varie beaucoup comme on peut le voir sur la figure 110. L'usinage de deux bandes côte à côte permet de mettre en valeur les défauts dynamiques causés par les variations de la vitesse d'avance réelle et le comportement des asservissements.

Sur le même principe, les deux portions suivantes sont usinées avec un format B-Spline, une tolérance d'usinage de 10 μm et des vitesses d'avance programmées de 100 et 3000 mm/min. La vitesse réelle pour la stratégie B-Spline 10 μm F3000 est fournie sur la figure 105.

La figure 112 présente les surfaces mesurées. Les crêtes apparaissent clairement, car la distance entre passes de 2 mm est relativement large. Cependant, cet aspect ne nous intéresse pas ici donc nous étudierons des profils extraits dans le sens de l'avance pour étudier l'effet des différentes stratégies d'usinage. Le logiciel Mountain Maps est utilisé pour traiter les résultats et extraire des profils à partir des surfaces mesurées. Pour toutes les figures suivantes, les profils sont extraits sur le fond des passes d'usinage.

Les paramètres de rugosité totale R_t et de rugosité arithmétique R_a sont calculés pour les profils extraits. Les résultats ne sont pas très significatifs. À priori, les paramètres de rugosité sont dépendants de la vitesse d'avance réelle, les paramètres de rugosité sont identiques pour les deux trajectoires à très basse vitesse. Ensuite, pour les autres trajectoires, plus la vitesse d'avance est élevée, plus la rugosité est grande. Cependant, même en utilisant un pas de mesure très fin (0.15 μm) dans le sens de l'avance, il n'est pas possible de voir le passage de dent clairement. En effet, l'avance à la dent est très faible dans les zones où il y a des marques

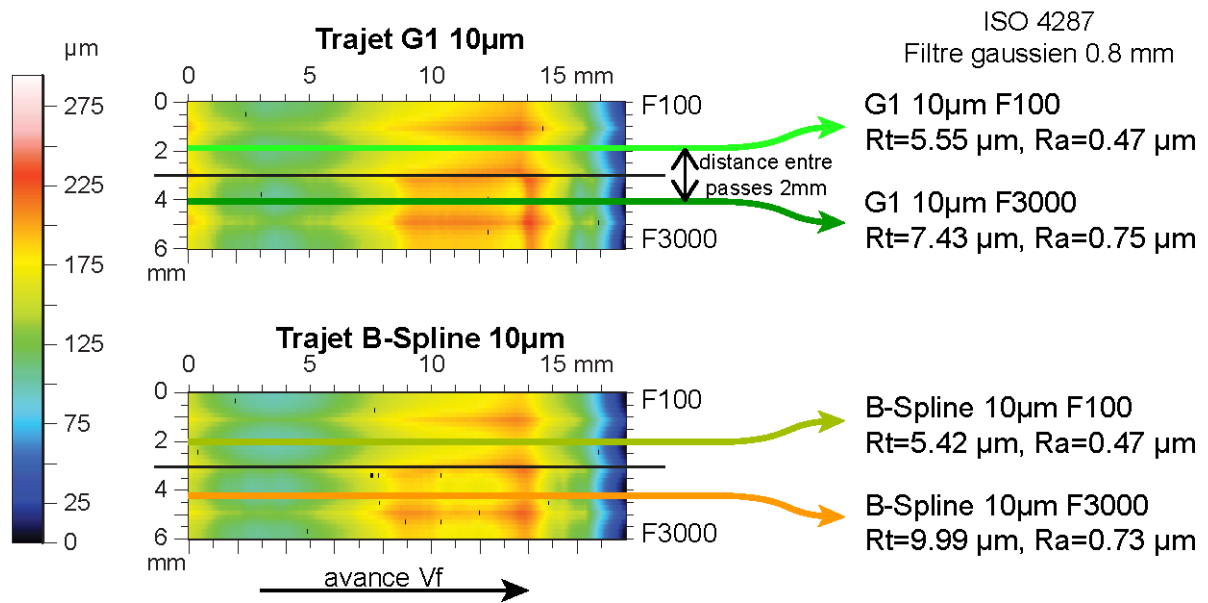


Figure 112 – Surfaces mesurées sur la pièce usinée à basse et haute vitesses avec les stratégies G1 et B-Spline 10 µm

d'usinage (de l'ordre de 3 à 10 µm par dent) et les problèmes liés à la coupe viennent trop perturber la géométrie de la surface pour distinguer les passages de dents.

