Optimisation de la programmation des MOCN - Application aux machines à structure parallèle

Matthieu Rauch

▶ **To cite this version:**

Matthieu Rauch. Optimisation de la programmation des MOCN - Application aux machines à structure parallèle. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Nantes (ECN); Université de Nantes, 2007. Français. NNT : . tel-00429692

HAL Id: tel-00429692

https://theses.hal.science/tel-00429692

Submitted on 4 Nov 2009

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.

École Centrale de Nantes *Université de Nantes*

ÉCOLE DOCTORALE

MECANIQUE, THERMIQUE ET GENIE CIVIL

Année 2007 N° B.U. :

THESE DE DOCTORAT

Diplôme délivré conjointement par
L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

MATTHIEU RAUCH

Le 10 décembre 2007
à l'Ecole Centrale de Nantes

OPTIMISATION DE LA PROGRAMMATION DES MOCN
-
APPLICATION AUX MACHINES A STRUCTURE PARALLELE

JURY

Président : M. Pierre BOURDET, Professeur Emérite, LURPA, ENS de Cachan

Rapporteurs : M. Emmanuel DUC, Maître de Conférences Habilité à Diriger les Recherches, LaMI, IFMA
M. Patrick MARTIN, Professeur des Universités, LGIPM, ENSAM de Metz

Examinateurs : M. Jean-Yves HASCOËT, Professeur des Universités, IRCCyN, ECN
M. Van Khaï NGUYEN, Directeur société CADCAMATION, Genève

Directeur de thèse : Jean-Yves HASCOËT
Laboratoire : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes N° ED 0367 - 318

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Do not go where the path may lead,

go instead where there is no path and leave a trail

Ralph Waldo Emerson

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués à l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, dirigé par Jean-François Lafay. Je tiens à le remercier lui ainsi que toute son équipe pour m'avoir accueilli chaleureusement au laboratoire.

J'aimerais en premier lieu remercier Jean-Yves Hascoët, chef de l'équipe Modélisation et Optimisation de Process de Production (MO2P) et directeur de mon doctorat. Toujours disponible, il a non seulement aiguillé mon travail de ses conseils avisés mais surtout, il m'a témoigné une confiance sans faille en m'associant pleinement à de nombreux projets universitaires et industriels, nationaux et internationaux. Ses qualités humaines et professionnelles ont été les bases d'une relation de travail idéale ; j'ai beaucoup appris à son contact.

Mes remerciements vont également aux membres du jury : Pierre Bourdet pour m'avoir fait l'honneur d'en avoir assuré la présidence, Emmanuel Duc et Patrick Martin pour avoir accepté de rapporter mon travail et pour m'avoir proposé des retours constructifs et Van Khaï Nguyen pour s'être déplacé depuis Genève pour évaluer mon travail.

Ce travail de thèse n'aurait pas eu la même consistance sans le support technique assuré par Eric Bossard et Marc Sauvaget. Je tiens à les remercier pour les moments passés au pied des machines à préparer et réaliser les différentes campagnes d'essais. Je remercie également Jérôme Friand, Rima Ghemraoui et Raphael Laguionie pour leur contribution à ces travaux dans le cadre de leur Master Recherche.

Toute activité de recherche étant faite d'échanges, je remercie également toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu travailler dans le cadre de mon doctorat. Parmi elles, je pense notamment à Hélène Chanal et Emmanuel Duc de l'IFMA, Yon San Martin de Fatronik, ainsi qu'à Jean-Christophe Hamann d'Airbus.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel du Département IPSI de l'Ecole Centrale de Nantes, en particulier les équipes pédagogiques de Production

Mécanique Industrielle et de Conception Mécanique de Produits Industriels. Un merci spécial à Stéphane Tichadou (tuteur pédagogique exceptionnel !) pour sa disponibilité, pour ses nombreux conseils et pour nos riches échanges.

Je pense également à tous les membres de l'équipe MO2P et à l'ensemble des doctorants, ingénieurs et enseignants-chercheurs de l'IRCCyN avec qui j'ai eu le plaisir de partager et d'échanger durant ces trois années. Un grand merci évident à mes collègues de bureau Arnaud Dugas, Aitziber Aguirre, Mickael Rivette et Raphael Laguionie ; chacun a su apporter sa touche personnelle à l'ambiance chaleureuse de ce lieu.

Pour finir, un immense merci à mon amie Annaïg. Elle a su m'entourer de son amour à chaque instant.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Table des matières

REMERCIEMENTS **5**

TABLE DES MATIERES **7**

TABLE DES ILLUSTRATIONS **11**

ABREVIATIONS **17**

INTRODUCTION **19**

CHAPITRE 1. LES MACHINES OUTILS A COMMANDE NUMERIQUE **23**

1.1 Evolutions liees a l'introduction de l'UGV dans les entreprises 24

1.1.1 Présentation de l'UGV *24*

1.1.2 Evolutions de la fonction Fabrication dans l'entreprise *25*

1.1.2.1 Organisation de la production 25

1.1.2.2 Programmation des MOCN 26

1.1.3 Capacités des DCN actuels *27*

1.1.3.1 Nouveaux formats de description de trajectoires 27

1.1.3.2 Optimisation du comportement cinématique de la machine 29

1.1.3.3 Communications – Acquisition de données process 30

1.1.3.4 Bilan 30

1.1.4 Machines outils à Commande Numérique *31*

1.1.4.1 Adaptation des machines outils à leur domaine d'application 31

1.1.4.2 Emergence des MOCN parallèles 32

1.2 MOCN paralleles : une reponse aux contraintes technico-economiques 32

1.2.1 Description de différentes architectures développées *33*

1.2.1.1 Mécanismes pleinement parallèles 34

1.2.1.2 Mécanismes Hybrides : exemple de la MOCN VERNE 35

1.2.2 Calibration des MOCN parallèles *38*

1.2.2.1 Processus de calibration utilisé par Fatronik sur la MOCN VERNE 39

1.2.2.2 Méthode de calibration à partir de l'usinage d'une pièce 41

1.2.3 Comparaison avec les MOCN sérielles *43*

1.2.3.1 Synthèse d'études précédentes 43

1.2.3.2 Exemple d'étude comparative : usinage de poches double courbure 44

1.2.4 Conclusion *48*

1.2.4.1 Les MOCN de demain seront-elles toutes parallèles ? 49

1.2.4.2 Adéquation des MOCN avec les contraintes de l'application visée 50

1.3 Definition des axes de recherche 50

1.3.1 Axe 1 – Préparation de la fabrication : Nouvelle approche de la programmation des trajectoires d'usinage *51*
1.3.2 Axe 2 – Choix des procédés : Programmation de MOCN pour le Formage incrémental *52*
1.3.3 Axe 3 – Déroulement du process : Programmation Avancée des MOCN *52*
1.3.4 Axe 4 – Evolutions pour la programmation : e-manufacturing et Step_NC *53*
1.4 Conclusion 54

CHAPITRE 2. PERFORMANCES NOUVELLES DES MOCN ET CHOIX D'UNE TRAJECTOIRE D'USINAGE 57

2.1 Problematique generale du choix d'une strategie d'usinage 57
2.1.1 Stratégies couramment utilisées *58*
2.1.2 Adéquation nécessaire de la trajectoire d'usinage avec les capacités de la MOCN *59*
2.1.3 Stratégies émergeant grâce à l'amélioration des performances des MOCN *59*
2.2 Le treflage, une optimisation liee aux performances des MOCN 60
2.2.1 Principe de mise en œuvre et intérêts pour le vidage de poche *61*
2.2.2 Génération de trajectoires de tréflage optimisées *62*
2.2.2.1 Modèle de génération de trajectoires de tréflage 63
2.2.2.2 Optimisation du trajet de raccordement entre deux plongées 64
2.2.3 Implémentation sur MOCN : résultats expérimentaux *66*
2.2.3.1 Analyse des efforts de coupe 67
2.2.3.2 Aspects liés à la productivité 69
2.2.3.3 Propriétés géométriques des surfaces usinées 69
2.2.4 Définition d'une MOCN capable *70*
2.2.4.1 Mise en évidence de l'importance de la dynamique de la MOCN 71
2.2.4.2 Débit réel en fonction des capacités de la MOCN 72
2.2.4.3 Comparaison des performances des MOCN 74
2.2.5 Conclusions *80*
2.3 L'usinage trochoïdal, une reponse pour les cas d'usinage difficiles 81
2.3.1 Principe de mise en œuvre et intérêts pour le vidage de poche *81*
2.3.2 Génération de trajectoires trochoïdales optimisées *83*
2.3.2.1 Intérêt du format trochoïdal par rapport à l'interpolation circulaire 83
2.3.2.2 Génération d'une trajectoire exempte de discontinuités 85
2.3.3 Implémentation sur MOCN : Résultats expérimentaux *88*
2.3.3.1 Analyse des efforts de coupe 88
2.3.3.2 Aspects liés à la productivité 89
2.3.3.3 Propriétés géométriques des surfaces usinées 89
2.3.4 Définition d'une MOCN capable *90*
2.3.4.1 Capacités du DCN : format de description utilisé 90
2.3.4.2 Capacités cinématiques : optimisation du déroulement de la trajectoire 92
2.3.5 Conclusions *93*
2.4 Choix d'une strategie d'usinage adaptee aux contraintes 94
2.4.1 Simulation du débit réel pour le vidage de poche *94*
2.4.1.1 Présentation du modèle 94
2.4.1.2 Hypothèses formulées et limites du modèle proposé 96
2.4.1.3 Cas types étudiés 96

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

2.4.2 Adaptation à la géométrie de la poche *97*
2.4.2.1 Géométrie du profil de la poche 97
2.4.2.2 Hauteur de crête en finition 99
2.4.3 Adaptation aux moyens de fabrication *100*
2.4.3.1 Diamètre de l'outil d'ébauche 100
2.4.3.2 Performances cinématiques de la MOCN utilisée 101
2.4.4 Synthèse des résultats *103*
2.5 Conclusion 104

CHAPITRE 3. MOCN ET CHOIX DES PROCEDES : EMERGENCE DU FORMAGE INCREMENTAL 107

3.1 Presentation technico-economique du procede de Formage Incremental 110
3.1.1 Principe de mise en œuvre et principales problématiques *110*
3.1.2 Moyens nécessaires *113*
3.1.3 Aspects économiques et domaines d'application *115*
3.1.4 Programmation de la MOCN et capabilité du procédé *117*
3.2 Etude preliminaire a la mise en œuvre : modelisation des deformations 118
3.2.1 Simulation numérique de la déformation de la tôle *119*
3.2.2 Validation des résultats sur MOCN Verne *122*
3.2.3 Bilan des simulations *123*
3.3 Impact des trajectoires programmees sur la mise en œuvre du process 124
3.3.1 Efforts de formage *126*
3.3.2 Aspects de productivité *129*
3.3.3 Conformité des pièces formées *130*
3.3.4 Synthèse de l'étude expérimentale *136*
3.4 Optimisation du procede 137
3.4.1 Utilisation d'une tôle martyre *137*
3.4.2 Intérêts des MOCN cinq axes *138*
3.4.3 Programmation avancée par trajectoires ICAM *139*
3.4.4 Formage Positif : cas d'étude industriel *140*
3.5 Conclusions 141

CHAPITRE 4. PROGRAMMATION AVANCEE DE MOCN : CONCEPT DE TRAJECTOIRES ICAM 145

4.1 Limitations de la programmation actuelle des MOCN 145
4.1.1 Limitations liées au format ISO-6983 (codes-G) *145*
4.1.2 Limitations liées à la MOCN et à son DCN *147*
4.2 Methodes existantes pour ameliorer la programmation des MOCN 149
4.2.1 Méthodes prédictives *149*
4.2.2 Méthodes correctives *152*
4.2.3 Limites des méthodes actuelles *154*
4.3 Programmation avancee par trajectoires ICAM 156
4.3.1 Objectifs et bases de la méthode ICAM *156*

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

4.3.2 Estimation des efforts sur l'outil ... *157*
4.3.2.1 Calcul des couples d'usinage par les données du DCN ... 158
4.3.2.2 Calcul des efforts sur l'outil à l'aide de la géométrie de la MOCN ... 160
4.3.3 Optimisation des paramètres opératoires ... *166*
4.4 Mise en œuvre – Applications ... 170
4.4.1 Etude de faisabilité en Usinage ... *170*
4.4.2 Application au Formage Incrémental ... *173*
4.4.2.1 Estimation des efforts de formage ... 175
4.4.2.2 Optimisation des trajectoires de formage ... 177
4.5 Conclusions ... 179

CHAPITRE 5. EVOLUTIONS POUR LA PROGRAMMATION DES MOCN ... 183

5.1 Emergence d'applications orientees e-manufacturing ... 184
5.1.1 Contexte de l'e-manufacturing ... *184*
5.1.1.1 Précédentes opérations de contrôle à distance et dédiées e-manufacturing ... 184
5.1.1.2 Projet IRCCyN : réalisation d'un Atelier Virtuel ... 187
5.1.2 Pilotage à distance de la MOCN VERNE ... *188*
5.1.2.1 Interface multimédia mise en place ... 188
5.1.2.2 Scénarii et Réalisations ... 191
5.2 Les apports du format Step_NC pour la programmation des MOCN ... 194
5.2.1 Nouvelle conception de la chaîne numérique ... *194*
5.2.1.1 Lacunes de l'ISO 6983 ... 194
5.2.1.2 Apports généraux du format Step_NC ... 195
5.2.1.3 Projets de recherche initiés et développements actuels ... 200
5.2.2 Apports liés à la programmation des MOCN ... *203*
5.2.2.1 Vers la Programmation avancée de MOCN ... 203
5.2.2.2 Implantation de la méthode ICAM ... 207
5.2.3 Génération de trajectoires à motifs au format Step_NC ... *210*
5.2.3.1 Présentation du concept : application au tréflage et à l'usinage trochoïdal ... 211
5.2.3.2 Intégration au logiciel de génération de fichiers Step_NC PosSFP ... 217
5.2.3.3 Validation expérimentale de la démarche sur MOCN VERNE ... 221
5.3 Conclusions ... 223

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES ... 227

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ... 233

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Intérêts de l'UGV [Schulz1997] 24
Figure 2 : Défauts liés à l'interpolation linéaire pour l'usinage de surfaces gauches [Siemens2004] 28
Figure 3 : Compression des parcours d'outil [Siemens2004] 29
Figure 4 : Répartition des machines parallèles selon le nombre d'axes de déplacement [Weck2002] 33
Figure 5 : Exemples de machines à structure hexapode [Parallemic] 34
Figure 6 : Exemples de machines à structure Delta et Glide 35
Figure 7 : Exemple de mécanisme hybride, le Tricept [SMT] 36
Figure 8 : Schématisation du module parallèle de la MOCN VERNE 36
Figure 9 : Vue d'ensemble de la MOCN VERNE 37
Figure 10 : Calibration par mesures Ballbar 40
Figure 11 : Méthode de calibration par usinage d'une pièce [Chanal2006a] 41
Figure 12 : Pièce dédiée à l'identification et trajectoires d'usinage programmées [Chanal2007] 42
Figure 13 : Défaut de position du point piloté de l'outil [Chanal2006a] 42
Figure 14 : Géométrie de la pièce test 45
Figure 15 : Ecarts mesurés sur chacune des éprouvettes 47
Figure 16 : Relations entre les différents axes de recherche 50
Figure 17 : Stratégies d'usinage en contour parallèle et en zigzag 58
Figure 18 : Principe de l'usinage par tréflage 61
Figure 19 : Paramètres de définition d'une trajectoire de tréflage 61
Figure 20 : Exemples de trajets de tréflage générés 63
Figure 21 : Modèle de génération de trajectoires de tréflage pour un guide en zigzag 64
Figure 22 : Optimisation du trajet de prise de pas de tréflage 65
Figure 23 : Mesures d'efforts pour un cycle de tréflage 67
Figure 24 : Relevé d'efforts pour l'essai en zigzag 68
Figure 25 : Débit de copeaux associé à chaque stratégie 69
Figure 26 : Relevés de planéité sur le fond de poche usinée par tréflage 70
Figure 27 : Détail de l'outil de tréflage 70