L'hypothèse retenue dans les dernières pages du chapitre 5 consiste à dire que les marques d'usinage sont principalement dues aux variations de la vitesse d'avance réelle. Cependant, les mesures de la micro-géométrie ne permettent pas de mettre en évidence ces marques qui sont pourtant clairement visibles à l'œil nu. La comparaison visuelle des surfaces usinées reste donc un bon moyen d'attester de l'amélioration de l'aspect des surfaces apportées par la méthode DTIS.

En regardant à une plus grande échelle, certains phénomènes apparaissent de manière très significative. Sur la figure 113, les profils mesurés sur une longueur de 18mm sont superposés pour une passe à basse vitesse et une passe à haute vitesse.

Étant donné que ces surfaces sont réalisées sur la même pièce, les mesures peuvent facilement être recalées entre elles. De plus, la géométrie nominale peut également être recalée grâce à la grande facette G1 qui est parfaitement marquée lors de l'usinage à très basse vitesse. En se basant sur cette grande facette, les points CC programmés et la surface exacte peuvent être orientés et positionnés de façon précise pour se superposer aux mesures.

Sur le graphique en haut de la figure 113 concernant le trajet G1 10 µm, on constate plusieurs choses intéressantes. Tout d'abord à très basse vitesse, les segments G1 sont parfaitement identifiables. Sur la grande facette, on remarque que l'écart entre la surface nominale et la surface usinée est supérieur à la tolérance de 10 µm. En effet, on retrouve ici les effets causés par la transformation géométrique 5 axes et par l'écart entre le trajet du point piloté CL et celui du