Figure 28 : Exemple d'interface de l'outil de simulation développé 71
Figure 29 : Ecarts entre temps FAO et temps mesuré 72
Figure 30 : Modèle de calcul de débit en tréflage 73
Figure 31 : Surface retirée lors d'une plongée 74
Figure 32 : Performances de la MOCN VERNE pour une opération donnée de tréflage 76
Figure 33 : Comparatif des débits atteints pour le panel de MOCN testées 78
Figure 34 : Variations de la surface de débit 79
Figure 35 : Mouvement trochoïdal 82
Figure 36 : Exemple de trajectoire d'usinage trochoïdal 82
Figure 37 : Modèles circulaire et trochoïdal 84
Figure 38 : Comparaison des modèles circulaire et trochoïdal 84
Figure 39 : Exemples de trajets trochoïdaux générés 86
Figure 40 : Gestion des discontinuités de la courbe guide 86
Figure 41 : Prise de passe trochoïdale entre deux couches 87
Figure 42 : Relevés d'efforts de coupe sur une révolution trochoïdale 89
Figure 43 : Relevés de planéité du fond des poches usinées par stratégies trochoïdales 90
Figure 44 : Comparaison de deux MOCN pour l'implémentation de trajectoires trochoïdales 92
Figure 45 : Influence de la géométrie du profil de la poche 98
Figure 46 : Influence de la hauteur de crête en tréflage de finition 99
Figure 47 : Influence du diamètre de l'outil d'ébauche 100
Figure 48 : Comparaison de MOCN de capacités cinématiques différentes 101
Figure 49 : Performances cinématiques 102
Figure 50 : Exemple de pièce adaptée à une ébauche par tréflage 103
Figure 51 : Résultats avec une avance double en tréflage 104
Figure 52 : a. Exemple de matrice d'emboutissage - b. Martelage d'une pièce 108
Figure 53 : Exemples de revendications du brevet AMINO [Matsubara2000] 109
Figure 54 : Exemples de mise en œuvre du formage incrémental [Küttner2004; Pohlak2005] 110
Figure 55 : CLF du formage incrémental et de l'emboutissage [Park2003] 112
Figure 56 : Utilisation d'un outil de formage multi-têtes [Murata1999] 113
Figure 57 : Outil de formage rétractable [Ceretti2004] 114
Figure 58 : Exemples de pièces réalisées en formage positif avec les supports associés 114
Figure 59 : Machine AMINO dédiée au formage incrémental [Jeswiet2005b] 115
Figure 60 : Coûts estimés d'une pièce en formage incrémental et en emboutissage [Tuomi2004] 116
Figure 61 : Modélisation du formage positif 120
Figure 62 : Modélisation du formage négatif 120
Figure 63 : Modélisation de chargements successifs en formage négatif 121
Figure 64 : Dispositif expérimental 122

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Figure 65 : Mise en œuvre du procédé 125
Figure 66 : Géométrie de la pièce test 125
Figure 67 : Stratégies de formage testées 126
Figure 68 : Exemple de courbe d'effort de formage obtenue lors des essais 127
Figure 69 : Courbe d'effort caractéristique d'une pièce endommagée [Filice2006] 127
Figure 70 : Résultats des relevés d'efforts 128
Figure 71 : Mesures des temps de formage 129
Figure 72 : Points mesurés sur le plan inférieur 130
Figure 73 : Mise en évidence de la surface libre 131
Figure 74 : Mesures des défauts de profondeur 131
Figure 75 : Profil de surface d'une pièce formée 134
Figure 76 : Utilisation d'une tôle martyre 138
Figure 77 : Pyramide à double pente 138
Figure 78 : Montage de formage pour l'étude industrielle 140
Figure 79 : Démarche employée pour l'étude industrielle 141
Figure 80 : Du modèle CAO à la pièce réelle avec la programmation actuelle des MOCN 146
Figure 81 : Comparaison des vitesses d'avances programmées et mesurées [Dugas2002] 148
Figure 82 : Influence de l'erreur de poursuite 148
Figure 83 : Programmation optimisée de MOCN par méthode prédictive 149
Figure 84 : Compensation de trajectoires par modification de l'engagement de l'outil [Seo1998] 150
Figure 85 : Optimisation de l'avance programmée après simulation de l'avance réelle 151
Figure 86 : Programmation optimisée de MOCN par méthode corrective 152
Figure 87 : Table dynamométrique Kistler avec un exemple de relevé d'effort de coupe 153
Figure 88 : Principe de la méthode de programmation par trajectoires ICAM 156
Figure 89 : Principe d'estimation du couple d'usinage par méthode ICAM 158
Figure 90 : Exemple d'estimation du couple d'usinage sur un axe 159
Figure 91 : Efforts appliqués au système {outil, module parallèle, chariots} 161
Figure 92 : Modélisations des efforts sur le module parallèle 161
Figure 93 : Points particuliers de la structure de la MOCN VERNE 163
Figure 94 : Estimation des efforts sur l'outil à partir des couples d'usinage sur la MOCN VERNE 165
Figure 95 : Démarche générale d'estimation des efforts sur l'outil 165
Figure 96 : Exemples d'optimisation de la programmation 166
Figure 97 : Adaptation de la vitesse d'avance par méthode ICAM 168
Figure 98 : Optimisation de la vitesse d'avance suite à une variation de la profondeur de passe 169
Figure 99 : Rainure test et dispositif expérimental 171
Figure 100 : Relevés de couples pour la validation expérimentale 171
Figure 101 : Comparaison des relevés d'efforts du DCN et du dynamomètre 172

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Figure 102 : Exemple de consigne d'avance par méthode ICAM pour l'exemple traité 172
Figure 103 : Dispositif expérimental 175
Figure 104 : Comparaison des relevés d'efforts pour l'essai d'indentation 176
Figure 105 : Trajectoire de formage pour le second test 176
Figure 106 : Relevés d'effort pour l'essai de parcours circulaire 176
Figure 107 : Adaptation de la trajectoire par modification de la jauge outil 178
Figure 108 : Adaptation de la trajectoire par appel d'une sous-routine de dégagement 179
Figure 109 : L'opération Lindbergh [IRCAD2001] 185
Figure 110 : Principe du projet de contrôle à distance de MOCN 188
Figure 111 : Interface de commande de la caméra et exemple de capture 189
Figure 112 : Interface ReachOut® sur le poste client 190
Figure 113 : Interface de pilotage à distance mise en place 191
Figure 114 : Scénario utilisé lors de la 23e Biennale de la Machine Outil de Bilbao 192
Figure 115 : Scénario type d'e-expertise avec modification du programme ISO 193
Figure 116 : Scénario utilisé lors de l'échange avec l'Université de Pohang 193
Figure 117 : Architecture de la chaîne numérique actuelle 195
Figure 118 : Organisation de la norme ISO 14649 et relations avec l'ISO 10303 196
Figure 119 : Exemples de protocoles d'applications de la norme Step 197
Figure 120 : Comparaison de l'ISO 6983 et de l'ISO 14649 [ESPRIT2000] 197
Figure 121 : Structure d'un fichier Step_NC [ESPRIT2000] 198
Figure 122 : Organisation d'un fichier Step_NC en express-G 198
Figure 123 : Scénario type d'utilisation de la plateforme de POSTECH [POSTECH2003] 202
Figure 124 : Cas d'étude d'usinage d'une pièce flexible 204
Figure 125 : Programmation avancée de niveau 1, approche conventionnelle 204
Figure 126 : Programmation avancée de niveau 2 205
Figure 127 : Approches de programmation avancée de niveau 2 205
Figure 128 : Programmation avancée de niveau 3 206
Figure 129 : Programmation avancée de niveau 4 206
Figure 130 : Approche ICAM à l'aide du format ISO 6983 207
Figure 131 : Exemple de trajectoire discrétisée pour employer l'approche ICAM 208
Figure 132 : Implantation progressive d'une programmation Step_NC avancée 209
Figure 133 : Trajectoire trochoïdale à motifs 211
Figure 134 : Exemple de motif trochoïdal 211
Figure 135 : Motifs de tréflage et exemples de combinaisons 212
Figure 136 : Paramétrage du trajet de raccordement entre deux plongées 212
Figure 137 : Exemples de trajectoires à motifs 213
Figure 138 : Intégration des trajectoires à motifs dans l'AP-238 de la norme ISO 10303 214

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Figure 139 : Description et organisation des entités de trajectoires à motifs 215
Figure 140 : Utilisation de plusieurs motifs pour une même poche 217
Figure 141 : Principe de fonctionnement du logiciel PosSFP [Suh2003] 218
Figure 142 : Nouvelles fenêtres de choix de la stratégie d'usinage 219
Figure 143 : Fonctionnement de l'interpréteur IRCCyN 220
Figure 144 : Exemples de trajectoires générées par l'interpréteur 221
Figure 145 : Scénario de la validation expérimentale du DCN Step_NC 222

Tableaux

Tableau 1 : Mesure des temps d'usinage sur chaque machine 45
Tableau 2 : Résultats de mesure d'une pièce 46
Tableau 3 : Conditions de coupe utilisées pour les essais de tréflage 67
Tableau 4 : Efforts relevés pour chaque essai 68
Tableau 5 : Performances cinématiques du panel de MOCN testées 78
Tableau 6 : Conditions de coupe utilisées pour les essais d'usinage trochoïdal 88
Tableau 7 : Formats de description disponibles 91
Tableau 8 : Paramètres du modèle de comparaison des stratégies d'usinage 95
Tableau 9 : Valeurs des paramètres pour les cas types étudiés 97
Tableau 10 : Valeurs de paramètres relevées dans les différents travaux 118
Tableau 11 : Valeurs des paramètres pour chaque essai 125
Tableau 12 : Notations employées pour le module parallèle 160
Tableau 13 : Principaux acteurs travaillant sur le standard Step_NC 201
Tableau 14 : Comparaison des modèles d'application de Step_NC [Xu2005] 203
Tableau 15 : Comparaison de fichiers ISO 6983 et ISO 10303-AP238 216

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Abréviations

APT :	Automatic Programmed Tools
CAO :	Conception Assistée par Ordinateur
CFAO :	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
CLF :	Courbe Limite de Formage
DCN :	Directeur de Commande Numérique
ERP :	Enterprise Resource Planning (Logiciel de Gestion d'Entreprise)
FAO :	Fabrication Assistée par Ordinateur
ICAM :	Intelligent Computer Aided Manufacturing
ISO :	International Standard Organisation
MMT :	Machine à Mesurer Tridimensionnelle
MOCN :	Machine Outil à Commande Numérique
NTIC :	Nouvelles Technologie de l'Information et de la Communication
PKM :	Parallel Kinematics Machine (Machine à structure parallèle)
PPAO :	Planification de Procédés Assistée par Ordinateur
SKM :	Serial Kinematics Machine (Machine à structure sérielle)
UGV :	Usinage à Grande Vitesse
VNC :	Virtual Network Computing (Logiciel de contrôle à distance)
XML :	Extensible Markup Language

Sigles relatifs à la norme STEP (ISO 10303)

AIM :	Application Interpreted Model (Modèle d'application interprété)
AP :	Applicaton Protocol (Protocole d'application)
ARM :	Application Reference Model (Modèle d'application de référence)
STEP :	STandard for the Exchange of Product model data

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Introduction

Contexte

Les évolutions économiques récentes ont conduit à un besoin croissant en produits manufacturés. De nouveaux acteurs ont également fait leur apparition dans le secteur de la fabrication mécanique. Grâce à l'emploi d'une main d'œuvre à bas coût et à des frais de transport ayant une part faible dans le coût total de nombreux produits, des entreprises situées en Asie ou en Europe de l'Est se positionnent désormais en tant que concurrents directs de celles des pays dits « industrialisés » d'Amérique du Nord et d'Europe de l'Ouest.

Afin de préserver des avantages technico-économiques forts, ces dernières ont adopté plusieurs stratégies. Certains industriels ont par exemple choisi, à tort ou à raison, de délocaliser la majeure partie de leur production pour venir s'implanter dans ces pays émergents. Cette situation est particulièrement vraie dans les secteurs de production de masse ou à faible valeur ajoutée. D'autres ont choisi de changer de domaine d'activité pour basculer dans des productions de types personnalisés et employant des moyens de fabrication innovants. Si ce positionnement permet de conserver un avantage technologique indéniable et donc de maintenir le seuil de compétitivité de l'entreprise, il nécessite de disposer de procédés de fabrication offrant un compromis optimal en termes de productivité, de coûts de mise en œuvre et de capabilité.

Dans ce contexte, l'usinage à grande vitesse a constitué un saut technologique important ; il offre en effet la possibilité de diminuer drastiquement les temps de production et d'augmenter la capabilité des moyens associés. Parmi les nombreuses innovations liées aux applications UGV, l'émergence et le développement des MOCN à structure parallèle visent à répondre aux besoins toujours croissants en termes de performances cinématiques. Toutefois, celles-ci ne sont à l'heure actuelle que peu répandues dans les ateliers industriels, bien que des études aient démontré leur capabilité. Cela provient principalement du fait que ces MOCN demandent des

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

approches d'optimisation spécifiques à leur comportement original en usinage (en comparaison de leurs consœurs sérielles). Loin d'être un handicap, ce comportement original ouvre la voie à de nouvelles solutions technologiques innovantes relatives à la mise en œuvre de moyens de fabrication. Il faut pour cela proposer de nouvelles approches d'optimisation en tenant compte de la nouvelle donne induite par ces moyens. Parmi elles, la programmation joue un rôle fondamental.

Contributions

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le contexte de la programmation des MOCN. Notre objectif principal est d'explorer les voies d'optimisation associées à l'emploi de moyens de fabrication innovants, comme les MOCN parallèles, ceci sans se restreindre à un procédé donné. L'esprit des développements menés est donc de proposer des approches de programmation adaptée aux performances du moyen de fabrication utilisé et aux contraintes associées à l'application déployée. Nous avons pour cela identifié quatre axes de recherche portant sur :

- une nouvelle approche de la programmation des trajectoires d'usinage,
- une extension de la programmation des MOCN à un procédé émergent,
- une nouvelle approche de programmation avancée des MOCN,
- des perspectives d'évolution pour programmation des moyens de fabrication.

La corrélation des travaux menés dans le contexte de chaque axe de recherche nous confère une vision transversale multi-procédés, nous permettant ainsi de faire émerger le potentiel des machines à structure parallèle comparativement aux machines sérielles.

Plan de lecture

Au cours du chapitre 1, nous définissons le contexte général de nos travaux, en insistant sur les aspects de programmation des moyens de fabrication. Nous présentons également les principales architectures parallèles mises au point pour des applications d'usinage dans le but de montrer la variété des solutions technologiques proposées. Par la suite, les problématiques de programmation associées à la mise en œuvre de ces moyens de fabrication sont illustrées grâce à une étude expérimentale.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Nous introduisons enfin les axes de recherche développés dans le cadre de nos travaux.

Le chapitre 2 s'inscrit dans un contexte de préparation des opérations de fabrication et évalue les performances de nouvelles stratégies d'usinage (tréflage et usinage trochoïdal) destinées à des applications sur MOCN parallèles et qui répondent à des besoins spécifiques. Les objectifs principaux sont d'une part de déterminer une stratégie d'usinage adaptée aux contraintes de production et au moyen de production employé ; d'autre part, il s'agit de développer des outils de simulation destinés à la définition d'une MOCN capable au regard d'une application donnée. Nous nous appuyons pour cela sur des résultats d'outils de simulation développés dans cette optique et sur des expérimentations sur machine parallèle. Nous montrons par ce biais la nécessité de choisir une stratégie d'usinage en fonction des caractéristiques du moyen de fabrication utilisé.

Le chapitre 3 traite, quant à lui, de la mise en œuvre de procédés émergents sur MOCN. Nous nous focalisons sur la réalisation d'opérations de formage incrémental, procédé de mise en forme de pièces de tôlerie. Il est pertinent de profiter de l'expérience acquise en usinage afin de proposer des optimisations d'implémentation de ce procédé, en particulier en termes de capabilité. Nous avons ainsi étudié l'impact des parcours d'outil sur la mise en œuvre pour ensuite proposer des pistes d'optimisation basées sur la programmation des trajectoires de formage. Nous montrons ainsi que la programmation des trajectoires d'outils doit s'adapter au procédé choisi, c'est-à-dire à l'application implémentée. De la même manière, la capabilité de ce procédé est fonction des propriétés de la MOCN employée, le recours à une machine à structure parallèle, étant donné ses capacités cinématiques et les caractéristiques du DCN implanté, peut donc être d'un intérêt particulier pour le déploiement d'applications de formage incrémental.

Par conséquent, nous proposons au cours du chapitre 4 une nouvelle méthode de programmation avancée des MOCN destinée à l'adaptation en ligne des parcours d'outil à partir de l'évaluation de données process. Nous nous basons sur les informations collectées par le DCN en cours de fabrication. Cette approche de programmation avancée, appelée méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing), optimise la programmation de la MOCN en fonction du comportement réel lors du process (usinage, formage, ...). Elle se veut générique car elle n'est pas dédiée à un procédé de fabrication particulier. Nous exposons ainsi ses

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

performances pour des opérations de fraisage et pour des opérations de formage incrémental, ce qui inscrit notre démarche dans la continuité des chapitres 2 et 3.

Le chapitre 5 de ce manuscrit s'attache aux évolutions à moyen terme pour la programmation des MOCN et se focalise sur deux approches dont les machines parallèles vont pouvoir bénéficier tout particulièrement. La première approche concerne le développement d'applications orientées e-manufacturing conduisant à de profondes mutations de l'environnement des MOCN et de leur emploi. Nous avons ainsi mis en place une plateforme de pilotage à distance de la MOCN parallèle du laboratoire et réalisé avec succès des actions d'e-learning, e-expertise et e-marketing. La seconde évolution traite du nouveau standard de programmation Step_NC. Nous montrons ses performances en proposant une démarche d'implantation progressive de programmation Step_NC avancée des MOCN, dans la lignée du chapitre 4. De plus, une nouvelle approche de programmation au format Step_NC par la définition de trajectoires à motifs est développée, expérimentée et validée. Cette dernière action, réalisée en collaboration avec l'équipe de recherche du Pr. Suh de l'université de Pohang (Corée du Sud), participe aux travaux du comité international ISO TC184/SC4, chargé de définir et de normaliser les standards Step_NC.

Nous concluons enfin sur les apports relatifs à chaque axe de recherche et présentons les perspectives qu'ouvrent ces travaux.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Chapitre 1. Les Machines Outils à Commande Numérique

Ce premier chapitre a pour but de poser le cadre de nos travaux et d'introduire les axes de recherche que nous allons suivre dans ce manuscrit. Nous présentons dans un premier temps les évolutions du secteur fabrication dues à l'essor d'applications d'usinage à grande vitesse, en mettant l'accent sur les avancées observées en termes de programmation des MOCN. Ces dernières, nécessaires à la mise en œuvre performante d'opérations d'usinage à grande vitesse, ont été rendues possibles par le déploiement d'une nouvelle génération de directeurs de commande numérique. En outre, ces évolutions technologiques ont permis de repenser la conception des MOCN pour aller chercher de nouvelles performances. Elles ont ainsi conduit à l'émergence de machines à structure parallèle.

Nous décrivons dans une seconde partie différentes architectures de MOCN à structure parallèle destinées à des applications d'usinage à grande vitesse dans le but de montrer la variété des solutions adoptées par leurs concepteurs. Par conséquent, chacune d'entre elles présente un comportement spécifique et possède ses propres domaines de performance. Néanmoins, une contrainte commune à toutes les machines outils parallèles réside dans l'obligation de recourir à des protocoles de calibration de leur structure pour leur assurer un niveau de capabilité suffisant. Nous nous attacherons donc à présenter deux méthodes mises en œuvre sur la MOCN parallèle VERNE de l'IRCCyN, afin d'en montrer les enjeux. Nous proposons, par la suite, les résultats d'une étude comparative d'usinage menée sur deux MOCN, l'une parallèle, l'autre sérielle, destinée à illustrer les problématiques liées à la programmation des moyens de production actuels que nous avons identifiées, en particulier pour les MOCN parallèles.

Enfin, la troisième partie de ce chapitre présente les axes de recherche ; ils visent tous à mettre en place une programmation de la MOCN adaptée à ses performances cinématiques et à l'application implémentée.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

1.1 Evolutions liées à l'introduction de l'UGV dans les entreprises

1.1.1 Présentation de l'UGV

Résultat de la conjugaison d'avancées technologiques diverses concernant les outils, les broches, les moteurs et les calculateurs numériques, l'Usinage Grande Vitesse (UGV) a permis au secteur manufacturier de franchir un palier important. En effet, la fabrication de pièces en utilisant des conditions de coupe dites « UGV », confère de nombreux avantages en améliorant la conformité des pièces produites et en diminuant les temps et les coûts de production ; l'UGV est ainsi devenu une réalité industrielle depuis la fin des années 1990. Les principaux avantages relatifs à chacun de ces critères technico-économiques sont donnés sur la Figure 1 [Schulz1997].

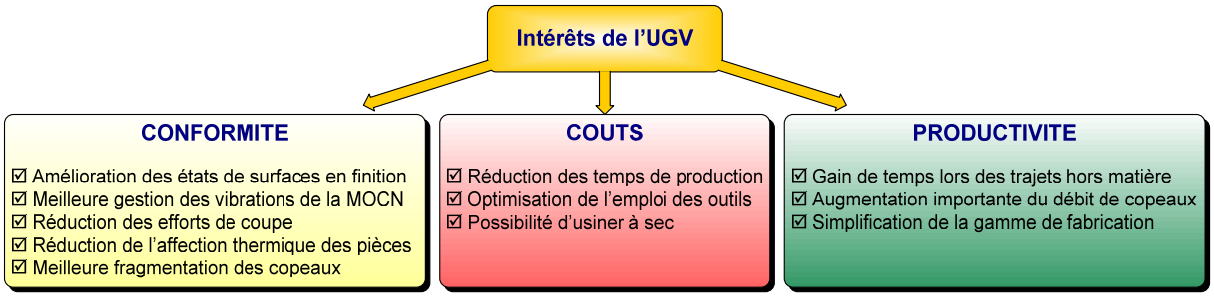


Figure 1 : Intérêts de l'UGV [Schulz1997]

Les intérêts étant nombreux et variés, l'UGV a trouvé ses premières applications privilégiées dans trois secteurs industriels majeurs, tous soumis à des contraintes technico-économiques fortes : l'aéronautique, l'automobile et l'industrie du moule [Dugas2002].

En effet, les pièces aéronautiques sont caractérisées par des taux d'enlèvement de matière allant jusqu'à 95%. Il était donc crucial de disposer de techniques de production offrant des débits élevés. De plus, la fabrication de voiles minces étant fréquente, la réduction des efforts de coupe ainsi que la maîtrise des vibrations sont donc très importantes. Le secteur automobile est, quant à lui, caractérisé par de fortes cadences de production et de nombreux changements d'outil. Le défit à relever se situe donc dans la diminution des temps d'usinage et dans l'optimisation des trajets hors matière. Enfin, la production de moules et de matrices donne lieu à des pièces aux surfaces complexes et présentant des temps d'usinage très longs. La mise en œuvre d'application UGV a permis non seulement une diminution drastique des

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

temps de production, en particulier pour la réalisation des ébauches, mais aussi une simplification de la gamme de fabrication (réduction ou suppression des opérations de superfinition par rectification ou par polissage).

Néanmoins, la mise en œuvre d'opérations d'UGV s'accompagne d'un certain nombre de contraintes auxquelles il faut se soumettre pour bénéficier des performances visées. Celles-ci concernent tant les moyens de production (outils, machines, DCN, logiciels, ...), que l'organisation de la production (formation des personnels, gestion des flux, ...), ce qui entraîne des coûts d'équipement et de mise en œuvre nécessairement plus élevés. Cette situation explique aussi que ce sont les secteurs de pointe énoncés précédemment qui se sont les premiers dotés de technologies UGV.

1.1.2 Evolutions de la fonction Fabrication dans l'entreprise

1.1.2.1 Organisation de la production

La mise en place de technologies d'Usinage à Grande Vitesse s'accompagne d'importantes modifications dans l'organisation du secteur fabrication des entreprises de production mécanique. En effet, pour tenir les promesses faites par l'UGV en termes de temps de fabrication et de capabilité des MOCN, l'ensemble de la production doit subir une réorganisation [Sofotec2000]. Ainsi, une meilleure gestion des flux et des stocks est indispensable, étant donné le raccourcissement des temps d'usinage. Il faut également mettre en place des liens plus étroits entre le bureau d'étude, chargé de la conception des produits, et le bureau des méthodes, chargé de leur industrialisation. En effet, certains choix de conception peuvent pénaliser grandement la productivité lors de la fabrication d'un produit. A l'inverse, un expert en fabrication peut aider le concepteur à définir des solutions permettant d'optimiser la fabrication des produits [Martin2001].

De plus, si les gammes de fabrication sont simplifiées car plusieurs opérations peuvent être réalisées sur une même MOCN (en usinage cinq axes par exemple), les moyens de fabrication, eux, sont plus complexes ; ils nécessitent une maintenance accrue et une formation spécifique du personnel pour être employés de façon appropriée. De la même manière, lors de la planification des tâches, le choix du moyen de fabrication optimal n'est pas immédiat. Il faut bien sûr sélectionner un équipement capable de réaliser les produits selon les spécifications imposées mais également veiller à répartir les charges de travail lors de l'ordonnancement et la définition des gammes de fabrication. Si les produits sont variés ou fabriqués en

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

petites séries, il faut savoir être flexible pour passer rapidement d'un type de production à un autre.

Au final, les entreprises de fabrication industrielle sont confrontées à un marché très concurrentiel qui exige flexibilité, réduction des délais et des coûts et une augmentation des performances. Si l'intégration de moyens de fabrication UGV est une réponse quasi-obligatoire à cette situation, elle entraîne cependant des évolutions fortes de l'environnement de production, ce qui augmente les coûts d'équipement, de formation et de maintenance.

1.1.2.2 Programmation des MOCN

La programmation des MOCN est un secteur qui a beaucoup évolué avec le développement des technologies UGV. Il a su notamment tirer profit des développements des outils de CAO, avec en particulier l'apparition des modeleurs 3D. Ainsi, il est difficile de se passer d'un logiciel de FAO pour programmer les trajectoires d'usinage. Ceci est d'autant plus vrai pour les usinages cinq axes continus.

Si les nouveaux outils développés sont très performants, leur maîtrise nécessite des compétences spécifiques de la part des programmeurs. La définition d'un parcours d'outil optimal passe en effet par une connaissance des capacités de l'architecture et des caractéristiques cinématiques de la MOCN utilisée ainsi que des capacités de calcul de son DCN. Le parcours le plus court n'est pas nécessairement le plus productif, du fait des ralentissements des axes aux discontinuités géométriques [Pateloup2005]. Un certain nombre de critères informels entrent en jeu dans le choix des stratégies utilisées. Pour les opérations d'ébauche, le programmeur fait appel à ses compétences et à son expérience pour définir la meilleure stratégie d'usinage, c'est-à-dire celle qui rendra les meilleurs résultats en termes de coûts de production, de temps de fabrication et de conformité.

Ensuite, lors de la mise en œuvre d'une nouvelle production, s'appuyant sur un nouveau programme d'usinage, il est quasiment impossible de détecter les erreurs de programmation en cours d'exécution du programme. Etant donné l'importance des vitesses et des accélérations employées, une erreur dans les trajets hors matière (collision avec le porte-pièce, erreur de jauge outil) devient vite critique et a des conséquences économiques qui peuvent aller d'un simple bris d'outil à l'arrêt complet de la production sur la MOCN concernée. Par conséquent, les programmes d'usinage doivent être vérifiés et validés avant d'être utilisés en fabrication. Une solution simple consiste à les exécuter en vitesse lente sur la machine outil concernée, mais les temps

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

d'immobilisation de la machine deviennent vite prohibitifs (en particulier dans le cas de petites séries).

Des outils de validation des programmes par simulation ont donc été développés (NC SIMUL®, VERICUT®,...). Leur objet est de lire le contenu des programmes et de simuler les mouvements résultants des axes de la MOCN après avoir au préalable modélisés ses éléments. Il est ainsi possible de détecter et corriger hors ligne les erreurs de programmation. Ces avantages s'accompagnent néanmoins de certaines contraintes : des compétences spécifiques sont nécessaires à leur utilisation et une maintenance stricte est exigée afin de rendre compte de la situation d'usinage réelle (géométrie et positionnement des divers éléments). Néanmoins, les outils de simulation montrent également certaines limitations ; comme tout modèle, ils ne peuvent tenir compte de toute la complexité d'une situation réelle, si bien que dans certains cas, l'image rendue n'est pas fidèle à la réalité. Ces outils ne permettent malheureusement pas de se prémunir de l'ensemble des erreurs de programmation.

Au final, les contraintes de programmation deviennent de plus en plus spécifiques. Lors de la définition des parcours, il faut systématiquement garder à l'esprit le type d'application visé ainsi que les capacités des moyens de production employés.

1.1.3 Capacités des DCN actuels

Les concepteurs de Directeurs de Commande Numérique (DCN) ont su profiter des progrès de l'informatique et de l'automatique pour répondre aux diverses contraintes liées à l'Usinage Grande Vitesse. Les tâches à réaliser étant de plus en plus complexes, la puissance de calcul de DCN a été augmentée pour pouvoir exécuter les calculs requis. Nous nous intéresserons plus particulièrement à trois avancées notables liées aux formats de description des trajectoires, à l'optimisation du comportement cinématique des axes de déplacement et à l'augmentation des capacités de communication et d'acquisition de données du process.

1.1.3.1 Nouveaux formats de description de trajectoires

Les opérations de finition nécessitent l'emploi de trajectoires d'outil adaptées aux morphologies de la surface à produire. Par conséquent dans le cas de surfaces gauches, la programmation par interpolations linéaire et circulaire n'est plus suffisante : le respect des intervalles de tolérances est obtenu au dépend de la productivité. En effet, celles-ci provoquent des échelons d'accélération des axes de la MOCN aux transitions entre les blocs de programmes lors du passage des points de

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

discontinuité. Ce qui conduit à de fortes variations de vitesse d'avance. Cette situation pénalise le comportement de la MOCN, en particulier au niveau de ses asservissements, ce qui est source de défauts. On peut ainsi observer une facettisation de la surface (ce phénomène ne traduisant cependant pas systématiquement le non respect des tolérances), la présence de vibrations voire une combinaison de ces deux phénomènes, comme illustré par la Figure 2 [Siemens2004].

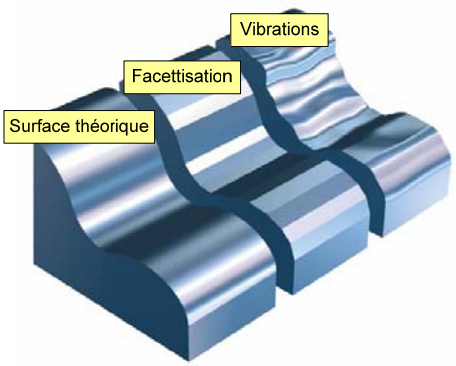


Figure 2 : Défauts liés à l'interpolation linéaire pour l'usinage de surfaces gauches [Siemens2004]

Pour pallier ces défauts, les DCN autorisent désormais la programmation des parcours d'outil à l'aide de formats de description plus élaborés, les splines, les Nurbs ou l'interpolation polynomiale. Ces formats permettent de réaliser des surfaces complexes conformes au modèle CAO sans pénaliser le temps d'exécution car elles sont basées sur des modèles mathématiques de classe C^2, c'est-à-dire offrant une courbe de consigne d'accélération continue [Langeron2004].

Pour autant, l'augmentation du degré de continuité des courbes de définition des parcours d'outil peut également poser des problèmes. Ainsi, l'emploi de courbe d'usinage de classe C^3 suppose des variations continues du jerk. Or, pour une majorité de MOCN, le pilotage des axes se base sur un modèle de commande par échelon de Jerk. Ce paramètre ne peut prendre que trois valeurs $\{-J_{réglé}, 0, +J_{réglé}\}$. Par conséquent, le comportement cinématique de la MOCN se voit dégradé malgré la continuité, théorique, de la trajectoire.

En outre, le recours à ces formats complique fortement la génération des trajectoires, ce qui implique la maîtrise de compétences supplémentaires au niveau de la programmation [Duc2002; Affouard2004; Langeron2004]. De plus, en usinage cinq axes continus, la transformation dans l'espace articulaire de l'orientation de l'outil est plus ou moins optimale selon l'architecture de la MOCN.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

1.1.3.2 Optimisation du comportement cinématique de la machine

Des avancées ont également été réalisées concernant le comportement cinématique des MOCN en usinage [Pateloup2005]. Grâce à l'utilisation de calculateurs performants, les DCN récents proposent des fonctions de compression qui regroupent les blocs de programmes codés par interpolation linéaire pour ensuite redéfinir la trajectoire à l'aide de splines (Figure 3). Il en résulte un parcours d'outil plus fluide qui peut être exécuté plus rapidement en générant moins d'à-coups et de ralentissements d'axes. Ainsi, selon le compacteur choisi, il est possible de privilégier l'état de surface, le temps d'exécution ou la fluidité de déplacement des axes. Le recours à ces fonctions est donc essentiel pour optimiser le comportement cinématique des axes de la MOCN lors de l'exécution d'un programme d'usinage, et tout particulièrement dans le cas d'interpolations circulaires et linéaires. Il faut pourtant rester vigilant quant à l'utilisation de ces compresseurs et de leurs paramètres car leur performance dépend du type de trajectoire utilisée et les valeurs de leurs paramètres ne sont pas évidentes à déterminer a priori.