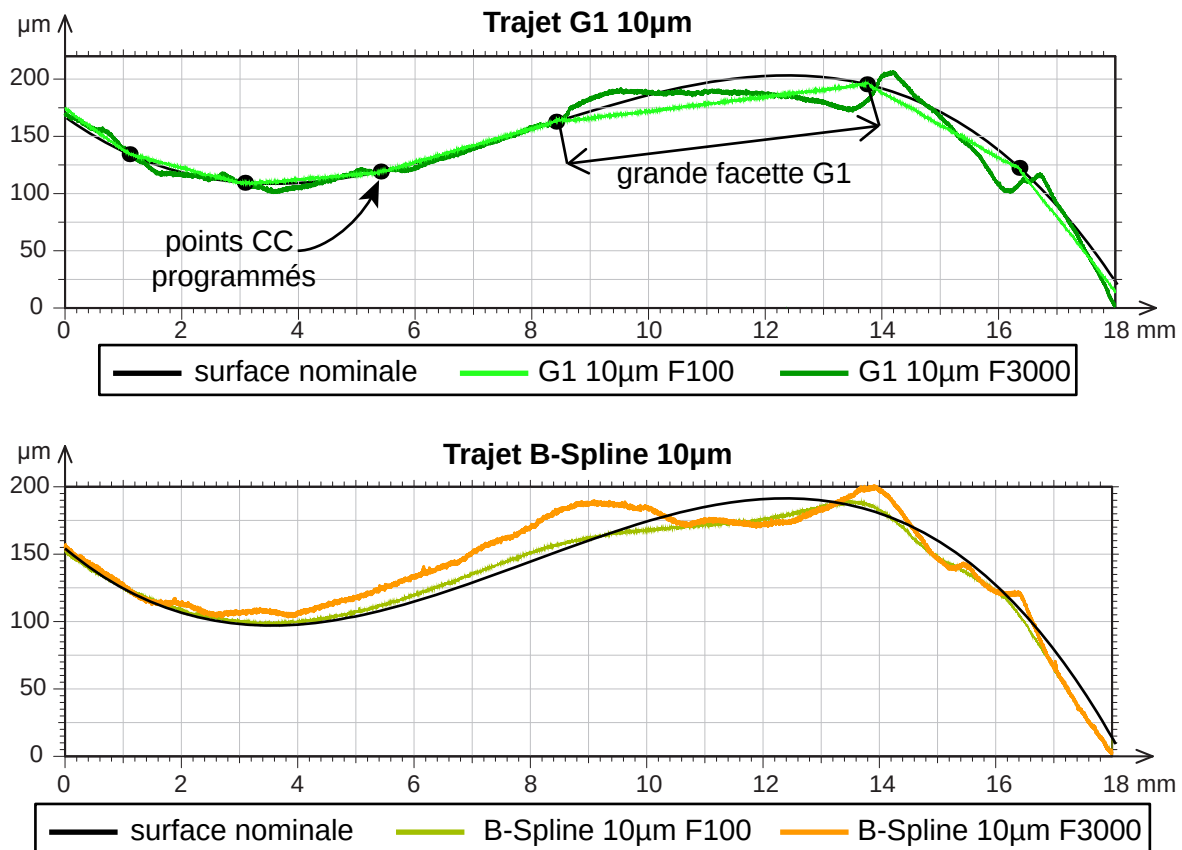


Figure 113 – Profils extraits pour les trajectoires à basses et hautes vitesses avec les stratégies G1 et B-Spline $10\ \mu m$

point de contact CC. Sur la grande facette, l'écart de corde atteint $20\ \mu m$.

À haute vitesse, la géométrie de la surface usinée est fortement modifiée par les erreurs de suivi générées par l'asservissement. Si on regarde l'échelle de couleur de la figure 110, on remarque que la vitesse d'avance augmente fortement sur la grande facette G1. Quand la vitesse d'avance augmente, les déformations induites par les asservissements augmentent également et il devient difficile de retrouver les facettes de l'interpolation linéaire G1. On remarque les mêmes phénomènes sur le trajet B-Spline $10\ \mu m$. Les défauts induits par le contrôle temps réel de la machine ont des fréquences relativement basses et impliquent donc plutôt des défauts d'ondulation. Une analyse plus poussée est assez délicate à réaliser puisque la pièce est usinée en 5 axes et que l'impact des défauts d'asservissement des axes sur la géométrie de la pièce n'est pas direct. Pour aller plus loin, il faudrait utiliser le modèle d'asservissement développé dans le chapitre 4 afin de simuler ces défauts.

Pour finir cette analyse, la pièce usinée à haute vitesse avec les 5 stratégies présentées dans le chapitre 5 est mesurée, figure 114. Le fait d'avoir toutes les portions de surface sur une même pièce permet là encore de parfaitement recalibrer les différentes mesures. Par contre sur cette pièce, toutes les portions sont usinées à haute vitesse donc les facettes de G1 n'apparaissent

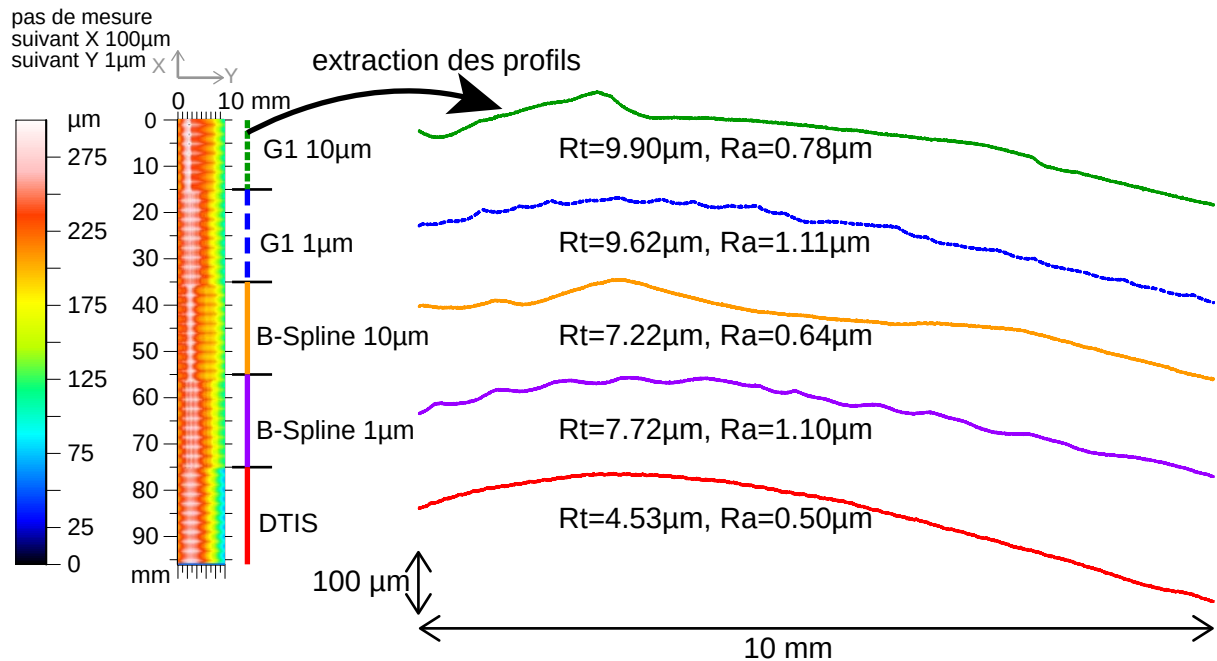


Figure 114 – Mesure de la surface et des profils extraits sur la pièce usinée à haute vitesse avec les 5 stratégies

plus clairement. Il est ainsi impossible de superposer la géométrie nominale à ces mesures. De plus, la surface DTIS est recalée par rapport aux autres pour compenser la différence d'altitude due à la compensation thermique de la commande numérique Siemens 840D. La zone mesurée correspond grossièrement à celle mesurée sur la pièce précédente aux alentours de la grande facette G1.

Le profil extrait sur la surface usinée avec la commande ouverte et la méthode DTIS a une rugosité plus faible que les autres. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, l'analyse des paramètres de rugosité n'est pas très significative, car le phénomène de coupe perturbe beaucoup le profil théorique généré par le passage de dents. Ainsi, les paramètres de rugosité sont fournis à titre indicatif, mais leur interprétation n'étant pas claire, aucun commentaire ne sera fait sur la rugosité.

Par contre, sur les profils extraits, on remarque nettement des ondulations très marquées pour les stratégies avec une tolérance d'usinage de 1 μm. Sur les stratégies avec une tolérance d'usinage à 10 μm, on retrouve les mêmes phénomènes que sur la figure 113 avec des ondulations plus amples. Le format B-Spline ou G1 ne semble pas avoir beaucoup d'influence sur ces ondulations qui sont probablement plus liées à la vitesse d'avance réelle. Finalement, le profil usiné avec la commande numérique ouverte et la méthode DTIS est très lisse notamment, car la vitesse d'avance réelle est plus fluide. En effet, contrairement à ce que l'on peut observer sur les autres stratégies, il n'y a pas de variation brusque de vitesse sur la trajectoire DTIS.

Cette analyse montre que des défauts d'ondulation sont causés par l'effet combiné des variations de vitesse et du comportement de l'asservissement des axes. La dernière surface est plus lisse que les autres, mais nous avons déjà vu dans le chapitre 4 que les asservissements de la commande numérique Siemens 840D ne semblent pas bien réglés. Le temps de réponse de la boucle de courant utilisé pour effectuer l'anticipation en accélération ne correspond pas au temps de réponse identifié par les mesures que nous avons effectuées. Pour vraiment attester des bénéfices de l'interpolation directement sur la surface, il faudrait réaliser tous les usinages avec la commande numérique ouverte pour garantir le même comportement au niveau des asservissements.