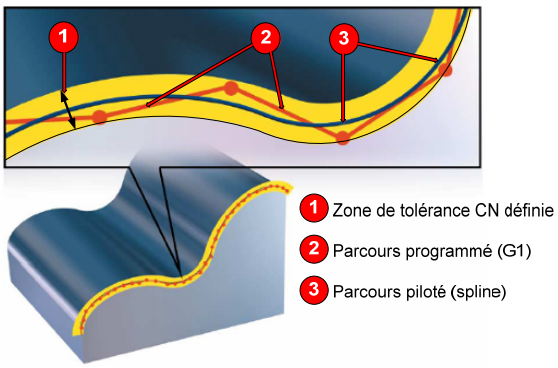


Figure 3 : Compression des parcours d'outil [Siemens2004]

D'autres fonctions d'optimisation des mouvements d'axes ont également été mises au point. Elles permettent de déterminer la manière de franchir les discontinuités géométriques des trajectoires, de redéfinir les valeurs de Jerks programmé et d'accélération maximale autorisée sur chaque axe en cours d'exécution de programme ou le mode de pilotage de l'orientation de l'outil en usinage cinq axes [Siemens2004].

Au final, les DCN actuels présentent une large palette de fonctions d'optimisation du comportement cinématique des MOCN ; l'objectif est d'adapter au mieux les trajectoires à l'architecture de la machine outil et à la morphologie de la pièce à fabriquer. Malgré tout, il est assez ardu lors de la génération des parcours d'outil et de leur exécution sur MOCN de choisir les paramétrages optimaux parmi la

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

foule de fonctions proposées par les éditeurs de solutions FAO et les intégrateurs de DCN. L'utilisation efficace de ces outils nécessite en effet une bonne connaissance des moyens de production, de solides compétences de programmation ainsi qu'un certain nombre de validations expérimentales.

1.1.3.3 Communications – Acquisition de données process

Le développement de la science des réseaux et l'intégration aux DCN de protocoles standards de type Ethernet ont grandement simplifié l'accès aux machines outils. Alors que précédemment une liaison physique fil à fil était obligatoire entre le DCN et le serveur dédié à la communication avec les interfaces CFAO, l'architecture actuelle permet de communiquer et d'échanger fichiers et informations de manière rapide et souple. La MOCN (identifiée à l'aide d'une adresse IP) peut devenir un composant standard du réseau interne de l'Entreprise, moyennant bien sûr le respect de certains protocoles de sécurité. Cette situation véhicule de nombreux avantages pour la gestion et la maintenance du parc machines, comme par exemple la possibilité de vérifier à distance l'état de la MOCN, de mettre à jour les jauges outil ou d'ajouter de nouveaux programmes de fabrication.

Du fait de leur connexion avec les automates de commande des axes des machines, les DCN ont également accès à de nombreuses données liées au process de fabrication [Siemens2006], comme par exemple la puissance électrique consommée ou la température dans la broche, ... Bien que vitales pour le bon déroulement d'un usinage, ces données sont peu exploitées en programmation à l'heure actuelle.

1.1.3.4 Bilan

Les DCN ont subi de fortes évolutions depuis l'émergence de l'UGV. Ceux-ci ont dû répondre aux diverses contraintes posées par l'emploi de vitesses de rotation et de vitesses d'avance élevées afin d'optimiser les mouvements des axes en fonction de la structure de la MOCN. Les concepteurs de DCN ont su tirer profit des progrès observés en informatique et en science des réseaux pour permettre l'intégration des machines outils dans leur environnement de production. Comme nous le verrons plus loin, c'est notamment grâce aux nouveaux potentiels des DCN que les MOCN à structure parallèle ont pu être développées. La commande de ces mécanismes fait en effet appel à un modèle de transformation géométrique destiné à la traduction des trajectoires programmées en instructions d'accélération, vitesse et position de chaque axe de déplacement. L'exécution de ces transformations par le DCN ne devant pas pénaliser l'exécution du programme de fabrication, il faut donc qu'il dispose de la

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

puissance de calcul nécessaire à la réalisation de ces opérations de traduction en parallèle des autres actions de commande et de pilotage.

De plus, en proposant de nombreuses fonctions d'optimisation, les fabricants insistent sur le fait de transférer un maximum d'intelligence au niveau du DCN, pour que la plupart des choix soient effectués en aval du post-processeur, en fonction de l'architecture et des capacités réelles de la MOCN. Si cette démarche s'avère indispensable avec la diversification actuelle des moyens de production, il est difficile de faire la part des choses entre les fonctionnalités réellement efficaces et celles relevant purement de considérations « commerciales ». Il est toutefois certain que les DCN actuels ne déploient pas la totalité de leurs performances, en particulier dans le cadre de la programmation.

Toutefois, si puissant que soit le DCN implanté, la performance réelle d'une MOCN résulte de la combinaison harmonieuse des caractéristiques individuelles de chacun de ses éléments constitutifs. Les évolutions liées à l'Usinage Grande Vitesse ne se sont par conséquent pas limitées à la commande des MOCN ou la définition des trajectoires d'outil ; tous les composants des machines outils ont dû s'adapter aux contraintes découlant de l'emploi de fortes vitesses de coupe et d'avance.

1.1.4 Machines outils à Commande Numérique

1.1.4.1 Adaptation des machines outils à leur domaine d'application

Les composants principaux d'une machine outil ont connu des avancées technologiques importantes à la fin des années 1990. On peut citer par exemple le développement de broches à paliers magnétiques, de moteurs linéaires pour les axes de déplacement, de matériaux et de géométries spécifiques d'arêtes de coupe [Abele2007]. La structure des MOCN a aussi dû être reconçue pour aboutir à des bâtis rigides capables de supporter les fortes accélérations lors des changements de direction sans générer de vibrations, ainsi qu'à des carters offrant la protection requise lors de bris d'outil.

Toutefois, il n'est pas nécessaire pour une MOCN dédiée à l'UGV de cumuler l'ensemble des dernières technologies de composants pour être opérationnelle dans un contexte de production industrielle, essentiellement pour des raisons économiques. Ainsi, un certain nombre de machines outils à structure parallèle s'appuient toujours sur des moteurs vis à bille, l'architecture de ces machines leur permettant malgré tout de proposer des performances cinématiques élevées. A l'inverse, lors de la définition du cahier des charges d'une MOCN, il appartient en priorité de définir son domaine

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

d'application pour déterminer les performances technico-économiques optimales. Pour cause, étant donné la variété de solutions technologiques possibles, la meilleure machine outil n'existe plus et toute caractéristique doit être évaluée en rapport avec le type d'application visé (morphologie de pièces, matériaux à usiner, tailles de lots, ...).

1.1.4.2 Emergence des MOCN parallèles

Les travaux de recherche menés sur les architectures de machines outils ont conduit à l'émergence de MOCN à structure parallèle. L'idée associée a été de pouvoir proposer des performances cinématiques importantes (vitesse, accélération), en allégeant les masses en mouvement. Pour cela, il a fallu tirer profit du développement des performances des DCN pour assurer la gestion d'un modèle de transformation géométrique complexe en parallèle du pilotage des divers composants de la machine outil. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les principales architectures parallèles développées pour des applications d'UGV, dans le but de montrer la variété de solutions technologiques proposées, bien que l'objectif soit le même, à savoir proposer de fortes capacités cinématiques. Cette variété induit la définition de domaines d'application privilégiés propres à chaque machine. Malgré tout, les MOCN parallèles font toutes appel à des protocoles de calibration pour assurer et améliorer leur capabilité, ceux-ci visent également à l'adaptation des performances de la MOCN parallèle au type d'application mis en œuvre. Nous étudierons donc deux méthodes de calibration déployées sur la MOCN parallèle VERNE de l'IRCCyN.

1.2 MOCN parallèles : une réponse aux contraintes technico-économiques

Les manipulateurs parallèles ont déjà fait leurs preuves pour des applications de chirurgie ou de simulation de vol. Dans le domaine industriel, ils réalisent efficacement des tâches de manutention (« pick and place ») ou d'assemblage. On exploite pour cela leurs fortes vitesses et accélérations, grâce à la faible masse des éléments en mouvement.

L'idée d'employer ces architectures pour des opérations d'usinage à grande vitesse est assez récente. Il a fallu en effet attendre le développement de certaines technologies et l'émergence d'une nouvelle génération de calculateurs numériques

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

pour voir apparaître les premières machines à structure parallèle capables de réaliser des usinages à grande vitesse de type industriel.

Nous décrirons dans cette partie les principales architectures de MOCN à structure parallèle dédiées à l'UGV dans le but de montrer la diversité des architectures et de solutions technologiques développées ; par la suite nous présenterons de manière détaillée la MOCN VERNE, qui constitue le moyen d'expérimentation privilégié des travaux développés dans ce manuscrit. Il est donc pertinent d'en présenter l'architecture et les principales caractéristiques. Acquise par l'IRCCyN en 2004 dans le cadre du Contrat Etat Région « Pôle de Recherche sur l'Amélioration de la Productivité » [PRAP], cette MOCN a été la première machine outil parallèle implantée dans un laboratoire de recherche universitaire français destinée à être utilisée dans un contexte de production industrielle.

Nous présenterons ensuite les problématiques de calibration des mécanismes parallèles avant de donner des éléments de comparaison entre machines outils sérielles et parallèles pour des applications d'UGV.

1.2.1 Description de différentes architectures développées

Suite à une enquête menée auprès des concepteurs de MOCN et des laboratoires de recherche, Weck dresse en 2002 une liste de 46 projets de machines à structure parallèle [Weck2002]. En se basant sur les données collectées, la Figure 4 propose une répartition des MOCN dédiées à des applications d'usinage en fonction de leur structure et de leur nombre d'axes de déplacement.

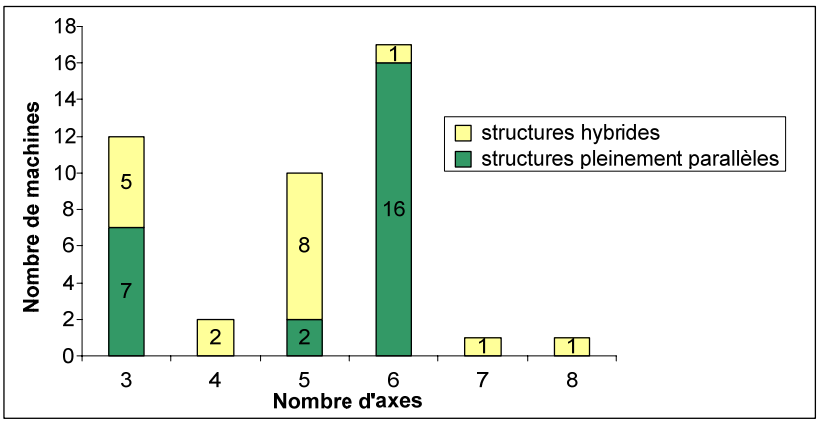


Figure 4 : Répartition des machines parallèles selon le nombre d'axes de déplacement [Weck2002]

On constate ainsi que les solutions proposées sont hétérogènes en termes de possibilités de mouvement et de conception du mécanisme (hybride ou pleinement

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

parallèle), du fait de la quasi infinité des possibilités d'agencement de l'architecture. Notre présentation utilisera les grandes familles dégagées par Terrier [Terrier2005a] : d'une part les hexapodes, les glides et delta (c'est-à-dire les machines outils pleinement parallèles), d'autres part les machines hybrides.

1.2.1.1 Mécanismes pleinement parallèles

Les machines outils pleinement parallèles ont été les premières utilisations de mécanismes parallèles pour des applications d'usinage. Bien qu'elles présentent toutes une architecture propre, elles peuvent être réparties en deux familles, les hexapodes, dont la longueur des jambes est variable et les « glides » dont la longueur des jambes reste fixe.

Les machines hexapodes sont les plus anciennes ; c'est à cette famille qu'appartient la première machine outil à structure parallèle développée pour la fabrication mécanique : la Variax, conçue par Giddings & Lewis (1994). Depuis, d'autres modèles ont été conçus sur la base de cette cinématique. On peut citer en particulier les autres machines présentées sur la Figure 5 [Terrier2005a].

Variax
Giddings & Lewis (USA)

Hexapode CMW 300
CMW (France)

Cosmo Center PM-600
Okuma (Japon)

Tornado
Hexel Corporation (USA)

Octahedral Hexapod VOH-1000
Ingersoll (USA)

Figure 5 : Exemples de machines à structure hexapode [Parallemic]

Cependant ce type de structure présente des inconvénients qui nuisent à la capabilité des machines outils développées : couplage de la position et de l'orientation, redondances d'axes, ainsi que la disponibilité d'un espace de travail relativement restreint au regard de l'encombrement de la machine [Merlet2002].

La seconde famille de cinématiques de machines outils à structure parallèle contient les structures Glides et Delta. A la différence des machines hexapodes, la longueur des jambes reste constante lors des déplacements, qui s'effectuent par translation des points d'accroche du module parallèle sur le bâti. Cette solution technique permet d'alléger singulièrement la masse des éléments mobiles et autorise l'emploi d'actionneurs linéaires, augmentant ainsi les capacités cinématiques de la

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

machine outil et les rendant plus aptes à la réalisation d'usinages à grande vitesse [Terrier2005a]. Les principales MOCN s'appuyant sur ces structures sont présentées sur la Figure 6.

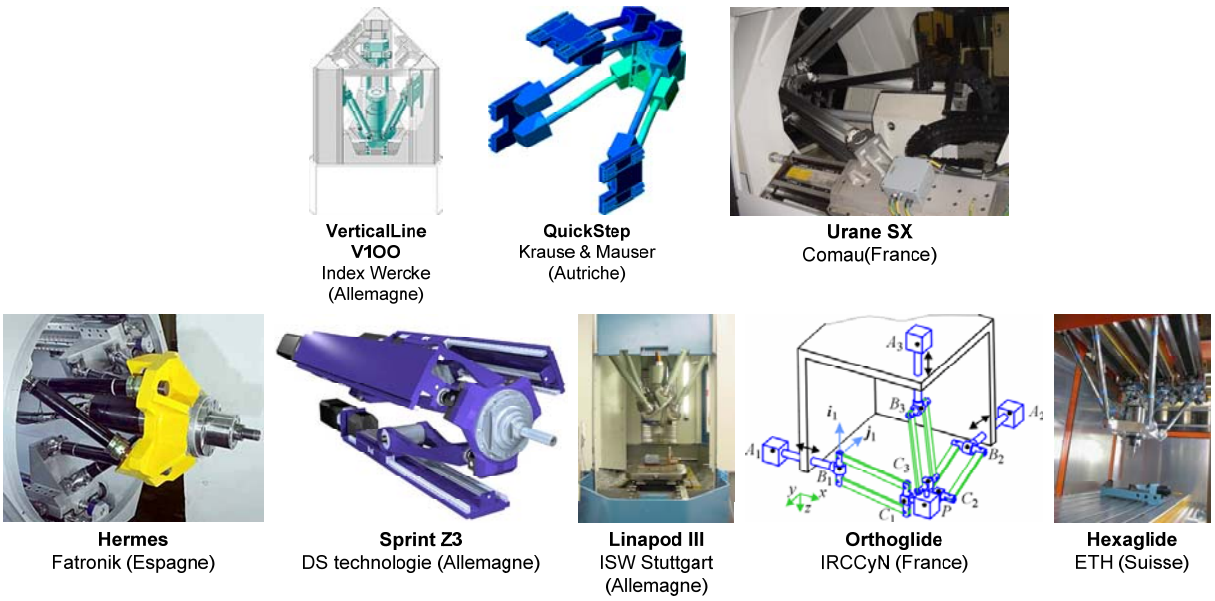


Figure 6 : Exemples de machines à structure Delta et Glide

Malheureusement, si elles surpassent les architectures hexapodes en termes de capacités cinématiques, les machines Delta et Glide destinées à des applications d'usinage cinq axes présentent elles aussi un couplage entre l'orientation et la position de l'outil, ce qui rend leur commande difficile et limite leur espace de travail [Terrier2005a]. C'est pourquoi les concepteurs de machines à structure parallèle se sont tournés par la suite vers des MOCN hybrides. Celles-ci combinent dans la majorité des cas un module parallèle de type Glide ou Delta à un module sériel.

1.2.1.2 Mécanismes Hybrides : exemple de la MOCN VERNE

Les machines outils à structure hybride sont constituées d'un mécanisme sériel et d'un mécanisme parallèle. Selon Terrier [Terrier2005a], toute machine outil parallèle possédant au moins l'une des caractéristiques suivantes peut être considérée comme hybride :

- Il existe une chaîne passive pour restreindre le mouvement
- Seul un sous-ensemble de la MOCN est parallèle
- Certains actionneurs sont positionnés en série

L'objet de ce type d'architecture de MOCN est de profiter des avantages des structures parallèles tout en s'affranchissant de leurs inconvénients. Grâce à l'ajout

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

d'un modèle sériel, ces mécanismes offrent un volume de travail et des capacités d'inclinaison de l'effecteur bien meilleurs que les architectures pleinement parallèles.

Plusieurs solutions de conception sont alors possibles. Ainsi le Tricept qui a été développé initialement par la société NEOS et qui est actuellement la MOCN à structure parallèle la plus présente dans l'industrie, est constitué d'un module parallèle tripode sur lequel un poignet sériel a été greffé, de manière à pouvoir réaliser des usinages cinq axes (Figure 7).

Figure 7 : Exemple de mécanisme hybride, le Tricept [SMT]

La MOCN VERNE de l'IRCCyN, conçue et réalisée par la société FATRONIK, est également de conception hybride [Martin2006]. Elle dispose d'un module parallèle composé de six jambes de longueur constante reliées à la structure par trois vis à bille Z_1, Z_2 et Z_3 (Figure 8). Le positionnement des moteurs et des liaisons ainsi que la longueur de chaque jambe permettent de disposer d'un espace de travail exempt de toute singularité géométrique. Ce module ne présente cependant qu'un faible débattement angulaire autour de l'axe Y.

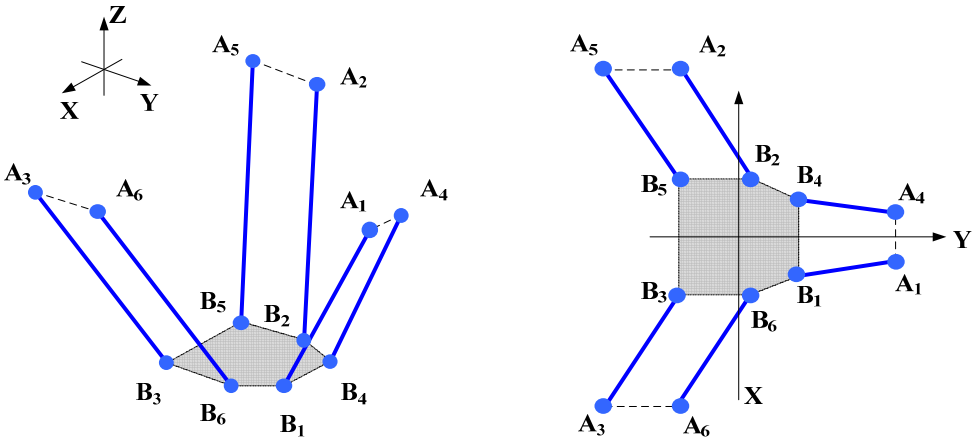


Figure 8 : Schématisation du module parallèle de la MOCN VERNE

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Pour pallier ce défaut, les concepteurs de la MOCN ont ajouté un module sériel chargé d'assurer les rotations autour des axes Y et Z (respectivement les axes machines B et C). L'axe principal de rotation de cette table inclinable est parallèle à l'axe Y du module parallèle. Enfin, pour faciliter la manutention des pièces sur le plateau, les axes des moteurs Z_1, Z_2 et Z_3 ont été inclinés de 30° par rapport à la verticale (Figure 9).

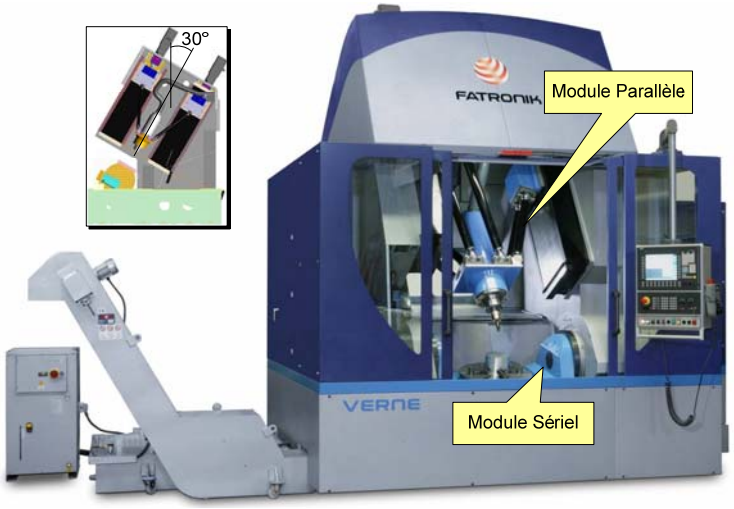


Figure 9 : Vue d'ensemble de la MOCN VERNE

La combinaison du module sériel et du module parallèle permet à la MOCN VERNE de disposer de capacités cinématiques élevées et homogènes, à savoir une vitesse maximale de 50 m/min, une accélération par axe de 15 m/s² par axe ainsi que la possibilité de travailler avec des valeurs de Jerk supérieures à 100 m/s³ sur chaque axe de translation. La broche installée dans le module parallèle présente une puissance nominale de 40 kW et une vitesse de rotation maximale de 24000 tr/min. Parallèlement à cela, l'espace de travail est un cube de 600 mm de côté. Par conséquent, cette machine outil est tout à fait apte à réaliser des applications d'Usinage à Grande Vitesse.

En outre, le DCN pilotant les automates et servant d'interface utilisateur est un Sinumerik 840D conçu par Siemens®. Une spécificité de la MOCN VERNE est que le modèle de transformation géométrique est intégré au DCN. Celui-ci permet de traduire les coordonnées dans l'espace cartésien en coordonnées dans l'espace articulaire lors des déplacements programmés de l'outil mais aussi de compenser les erreurs de parallélisme et de rectitude. Son action reste néanmoins transparente pour l'utilisateur hormis les phases de réglage de ses paramètres : les fichiers FAO et les programmes d'usinage emploient un système de coordonnées cartésiennes, comme

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

pour une MOCN sérielle quelconque. Nous donnerons les détails du modèle de transformation dans le chapitre 4 de ce manuscrit, en nous basant sur les travaux de Terrier [Terrier2005a].

La MOCN VERNE constituera le moyen d'expérimentation privilégié des travaux que nous présenterons dans ce manuscrit. Ses performances et limites seront explicitées au regard de chaque thématique développée tout au long du manuscrit.

1.2.2 Calibration des MOCN parallèles

Si les mécanismes à architecture parallèle présentent des défauts de répétabilité négligeables, ils peuvent être source d'erreurs de positionnement importantes [Merlet1997]. Ce manque de précision est très nuisible pour la mise en place d'applications d'usinage à grande vitesse. Des méthodes de calibration des MOCN à structure parallèle ont donc été développées pour assurer un positionnement satisfaisant de l'outil, c'est-à-dire minimiser la distance entre position et orientation programmées et position et orientation réelles. L'objet de ces approches est d'agir sur les valeurs des paramètres de transformation du modèle géométrique. En effet, la transformation inverse, pilotant les axes de déplacement de la machine à partir des coordonnées du point piloté de l'outil est un facteur d'erreur important [Chanal2006a].

L'obligation de recourir à des opérations de calibration constitue un véritable frein pour le développement des machines outils à architecture parallèle. Les procédures de calibration sont souvent longues et nécessitent un niveau d'expertise élevé lors de leur mise en application. De plus, une question fondamentale n'a pas encore été tranchée ; elle concerne les indices déclencheurs d'une procédure de calibration du mécanisme. En effet, la validité temporelle d'une calibration, c'est-à-dire la durée pendant laquelle la MOCN est capable de réaliser les opérations de fabrication pour lesquelles elle est destinée, dépend de nombreux éléments tels le tolérancement des pièces fabriquées, les variations de température de l'atelier, la nature des opérations réalisées (fraisage, perçage, ébauches, finitions, usinage de matériaux durs, ...) ou les paramètres opératoires employés (ceux-ci peuvent générer des vibrations de la structure).

A l'inverse, la procédure de calibration peut être vue comme la manière d'adapter au mieux le comportement de la MOCN en fonction des besoins de fabrication. On peut ainsi déterminer l'étendue du domaine de validité de l'identification réalisée, ce qui peut être avantageux pour la production en grande

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

série. Dans ce cas, la calibration du mécanisme fait partie du processus de réglage des moyens de production.

Plusieurs types de méthodes expérimentales ont été mises au point pour identifier une machine outil à structure parallèle. Les plus employées sont les approches extéroceptives qui s'appuient sur une mesure externe de l'écart entre le positionnement réel et le positionnement programmé de l'outil pour corriger les paramètres du modèle de transformation. Elles peuvent recourir soit à des appareils externes ou à une pièce mesurée [Song1999; Weck2000; Pritschow2002; Martinez2004; Chanal2006a] soit à des moyens de mesure interne montés sur la structure de la MOCN [Patel2000].

Nous présenterons dans cette partie deux méthodes de calibration qui ont été mises en application sur la MOCN VERNE. La première est celle utilisée par Fatronik (société conceptrice de la machine) et par l'IRCCyN lors des calibrations saisonnières de « maintenance ». La seconde a été développée au Laboratoire de Mécanique et Ingénieries de Clermont-Ferrand et testée sur la MOCN VERNE. Elle présente l'intérêt particulier de se baser sur l'usinage d'une pièce [Chanal2006a].

1.2.2.1 Processus de calibration utilisé par Fatronik sur la MOCN VERNE

La méthode de calibration que nous présenterons dans ce paragraphe s'appuie sur les travaux de Martinez [Martinez2004] et fait appel à un mécanisme Ballbar Renishaw®, qui offre une mesure redondante de la position de l'outil. Elle est à rapprocher d'autres méthodes de calibration extéroceptives telle que celle proposée par Weck, qui assure la redondance de la mesure à l'aide d'un axe linéaire attaché au bâti par un joint de cardan et relié à la broche par un cône HSK [Weck2000], celle proposée par Yang, qui évalue à l'aide d'un Ballbar à la fois les erreurs dues à la géométrie et celles dues à la température dans le cas des MOCN sérielles [Yang2004] ou celle proposée par Song qui utilise un capteur laser 5D [Song1999].

Dans le cas de la VERNE, la procédure de calibration se déroule en trois phases. Son objet est de définir les paramètres de compensation utilisés par le modèle de transformation géométrique. Ces paramètres correspondent aux coordonnées des 12 rotules A_i et B_i de la structure et aux longueurs de jambes L_i (voir Figure 8).

La première étape agit sur l'orientation et le centrage du module parallèle par rapport au plateau de la machine. On utilise pour cela des moyens de mesure conventionnels (cylindres étalons, comparateurs, …).

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

La seconde étape permet d'obtenir un positionnement de l'outil satisfaisant pour des applications de fabrication. On se base pour cela sur une méthode extéroceptive : l'écart entre la position réelle de l'outil et sa position théorique (commandée par le DCN) est mesuré à l'aide d'un mécanisme Ballbar. Celui-ci est monté entre la pointe de l'outil et une position de référence sur le plateau (Figure 10). Les mesures de longueurs réelles du Ballbar sont effectuées pour un grand nombre de positions de la pointe de l'outil autour du point de référence de la table. Les machines parallèles ont un comportement anisotropique, cela signifie notamment que la précision du posage de l'outil n'est pas la même dans tout le volume de travail. En conséquence, Fatronik a décidé d'utiliser trois points de référence sur le plateau ainsi que deux longueurs différentes d'outil, multipliant ainsi le nombre de points de mesure et l'étendue de la zone de validité de la calibration.

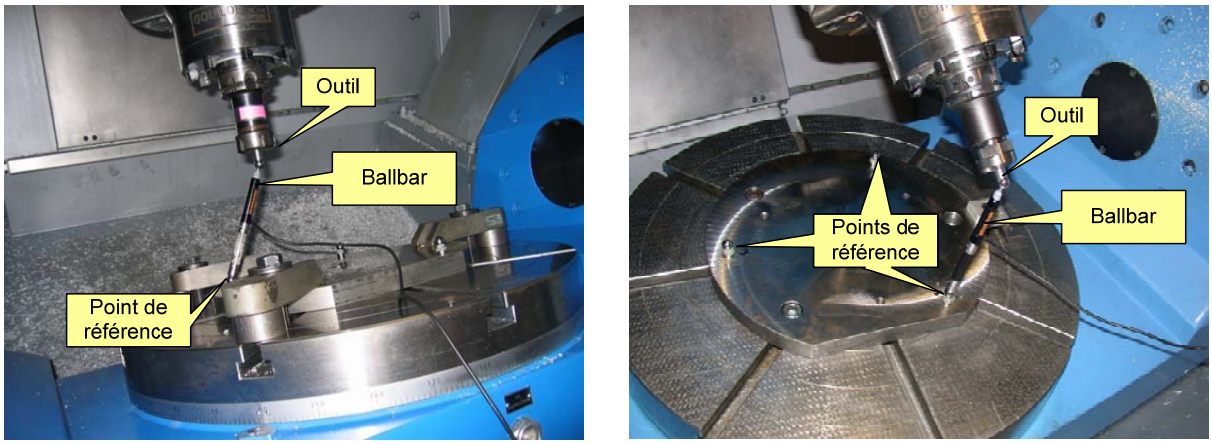


Figure 10 : Calibration par mesures Ballbar

Dans un troisième et dernier temps, les fichiers de mesure et les paramètres actuels du modèle de transformation sont injectés dans un algorithme d'optimisation qui procède à l'identification et retourne un nouveau jeu de paramètres.

Cette méthode de calibration est directement issue de la robotique et de l'identification de machines-outils sérielles. Elle présente l'inconvénient d'immobiliser la MOCN pendant un temps assez long (il faut compter deux jours pour un processus de calibration complet). De plus, le Ballbar est un mécanisme fragile et une certaine expertise de l'utilisateur est nécessaire pour procéder à un réglage correct des paramètres [Pritschow2002]. Enfin, elle ne fait pas appel à la fonction principale d'une MOCN dédiée à la fabrication mécanique, à savoir l'usinage. Cette approche, tout comme celles du même type énoncées plus haut, peut donc être qualifiée de « méthode de laboratoire » et malgré son efficacité, il est assez ardu de la mettre en œuvre dans un contexte de production industrielle [Chanal2006b].

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

En outre, Terrier [Terrier2005b] montre dans ses travaux que l'orientation et la position de la pièce à usiner au sein de l'espace de travail influe sur la capabilité d'une MOCN parallèle, du fait de l'anisotropie de son comportement. Ainsi, il serait profitable de pouvoir disposer d'une approche de calibration capable d'une part de déterminer une cartographie de l'espace de travail permettant de choisir la localisation idéale de la pièce en fonction de l'application et d'autre part de pouvoir adapter les performances de la MOCN parallèle aux contraintes de fabrication d'une pièce donnée, en fonction de sa morphologie et de ses contraintes de posage.

Pour ces raisons, il a été pertinent de développer des méthodes faisant appel à l'usinage sur MOCN à structure parallèle et à des moyens de mesure plus conventionnels. Un exemple de méthode basée sur l'usinage d'une pièce est proposé au paragraphe suivant.

1.2.2.2 Méthode de calibration à partir de l'usinage d'une pièce

La méthode de calibration explicitée ici est tirée des travaux de Chanal [Chanal2006a] mis en œuvre sur la MOCN VERNE de l'IRCCyN. Elle se déroule en trois points : usinage de la pièce de référence, métrologie de la pièce et identification des paramètres du modèle de transformation (Figure 11).