Pour conclure, ces mesures sur les surfaces usinées font davantage ressortir les défauts liés à l'asservissement que les apports de la méthode DTIS d'interpolation de la trajectoire directement sur la surface. De plus, étant donné que les vitesses réelles atteintes avec les 5 stratégies d'usinage sont très différentes, les effets dynamiques modifient significativement les profils usinés. En effet, les surfaces usinées à basses et hautes vitesses mettent parfaitement en évidence les défauts induits par la dynamique de la machine. Pour aller plus loin, il serait intéressant de faire une étude plus complète des surfaces usinées pour isoler l'influence de chacun des défauts du processus de fabrication sur la pièce usinée. La commande numérique ouverte PREMIUM-OpenCNC pourra permettre ces analyses, car tous les maillons du processus sont maîtrisés.

Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes

RESUME : Le processus de fabrication des pièces usinées arrive à maturité concernant la fabrication assistée par ordinateur et la maîtrise du procédé d'usinage. Aujourd'hui, les perspectives d'améliorations importantes sont liées à l'optimisation de la commande numérique et de ses interactions avec le reste du processus de fabrication. L'objectif de cette thèse est donc de maîtriser les briques de base de la commande numérique pour optimiser le processus d'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes.

La création d'une commande numérique ouverte nécessite le développement des algorithmes qui transforment le programme d'usinage en consignes échantillonnées pour les axes de la machine. La première partie des travaux consiste à rendre la géométrie suffisamment continue notamment pour les trajets interpolés linéairement en 5 axes qui présentent des discontinuités en tangence. Ensuite, l'interpolation temporelle du trajet crée la trajectoire d'usinage respectant les contraintes cinématiques et en particulier le jerk de chacun des 5 axes de la machine. L'implémentation matérielle de ces algorithmes permet de piloter une machine d'usinage grande vitesse 5 axes avec une commande numérique ouverte. Ainsi, les verrous technologiques associés aux commandes numériques industrielles sont levés et la chaîne numérique est entièrement contrôlée de la CFAO jusqu'au déplacement des axes.

La maîtrise complète de la commande numérique offre la possibilité de définir exactement le trajet d'usinage à partir de la CAO sans introduire les écarts géométriques inhérents aux formats de description standards. L'interpolation de la trajectoire d'usinage directement sur la surface à usiner améliore de manière significative la qualité et la productivité de l'usinage des surfaces complexes. La commande numérique PREMIUM-OpenCNC permet la validation expérimentale de ces travaux et ouvre de nombreuses autres voies d'amélioration du processus de fabrication.

MOTS-CLES : commande numérique ouverte, Usinage Grande Vitesse, fraisage 5 axes, jerk, lissage, vitesse d'avance réelle, interpolation temporelle, écarts géométriques.

Open CNC: optimized interpolation for 5-axis high speed machining of complex surfaces

ABSTRACT: The manufacturing process reaches maturity concerning Computer Aided Manufacturing and cutting process performances. Nowadays, major improvements are linked to the optimization of the Computer Numerical Control and its interactions with the rest of the manufacturing process. The aim of this thesis is to control the basic components of a CNC in order to optimize the 5-axis high speed machining process of complex surfaces.

The realization of an open CNC requires the development of algorithms which transform the machining program into command setpoints for the machine drives. The first part of this thesis allows to round the 5-axis discontinuities caused by the linear tool path interpolation commonly used. Then, a feedrate interpolation algorithm computes the trajectory while respecting the kinematical constraints of the machine and especially the jerk of each axis. The implementation of this work allows to control a 5-axis high speed machine with an open CNC. Hence, the technological barriers that prevent CNC optimizations are removed and the manufacturing process is under control from CAD/CAM to axis displacement.

The complete control over the CNC offers the possibility to define the tool path exactly from Computer Aided Design entities without introducing any geometrical deviation generally induced by standard NC code. The direct interpolation of the trajectory on the machined surface significantly improves the quality and the productivity of complex surface machining. The PREMIUM-OpenCNC allows to prove experimentally the efficiency of this work and opens new ways for future manufacturing process improvements.

KEYWORDS: Open CNC, High Speed Machining, 5-axis milling, jerk, smoothing, feedrate interpolation, geometrical deviations.