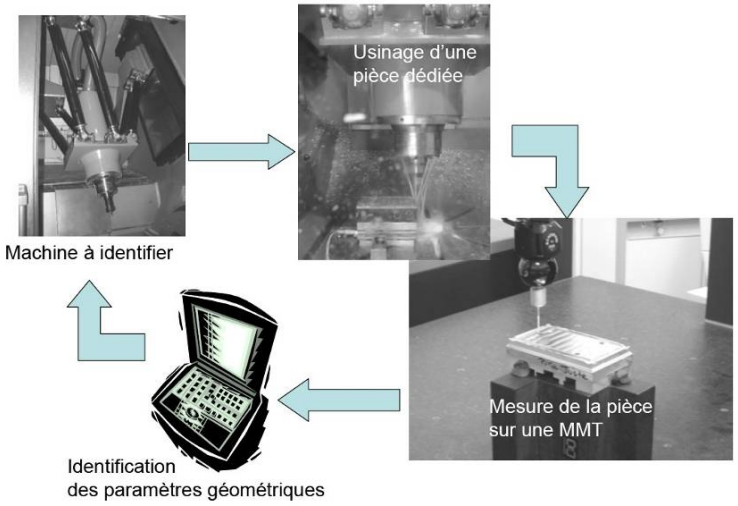


Figure 11 : Méthode de calibration par usinage d'une pièce [Chanal2006a]

La pièce de référence est obtenue à partir d'un brut en alliage d'aluminium pour limiter les efforts sur l'outil. Les trajectoires parcourues sont des segments de droite : le comportement d'une machine outil à structure parallèle étant anisotropique, tous les paramètres géométriques sont sollicités lors d'un déplacement linéaire [Chanal2006a]. La forme de la pièce d'identification retenue ainsi que les trajectoires d'usinage associées sont présentées sur la Figure 12. On y constate que les

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

trajectoires de contournage (réalisées par une fraise cylindrique) et de rainurage (réalisées par une fraise hémisphérique) sont identiques : la mesure du plan contourné permet de déterminer le défaut d'orientation de l'outil, tandis que la mesure du profil généré par le bout de l'outil lors de chaque rainure définit le défaut de positionnement vertical du point piloté de l'outil.

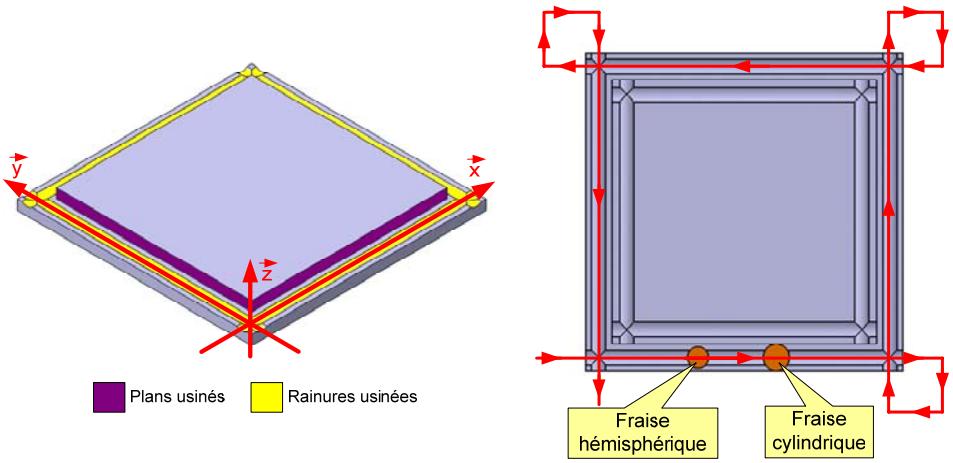


Figure 12 : Pièce dédiée à l'identification et trajectoires d'usinage programmées [Chanal2007]

Après usinage sur la MOCN à calibrer, la seconde phase de la méthode consiste à mesurer les surfaces produites. Cette opération s'effectue à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Les mesures sont effectuées en construisant le repère de dégauchissage à partir des surfaces de mise en position du brut dans le porte-pièce de la MOCN. En pratique, l'inclinaison du plan vertical produit lors du contournage ainsi que le point le plus bas de la rainure sont acquis pour chaque abscisse de la trajectoire, comme indiqué sur la Figure 13. L'analyse de ces données permet de remonter aux points pilotés par le DCN et de disposer des positions successives de l'outil lors de l'usinage.

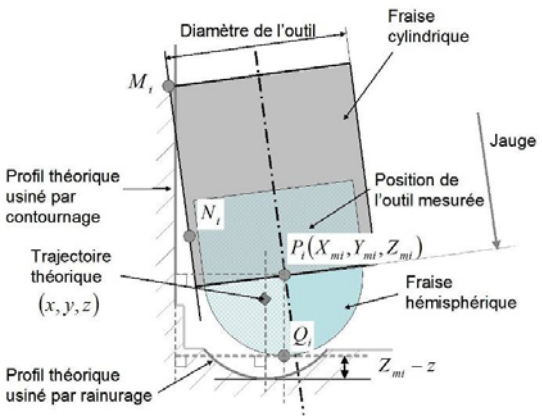


Figure 13 : Défaut de position du point piloté de l'outil [Chanal2006a]

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Enfin, dans un troisième temps, les positions réelles de l'outil sont injectées dans un algorithme qui procède à l'identification des paramètres du modèle de transformation. Ce dernier détermine un nouveau jeu de paramètres à entrer dans le DCN.

L'efficacité de cette méthode de calibration a été prouvée par des simulations numériques et par une validation expérimentale sur la MOCN VERNE. De plus, cette approche de calibration présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes plus classiques héritées de la robotique. Ainsi, le temps d'immobilisation de la MOCN est très faible, dans la mesure où il est restreint à l'usinage de la pièce d'identification (quelques minutes). La calibration de la machine outil se fait à partir de trajectoires d'usinage et non de relevés de position ; cela conduit à une identification du processus qui correspond mieux à l'emploi de la MOCN. Enfin, il est possible d'adapter la procédure de calibration au type de fabrication dédié à la machine outil et même de pouvoir réaliser une « maintenance » géométrique par un suivi production [Chanal2006a].

1.2.3 Comparaison avec les MOCN sérielles

Afin de donner des éléments de capabilité des MOCN parallèles, nous donnons dans ce paragraphe des résultats d'études comparatives de leurs performances face à des machines sérielles. Dans un premier temps, nous synthétisons les conclusions d'études précédentes ; puis, nous nous attachons à présenter les conclusions d'une étude comparative menées dans le cadre de nos travaux. Cet exemple d'étude illustre également les thématiques liées à la programmation des MOCN parallèles et introduit les axes de recherche que nous allons développer dans ce manuscrit.

1.2.3.1 Synthèse d'études précédentes

Les MOCN à structure parallèle constituent aujourd'hui une réponse technologique valide aux limitations des machines sérielles en termes de performances cinématiques. Néanmoins, l'implantation de machines outils parallèles dans les ateliers de fabrication reste encore anecdotique. Cela provient de la ténacité de nombreux a priori circulant autour de ce nouveau type de structure : les MOCN parallèles seraient peu précises, peu rigides et onéreuses…

Pourtant, dans ses travaux publiés en 2004, Terrier mesure les performances d'un panel constitué de machines sérielles et parallèles pour la fabrication de formes complexes [Terrier2004] et montre que les MOCN parallèles sont capables de rivaliser avec les MOCN sérielles en termes de conformité des pièces produites. Chanal

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

synthétise ces résultats avec ceux obtenus par Hertel [Hertel2002] et Geldart [Geldart2003] pour mesurer la capabilité des architectures parallèles en usinage. Elle en conclut que les difficultés principales des MOCN parallèles résident dans la génération de trajets en ligne droite, notamment lorsqu'il faut allier une grande précision et à une forte dynamique de mouvement [Chanal2006a]. Pour contrer ces déficiences, Chanal propose deux méthodes complémentaires, la première visant à déterminer l'espace de travail optimal de la MOCN en fonction des diverses de contraintes et la seconde à mettre en œuvre une méthode calibration basée sur l'usinage d'une pièce.

Malgré tout, il est assez difficile de tirer des règles génériques de comportement des mécanismes parallèles tant les possibilités d'agencement de la structure sont variées. De plus, le développement de ce type de MOCN est somme toute assez récent et elles n'ont pas encore atteint leur maturité.

1.2.3.2 Exemple d'étude comparative : usinage de poches double courbure

La présentation de cette d'étude comparative vise non seulement à donner des éléments de comparaison des performances d'une MOCN parallèle face à une MOCN sérielle, mais surtout, elle illustre les principaux enjeux liés à la programmation des MOCN à structure parallèle et à son optimisation.

En pratique, les résultats présentés ont été obtenus dans le cadre d'un projet de recherche Région Pays de Loire, au cours duquel nous avons été amenés à comparer les performances de deux machines outils pour réalisation de pièces complexes par Usinage Grande Vitesse. Les deux machines outils étudiées ont été :

- la MOCN VERNE, à structure parallèle, équipée d'un DCN Siemens Sinumerik 840D
- un centre d'usinage HERMLE C30U, à structure sérielle, équipé d'un DCN Heindenhain et possédant des caractéristiques cinématiques semblables à la MOCN VERNE.

La comparaison a porté sur l'usinage de poches à double courbure dans des éprouvettes en alliage d'aluminium de type aéronautique (Figure 14). Les critères de comparaison observés ont été le temps d'usinage et l'écart d'altitude de la géométrie usinée, assimilé à un défaut de forme.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

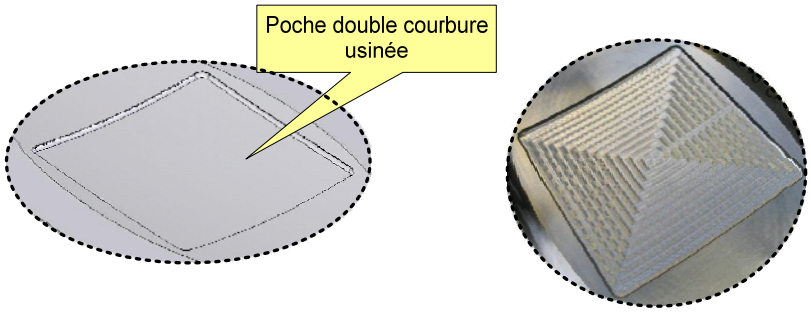


Figure 14 : Géométrie de la pièce test

Plusieurs essais ont été réalisés sur chaque machine, de manière à évaluer plusieurs combinaisons des paramètres opératoires choisis : le type de stratégies d'usinage (aller-aller et colimaçon), le pas radial et l'inclinaison de l'outil. Il est important de préciser que le protocole de fabrication a été identique pour chacune des deux MOCN. Pour chaque jeu de paramètres, un seul fichier en langage APT a été généré à l'aide d'un logiciel de FAO, la programmation des trajets se faisant par interpolation linéaire avec une erreur de flèche donnée. Ensuite, pour chaque machine, un programme d'usinage dédié a été généré en faisant appel à un post processeur spécifique.

Essai	C30U HERMLE	VERNE initiale	VERNE optimisée
1	104 s	124 s	100 s
2	115 s	130 s	88 s
3	185 s	240 s	
4	249 s	328 s	
5	105 s	128 s	

Tableau 1 : Mesure des temps d'usinage sur chaque machine

Le temps d'usinage a été mesuré lors de la réalisation de chaque pièce. Les premiers résultats obtenus, consignés dans le Tableau 1, se sont avérés être très décevants pour la MOCN à structure parallèle, voire surprenants. Non seulement les temps d'usinage étaient beaucoup plus longs qu'avec la machine sérielle HERMLE mais le comportement cinématique de la structure présentait aussi de nombreux à-coups, en particulier au centre de la poche. Nous avons donc décidé de réusiner certaines pièces après avoir modifié certains paramètres opératoires (commande, fonctions de lissage, …) et effectué une calibration du module parallèle. Les nouveaux temps mesurés ont été bien meilleurs que précédemment et sont même inférieurs à

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

ceux obtenus avec le C30U. Cette situation met en lumière une problématique fondamentale de la programmation des centres d'usinage à grande vitesse, à savoir la nécessité de s'adapter aux spécificités du moyen de fabrication et du produit à réaliser.

Dans un second temps, les poches usinées ont été inspectées sur MMT dans le but d'en évaluer la conformité vis-à-vis du modèle numérique. Pour limiter les erreurs de mesure, les pièces ont été dégauchies dans un repère constitué de surfaces usinées dans la même phase que les poches. Le fond de chaque poche a ensuite été mesuré en suivant une grille de palpage. Nous jugeons utile de préciser ici que ce n'est pas réellement le défaut de forme de la pièce qui a été évalué, mais l'écart selon l'axe z du repère de dégauchissage entre la surface réelle et la surface théorique, pour des points de mêmes coordonnées dans le plan XY du repère. La valeur d'écart maximale relevée est donc supérieure au défaut de forme réel de la pièce.

Un exemple de résultats de mesures est donné dans le Tableau 2, les deux pièces ont été usinée à l'aide de paramètres opératoires identiques, seule la machine outil diffère. Sont présentés pour chaque pièce un schéma de la surface palpée ainsi qu'une vue de l'écart d'altitude entre la surface théorique et la surface palpée.

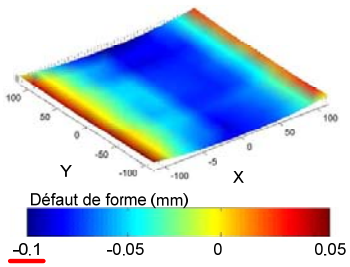
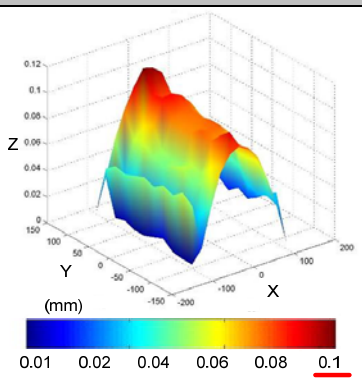
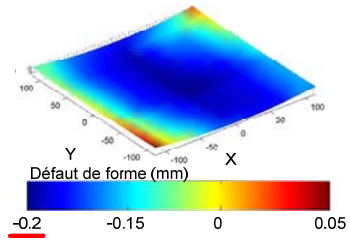
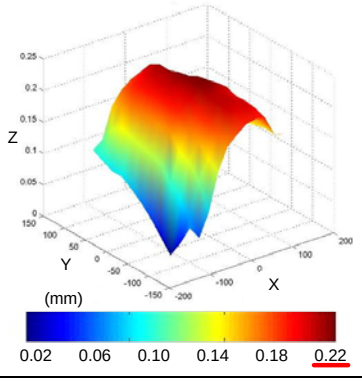
	Pièces usinée	Surface mesurée	Défaut de forme
C30U			
VERNE			

Tableau 2 : Résultats de mesure d'une pièce

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

La Figure 15 présente quant à elle les écarts maximaux mesurés sur chacune des pièces (par souci de confidentialité, il n'y a pas de correspondance entre l'ordre de présentation de ces essais et celui utilisé pour le Tableau 1). Les écarts sont voisins pour les deux machines outils : le plus petit écart obtenu est de 0.115 mm pour la VERNE et 0.112 mm pour le C30U. Il est intéressant de souligner que ces valeurs ne sont pas obtenues pour la même combinaison des paramètres {stratégie d'usinage, inclinaison de l'outil, pas radial}, preuve supplémentaire de l'adéquation nécessaire entre la programmation d'une MOCN, son architecture et son DCN. Néanmoins, l'importance des écarts d'altitude maximaux, supérieurs à 0.1 mm pour tous les essais, ainsi que la similitude de formes présentées par deux surfaces d'écart réalisées avec les mêmes paramètres sur deux MOCN différentes (Tableau 1) montrent que la cause principale des écarts d'altitude mesurés n'est sans doute pas fonction des paramètres choisis ici.

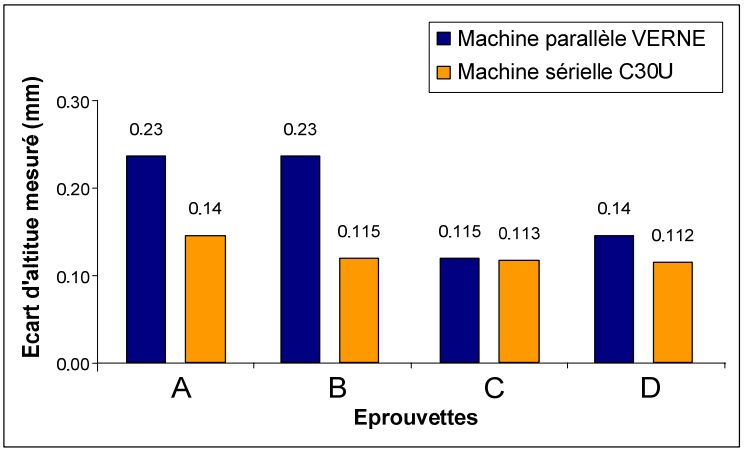


Figure 15 : Ecarts mesurés sur chacune des éprouvettes

Au final, cette étude des performances comparées d'une MOCN parallèle et d'une MOCN sérielle illustre un certain nombre de caractéristiques liées à l'utilisation de nouvelles architectures de machine outil et à la programmation des moyens de fabrication modernes :

- La programmation des opérations d'UGV ne peut être générique, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du moyen de fabrication utilisé pour pouvoir définir le parcours d'outil ainsi que les paramètres optimaux. Ceci est d'autant plus vrai pour les machines à structure parallèle qui présentent un espace de travail anisotropique : l'orientation et la position de la pièce ont une influence sur les performances relevées [Terrier2005b].

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

- Les meilleures solutions en termes de trajectoires de déplacement de l'outil et de paramètres de programmation appliquées aux machines sérielles ne sont pas nécessairement les mêmes pour les structures parallèles. A l'inverse, il existe sans doute des nouvelles combinaisons de facteurs permettant de tirer meilleur profit de ces architectures (*lien avec l'axe de recherche n°1 et 2*).
- Les performances des MOCN à structure parallèle dépendent fortement du modèle de transformation géométrique, disposer d'une méthode de calibration performante et si possible rapide à mettre en œuvre est indispensable, comme nous l'avons montré dans la partie 1.2.2 de ce chapitre.
- La programmation actuelle des MOCN se limite à des données géométriques (trajectoires, valeurs de décalages, inclinaison de l'outil, ...) et cinématiques (compression des trajets, interpolations, ...). Or, la performance du procédé dépend aussi d'autres facteurs liés au process et dont il faudrait tenir compte dès la programmation et si possible, adapter la programmation à ce qui se passe réellement sur la machine (*lien avec l'axe de recherche n°3*).
- La chaîne numérique actuelle est hétérogène et fait appel à des post-processeurs. Dans le cas de pièces complexes, les approximations utilisées pour la génération des fichiers d'échanges peuvent être source de défauts sur la pièce finale. Un standard de données universel apporterait de la cohérence aux différents maillons de la chaîne numérique et diminuerait ces causes d'erreur (*lien avec l'axe de recherche n°4*).

Les principaux points exposés ici serviront de base à la définition des axes de recherche développés dans ce manuscrit.

1.2.4 Conclusion

Après une dizaine d'années d'exposition médiatique, le bilan des MOCN à structure parallèle est assez maigre. Peu de modèles ont réussi à percer au niveau industriel malgré les fortes performances cinématiques de ces machines.

Il est néanmoins légitime de se demander si ce type de MOCN constitue l'avenir de la machine outil ou si, à l'inverse, il ne s'agit de simples « curiosités aux caractéristiques exotiques » dont la mise en œuvre n'est pas viable dans un contexte industriel.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

1.2.4.1 Les MOCN de demain seront-elles toutes parallèles ?

Les MOCN à structure parallèle ne sont encore que peu répandues dans les ateliers de fabrication mécanique. Les coûts actuels d'acquisition et de maintenance de ces moyens de production sont en effet plus élevés que pour des machines outils d'UGV à structure sérielle. De plus, de nombreux facteurs freinent encore leur essor comme par exemple leur comportement anisotropique ou l'obligation de rectifier le modèle de transformation géométrique par des opérations de calibration.

Il en résulte qu'il n'y a pas d'intérêt évident à l'emploi de ces architectures pour la majorité des applications d'Usinage à Grande Vitesse, pour lesquelles les machines sérielles sont tout à fait capables. Néanmoins, les machines parallèles présentent des caractéristiques cinématiques plus homogènes que leurs consœurs sérielles dans le sens où elles proposent de fortes accélérations couplées à de fortes vitesses d'avance. Ceci peut être bénéfique dans des opérations d'ébauche de matériaux légers par exemple, où les contraintes d'efforts de coupe et de précision sont peu limitantes.

Il est donc imprudent de donner un avis tranché sur l'avenir des machines à structure parallèle, d'autant plus que les possibilités d'architectures sont très variées. Ce qui est pourtant certain, c'est que leur emploi nécessite de repenser certaines étapes du process de fabrication car, comme nous l'avons vu au cours de l'étude comparative présentée en 1.2.3.2, les points de fonctionnement optimaux pour une MOCN à structure parallèle ne sont pas les mêmes que pour une MOCN sérielle. Il est ainsi plus difficile de s'appuyer sur sa seule expérience des MOCN sérielles pour effectuer les meilleurs choix.

Les machines à structure parallèle ont ainsi un avenir dans des tâches bien spécifiques nécessitant de fortes capacités cinématiques. Elles s'insèrent ainsi totalement dans la démarche actuelle qui vise à définir et optimiser le moyen de fabrication idéal pour une application donnée. De plus, il nous apparaît important de souligner qu'un axe de développement effectif se situe dans la conception de machines à architecture hybride, où un mécanisme parallèle est monté sur une structure sérielle. Cette solution technologique fait actuellement ses preuves dans l'industrie aéronautique pour la fabrication de pièces de grande dimension : les contraintes technico-économiques liées au moyen de fabrication sont résolues par la combinaison d'un module parallèle et d'un bâti sériel équipé d'axes de déplacement à moteurs linéaires.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

1.2.4.2 Adéquation des MOCN avec les contraintes de l'application visée

Le développement des domaines d'applications de l'UGV et les progrès technologiques ont conduit à une segmentation du marché des MOCN. L'offre actuelle est très vaste en termes d'architecture, de performances cinématiques et de DCN. Ces choix sont assez variés pour s'adapter aux besoins réels et exprimés de l'utilisateur. On observe ainsi - certes dans une moindre mesure - une tendance semblable à celle du marché automobile : de la même façon qu'il est inutile d'employer un véhicule tout terrain pour se déplacer en ville ou qu'il est irréaliste de vouloir gagner une course de formule 1 au volant d'une berline familiale, il est primordial de choisir une MOCN qui soit en adéquation avec l'application visée, le contexte industriel et les compétences développées au sein de la structure.

La définition du cahier des charges lié à l'acquisition ou la conception d'une MOCN doit donc déterminer de la façon la plus précise possible l'étendue des besoins et leur hiérarchie. Selon les cas, une structure parallèle pourra ou non être la solution technico-économique la plus adaptée.

1.3 Définition des axes de recherche

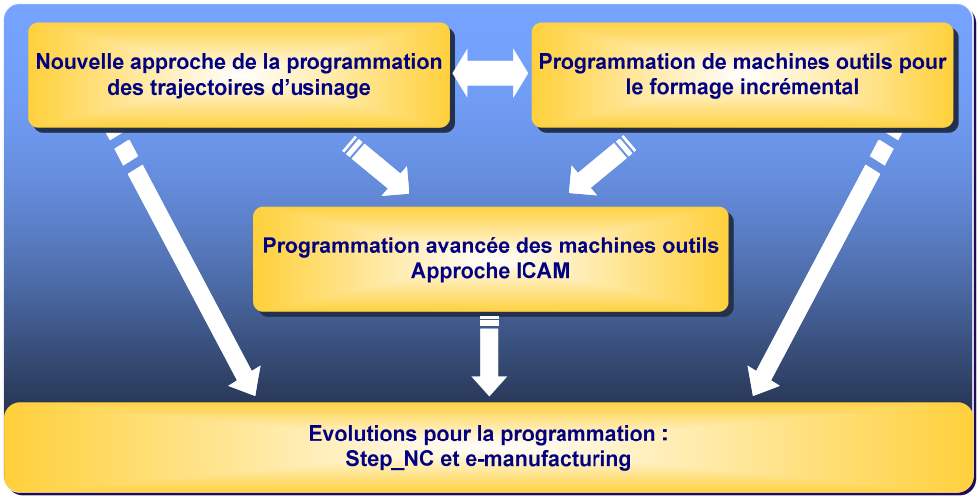


Figure 16 : Relations entre les différents axes de recherche

Au regard du contexte présenté dans ce chapitre ainsi que des diverses problématiques soulevées, notre travail de recherche s'articulera autour de quatre axes de recherche. Tous liés à la programmation des MOCN, ceux-ci concerneront la préparation de la fabrication, le choix des procédés, le déroulement du process, ainsi que les évolutions de la programmation des moyens de fabrication à commande

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

numérique. Ils nous permettront ainsi de disposer d'une vision multiprocédé des problématiques de programmation des MOCN, quelle que soit leur structure. La Figure 16 décrit les relations entre chacun des axes et précise la cohérence de leurs apports.

1.3.1 Axe 1 – Préparation de la fabrication : Nouvelle approche de la programmation des trajectoires d'usinage

Nous avons montré dans ce chapitre que la programmation des MOCN ne peut être générique étant donné les contraintes actuelles du monde industriel. Au contraire, les stratégies d'usinage employées doivent être adaptées aux performances du moyen utilisé.

Ainsi, l'utilisation de machines outils à structure parallèle permet d'élargir le panel de trajectoires d'usinage disponibles pour réaliser une opération, grâce à leurs capacités cinématiques élevées et leur comportement au sein de l'espace de travail. Comme nous l'avons illustré par l'étude comparative sur les MOCN VERNE et HERMLE C30U, les points de fonctionnement optimaux sont différents pour les machines parallèles par rapport aux machines sérielles. De la sorte, certaines stratégies non viables sur machines sérielles s'avèrent très performantes sur machines parallèles.

En outre, le choix de la stratégie d'usinage optimale reste à l'heure actuelle une problématique complexe faisant appel à de nombreux paramètres, dont il est difficile d'évaluer l'impact. De plus, peu de critères formels, obtenus par modélisation ou expérimentation, sont disponibles pour mesurer la pertinence du choix effectué. Si bien que les experts font appel à leurs savoir-faire et leur expérience pour déterminer les stratégies d'usinage employées.

Le premier axe de recherche que nous suivrons dans ce manuscrit s'inscrit dans un contexte de préparation des opérations de fabrication et consistera à évaluer la performance de nouvelles stratégies d'usinage pour des applications sur MOCN parallèle et répondant à des besoins spécifiques ; l'objet principal est de déterminer une stratégie d'usinage adaptée aux contraintes de production mais aussi du moyen de production employé. Nous nous appuierons pour cela sur des résultats issus d'expérimentations ou d'outils de simulation développés dans cet objectif.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

1.3.2 Axe 2 – Choix des procédés : Programmation de MOCN pour le Formage incrémental

Le second axe de recherche traite du choix des procédés mis en œuvre sur MOCN et nous permet d'élargir le champ d'application de nos travaux en proposant une vision multi-procédés de la programmation des MOCN. Dans un souci d'optimisation de l'emploi des moyens de production, il est de plus profitable d'élargir le choix des procédés disponibles sur MOCN afin d'augmenter la flexibilité de planification et d'étendre son domaine de compétences.

Ainsi, le début des années 2000 a vu l'émergence de nouveaux procédés de fabrication. Parmi eux le formage incrémental se positionne sur la mise en forme de pièces de tôlerie dans le cas de prototypes, mais aussi de petites et moyennes séries. Si la mise en œuvre de base du procédé est assez aisée et ne nécessite que des équipements courants d'un atelier de fabrication, sa maîtrise n'est pas immédiate ; en effet ce procédé n'est pas encore parvenu à maturité, mais les efforts de recherche et de développement sont nombreux. Les problématiques associées se situent en particulier au niveau de la programmation des parcours de l'outil.

Parallèlement à cela, outre le peu de recul dont dispose la communauté scientifique face à ce procédé émergent, un enjeu majeur associé à la programmation de trajectoires de formage incrémental se situe dans la difficulté de prédiction de la position des surfaces formées entre deux passages successifs de l'outil, du fait notamment du retour élastique des tôles. De plus, des contraintes de programmation fortes sont liées au respect de l'intégrité des surfaces formées.

Il est alors pertinent de pouvoir profiter de l'expérience acquise dans le domaine de l'usinage pour proposer des optimisations, en particulier en termes de capabilité. Nous montrons aussi l'influence des stratégies de formage ainsi que de leur programmation sur la mise en œuvre d'opérations de formage incrémental. La finalité associée à cet axe est de mettre en place une programmation dédiée au formage incrémental, en intégrant les contraintes et les spécificités de ce procédé (ce que les trajectoires employées en usinage ne permettent pas de faire).

1.3.3 Axe 3 – Déroulement du process : Programmation Avancée des MOCN

Bien que les Directeurs de Commande Numérique des machines outils aient fortement gagné en performance, la programmation des parcours d'outil se base

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

toujours sur des critères géométriques et cinématiques. Cette situation est insuffisante car la mise en œuvre efficace d'un procédé de fabrication sur MOCN est régie par un certain nombre de paramètres liés au process et dont il n'est pas tenu compte au moment de la programmation en FAO.

Pour faire face à cette situation, de nombreuses méthodes d'optimisation de la programmation des MOCN ont été proposées ; celles-ci se basent soit sur des résultats de mesure en cours de process à l'aide d'équipements externes, soit sur des résultats issues de modèles de prédiction. Ces différentes approches s'accompagnent néanmoins d'un certain nombre de limitations qui restreignent leurs conditions d'application et pénalisent leur implantation dans un contexte industriel.

Le troisième axe de recherche consiste à développer une nouvelle méthode de programmation avancée des MOCN, appelée méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing). Elle consiste en l'optimisation en ligne des parcours d'outil sous contrainte de l'évaluation de données liées au procédé lors de sa mise en œuvre. Nous nous basons pour cela sur les informations collectées par le DCN en cours de process (efforts sur l'outil, puissance consommée, température de composants, ...). L'objectif de cette approche de programmation avancée est d'optimiser la programmation de la MOCN au comportement réel lors de l'usinage. Elle se veut également générique dans le sens où elle n'est pas reliée à un procédé de fabrication particulier. Aussi, nous montrerons ses performances tant pour des opérations de fraisage que pour des opérations de formage incrémental.

Ce troisième axe de recherche s'inscrit dans la continuité des axes 1 et 2. En effet, il permet de tirer un profit maximal de la stratégie d'usinage ou de formage choisie en adaptant au mieux le parcours de l'outil au domaine d'application et au moyen de fabrication. L'optimisation couvre alors le déroulement du process en lui-même en plus de la préparation de la fabrication.

1.3.4 Axe 4 – Evolutions pour la programmation : e-manufacturing et Step_NC

Le dernier axe de recherche porte sur les évolutions à moyen terme concernant la programmation des MOCN. Nous restreignons l'étude à deux secteurs, les évolutions concernant l'environnement des MOCN avec le développement de l'e-manufacturing et les évolutions concernant la programmation des MOCN avec l'émergence d'un nouveau standard de programmation, le format Step_NC.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Avec le déploiement des technologies réseau, la notion d'entreprise étendue peut désormais être élargie aux ateliers de fabrication. Ainsi, si la gestion des données par réseau est une réalité à l'heure actuelle, celle des moyens de production soulève des problématiques supplémentaires en termes de fiabilité et de sécurité. De plus, elle implique une modification du contexte d'utilisation des MOCN, avec notamment la mise en place d'approches par compétence déportée. Notre objectif ici est d'évaluer les possibilités d'optimisation de la programmation en nous inscrivant successivement dans des contextes d'e-learning, d'e-marketing et d'e-expertise. Nous nous appuyons pour cela sur la plateforme de pilotage à distance de machine outil déployée au sein de l'IRCCyN.

Dans un second temps, nous traitons des apports associés à l'utilisation d'un nouveau standard de programmation, le format Step_NC ; grâce à une prise en charge d'informations de haut niveau, celui-ci répond mieux que le standard ISO 6983 actuel aux exigences actuelles de la fabrication sur MOCN. Sa mise en œuvre nécessite néanmoins une refonte de la relation entre CAO et MOCN qui ne peut se faire brutalement mais implique une mise en œuvre progressive effectuée par étapes. Nous montrons par ailleurs que le standard Step_NC peut servir de socle pour les approches proposées par les autres axes de recherche : en plus de permettre au DCN de générer des trajectoires d'outil adaptées à la MOCN utilisée, il offre un contexte propice à la mise en œuvre de programmation avancée de MOCN. Nous proposons enfin une nouvelle méthode de définition des stratégies d'usinage sous format Step_NC grâce au concept de trajectoires à motifs qui permet de respecter au mieux les contraintes technologiques du procédé.

1.4 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de définir le cadre de nos travaux de recherche. Ainsi, l'émergence de l'Usinage à Grande Vitesse s'est accompagnée de profonds changements de la fonction fabrication des entreprises de production mécanique. Elle a pu toutefois s'appuyer sur les progrès technologiques des moyens de fabrication, tout en servant de moteur à ces avancées.

Les machines outils à structure parallèle ont été une réponse aux besoins toujours croissants en performances cinématiques. Malheureusement, le bilan de leur utilisation est à l'heure actuelle limité, peu de modèles ont trouvé une place dans les ateliers industriels. En effet, si les capacités cinématiques et dynamiques des MOCN à

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

structure parallèle sont globalement supérieures à celles offertes par leurs consœurs sérielles, l'emploi de ces machines outils s'accompagne d'un certain nombre de contraintes supplémentaires qui pénalisent leur efficacité. Par exemple, la maintenance de ces moyens de production est plus complexe et les étapes en sont plus longues car des opérations de calibration sont nécessaires pour ajuster le modèle de transformation géométrique. Cette situation s'explique également par les démarches d'optimisation souvent mises en œuvre pour ces machines ; en se calant sur celles proposées pour les machines sérielles, elles ne peuvent tirer pleinement parti des caractéristiques des MOCN parallèles, du fait de leur comportement différent. Par conséquent, une implémentation efficace d'une production sur machine à structure parallèle nécessite des approches d'optimisations spécifiques, en particulier au niveau de la programmation, qu'il faut adapter aux caractéristiques du moyen de fabrication utilisé.

C'est pourquoi, les machines à structure parallèle ne préfigurent pas l'ensemble des MOCN du XXIe siècle, dans la mesure où elles ne surpassent pas leurs consœurs sérielles dans tous les domaines. Elles apportent cependant des pistes d'évolution : en faisant appel à des DCN très performants et disposant de comportements spécifiques en usinage, elles redéfinissent voire élargissent l'espace des solutions technico-économiques viables lors de la préparation de la fabrication ou du déroulement du procédé, confirmant ainsi le point de vue de la diversification nécessaire des technologies de machine pour s'adapter au mieux aux applications à mettre en œuvre.

Fort de ce constat, l'objet de ce travail de thèse est de mettre en évidence des voies d'optimisation concernant la programmation des MOCN. Il s'agit pour cela de tirer au maximum profit des performances de la machine utilisée et de son DCN afin d'en adapter la programmation. En pratique, nous avons identifié quatre axes de recherche. Bien qu'ils traitent d'aspects différents du processus de fabrication sur MOCN, leurs apports sont cohérents puisque chacun permet à son niveau d'adapter la programmation de la machine à l'application visée.

Le premier axe traite de la préparation de la fabrication, en particulier du choix de la stratégie d'usinage, en évaluant le potentiel de nouvelles trajectoires et en définissant des fenêtres de performance pour les principales stratégies d'usinage. Le deuxième axe a pour objet le choix des procédés implémentés sur MOCN et se focalise sur le formage incrémental, procédé émergent dont les problématiques sont très proches de celle rencontrées en programmation d'opérations d'usinage. Au cours du troisième axe, nous proposons une nouvelle approche de programmation avancée

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

des parcours d'outil : la méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing). Elle permet d'optimiser le déroulement des opérations de fabrication en s'appuyant sur une évaluation par le DCN de données process. Le quatrième axe porte, quant à lui, sur les évolutions à moyen terme en s'intéressant d'un côté aux mutations de l'environnement des MOCN générées par le développement de l'e-manufacturing et d'un autre côté à la mise en place d'un nouveau standard de programmation des machine outils, le format Step_NC. Celui-ci peut tenir lieu de cadre aux optimisations proposées dans les autres axes de recherche, tout en conduisant à de nouvelles avancées en programmation des MOCN.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Chapitre 2. Performances nouvelles des MOCN et choix d'une trajectoire d'usinage

Nous avons montré au chapitre précédent que, pour être efficace, la programmation des trajectoires d'usinage ne peut être générique, mais doit être adaptée à l'application visée. De plus, l'émergence des machines à structure parallèle modifie le panel de stratégies d'usinage disponibles ainsi que leur domaine de performances. Certains types de parcours récents peuvent également devenir compétitifs. Nous étudierons dans ce chapitre les problématiques de mise en œuvre d'une trajectoire d'usinage pour des applications d'ébauche par UGV, en nous intéressant aux performances associées à deux stratégies de fabrication émergentes, le tréflage et l'usinage trochoïdal, lors de leur mise en œuvre sur MOCN à structure parallèle.

2.1 Problématique générale du choix d'une stratégie d'usinage

Le vidage de poches est une problématique centrale du fraisage d'ébauche. La principale contrainte associée est d'obtenir un débit de copeau maximal tout en produisant des surfaces répondant aux spécifications pour faciliter le déroulement des opérations de finition. Pourtant, bien que de nombreux progrès aient été effectués en termes de dynamique et de puissance de machines outils, avec notamment le développement de l'usinage grand vitesse, peu de nouvelles stratégies de fabrication ont été déployées dans les systèmes industriels. De plus, la performance de toute stratégie d'usinage est fortement liée à sa mise en œuvre sur MOCN [Duc2002; Castagnetti2007]. Il est en effet crucial que celle-ci soit adaptée aux capacités du moyen de production choisi, sans quoi les optimisations développées peuvent s'avérer inefficaces. Dans le cas des machines à structure parallèle, il peut ainsi être pertinent

d'évaluer l'efficacité de nouvelles stratégies d'usinage capables de tirer profit de leurs aptitudes.

2.1.1 Stratégies couramment utilisées

Bien que de nombreux travaux aient été publiés en termes de génération de trajectoires, les stratégies développées pour les opérations d'ébauche sont majoritairement basées sur le zigzag ou le contour parallèle. Afin de bien fixer les idées, la Figure 17 propose un exemple de parcours d'outil associé à chacune d'elle.

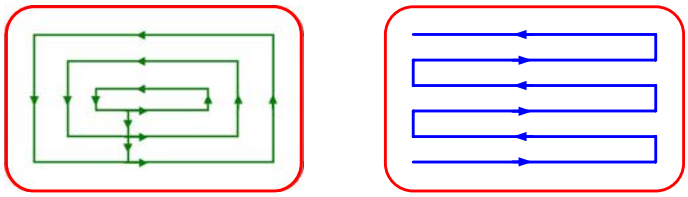


Figure 17 : Stratégies d'usinage en contour parallèle et en zigzag

Les études sur le contour parallèle se sont focalisées sur les diagrammes de Voronoï [Held1998], sur des approches par pixellisation [Choi1997] ou sur des décalages appairés [Choi1999]. Dans ses travaux, Pateloup propose une méthode intéressante basée sur les diagrammes de Voronoï et l'emploi de courbes B-splines lors des changement de direction, ceci dans le but de minimiser le temps d'usinage. Pour ce qui est des stratégies en zigzag, l'accent a été mis sur l'optimisation de la direction de balayage, ceci afin de minimiser la longueur du trajet [Tang1998]. Plus récemment, les caractéristiques technologiques liées aux moyens de fabrications ont été intégrées dans la boucle d'optimisation. La géométrie des trajectoires a été modifiée pour limiter le nombre de discontinuités apparaissant à chaque changement de direction et pouvant réduire l'avance de manière conséquente [Bieterman2001; Pateloup2004]. Après avoir testé plusieurs types de stratégies sur une machine outil, Kim et al. ont montré que les stratégies en zigzag sont plus productives que celles en contours parallèles [Kim2002a].

En ce qui concerne les trajectoires de finition, pour lesquelles les contraintes sont plus sévères, le développement des MOCN cinq axes a considérablement augmenté la capabilité associée au processus d'usinage. Certaines approches d'optimisation sont particulièrement intéressantes, comme celle de la surface d'usinage développée au Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (Cachan) [Duc1999; Lartigue1999; Lartigue2003], qui consiste à générer

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

la trajectoire de l'outil à partir d'une surface d'usinage représentant l'ensemble des positions possibles du point piloté de l'outil.

2.1.2 Adéquation nécessaire de la trajectoire d'usinage avec les capacités de la MOCN

Nous avons montré au chapitre précédent qu'il est nécessaire de rechercher une adéquation maximale entre la MOCN utilisée et l'application mise en œuvre. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de la préparation de la fabrication, lors de la définition des parcours d'usinage. A titre d'exemple, les machines à structure parallèle possèdent des espaces de travail aux propriétés hétérogènes et, pour la majorité des architectures, tout déplacement élémentaire de l'outil nécessite la mise en mouvement de plusieurs axes. Il en résulte l'apparition de problématiques totalement différentes de celles des machines sérielles : la ligne droite n'est plus forcément le trajet le plus rapide entre deux points. A cela s'ajoute le fait que la capabilité de la MOCN est un facteur déterminant pour la sélection optimale d'un parcours d'outil : la gestion des discontinuités du parcours et des changements de direction dépend fortement des capacités cinématiques des axes de déplacement.

De la même manière, les DCN sont aujourd'hui capables de manipuler des formats de données complexes tels que les Nurbs ou les splines, sans nécessiter de temps de calcul importants. La définition de trajectoires d'usinage complexes (trois et cinq axes) se voit ainsi libérée d'un certain nombre de freins, si bien que de nouvelles stratégies d'usinage deviennent compétitives, à condition de pouvoir tirer un maximum profit des moyens de fabrication employés.

Les capacités cinématiques de la machine outil, son architecture et son DCN ont donc une influence importante sur l'implémentation d'une stratégie d'usinage, tant en ébauche qu'en finition [Hascoet2000; Lavernhe2006] ; il est par conséquent impossible de se cantonner à des critères purement géométriques, tel que proposés par un logiciel de FAO, pour définir une trajectoire d'usinage capable de répondre efficacement à la mise en œuvre d'opérations de fabrication sur machine outil.

2.1.3 Stratégies émergeant grâce à l'amélioration des performances des MOCN

Les machines à structure parallèle, de par leurs capacités cinématiques et la puissance des DCN implantés, ouvrent la porte à de nouveaux types de trajectoires restées marginales jusqu'à présent, en particulier pour des questions de productivité.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Ainsi, le tréflage et les trajectoires trochoïdales sont des stratégies d'usinage innovantes qui ont trouvé des domaines d'application dans l'usinage des matériaux durs. Jusqu'à présent, leur application à l'usinage d'alliages d'aluminium est restée très marginale, en particulier parce que ces deux types de trajectoires nécessitent d'une part une dynamique de machine élevée et d'autre part un DCN puissant pour être compétitives.

Il est par conséquent pertinent de rechercher une adéquation maximale entre la MOCN employée et la stratégie d'usinage choisie. Pour cela, nous définirons des fenêtres de performance pour les diverses trajectoires étudiées. Nous évaluerons ainsi l'implémentation sur machine outil de parcours d'usinage de tréflage et d'usinage trochoïdal. Les principales caractéristiques associées à leur mise en œuvre seront exposées en insistant en particulier sur la capabilité de la MOCN en termes de cinématique. Enfin, nous définirons par simulation numérique des critères de choix d'une trajectoire d'usinage associés aux contraintes liées à la géométrie de la pièce à usiner et aux propriétés des moyens de fabrication.

2.2 Le tréflage, une optimisation liée aux performances des MOCN

Le tréflage tire son nom de la forme des empreintes laissées par l'outil lors des plongées axiales successives constituant ce type de trajectoire. Ce procédé de fraisage d'ébauche connaît un succès grandissant dans l'industrie manufacturière. S'il possède un intérêt évident, on ne dispose encore que de peu de données concrètes. L'objet de cette partie est non seulement de montrer la dépendance des performances d'une trajectoire de tréflage aux capacités de la MOCN utilisée mais surtout de proposer des optimisations du processus de fabrication intégrant la programmation et les capacités du moyen (architecture et DCN de la machine outil).

Ainsi, après avoir explicité une méthode de génération de trajectoires de tréflage et certains axes d'optimisation associés, nous évaluerons les résultats concernant les propriétés géométriques des poches usinées, les coûts et les délais de production à l'aide d'une campagne expérimentale. Ensuite, nous montrerons en particulier que les performances d'une stratégie de tréflage dépendent fortement de la MOCN utilisée. Nous nous baserons pour cela sur des outils de simulation développés dans cette optique.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

2.2.1 Principe de mise en œuvre et intérêts pour le vidage de poche

Une trajectoire de tréflage est obtenue par superposition de plongées axiales, la matière étant enlevée par l'outil lors de sa descente (Figure 18). Définir ce type de stratégie d'usinage consiste d'une part à déterminer les points de plongée et d'autre part la manière dont l'outil se déplace entre chacun d'eux. Par opposition avec les stratégies d'usinage radiales (zigzag, contour parallèle, …) où le même motif est répété sur plusieurs couches, une trajectoire de tréflage associe deux types de « sous-trajectoires » : le motif de plongée, qui détermine les mouvements de l'outil à chaque point de plongée, et la courbe guide, qui détermine l'enchaînement entre les différents points de plongée.

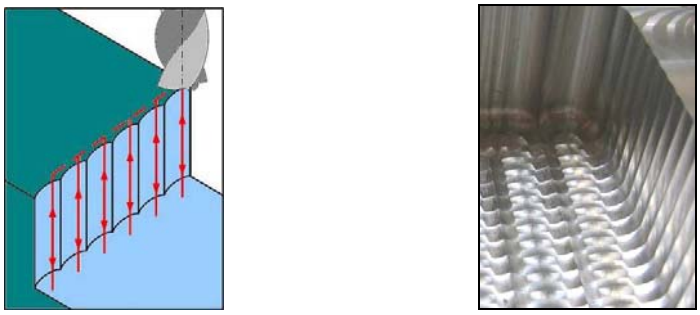


Figure 18 : Principe de l'usinage par tréflage

Les paramètres nécessaires à la définition d'une trajectoire de tréflage sont présentés sur la Figure 19. Ils peuvent être répartis en deux groupes, les paramètres spécifiques aux plongées et les paramètres spécifiques aux courbes guides. Parmi les premiers on distingue $\mathbf{h_{garde}}$, la hauteur de garde, qui positionne le plan de déplacement entre les points de plongée, et **d**, la profondeur de la paroi à usiner. Parmi les seconds on trouve **Δ**, l'incrément radial aussi appelé « pas de tréflage », **e**, l'entre-passes, et **R**, le rayon de l'outil. Notons que la forme de la courbe guide est également considérée comme un paramètre, celle-ci ayant usuellement une forme de zigzag ou de colimaçon (exemple présenté sur la Figure 19).

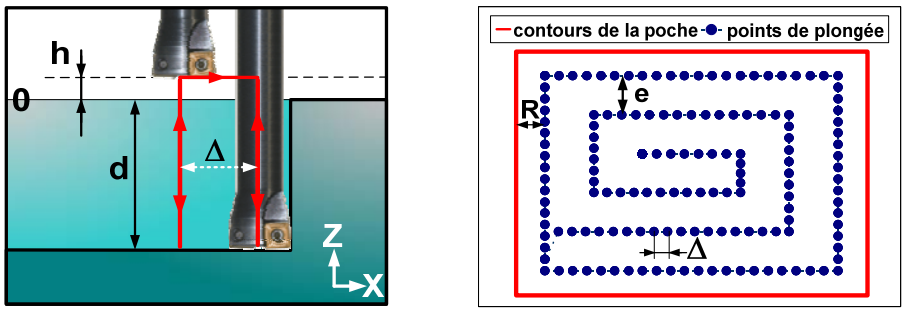


Figure 19 : Paramètres de définition d'une trajectoire de tréflage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

L'intérêt des communautés scientifique et industrielle pour les stratégies de tréflage n'étant relativement que très récent, la littérature dans le domaine est encore assez limitée comparativement aux stratégies d'usinage radial. Ainsi, la plupart des auteurs se focalisent sur des aspects liés aux outils (géométrie, matériau) et à la modélisation des efforts de coupe.

Dans ses travaux publiés en 2004, Guérin [Guérin2004] met en évidence de nombreux avantages du tréflage sur les trajectoires plus classiques. Des essais d'usinage avec des fraises de petits diamètres à plaquettes (Ø16 et Ø20 mm) et carbures monoblocs (Ø3 à Ø8 mm) montrent que, sur certaines plages de fonctionnement, le tréflage permet d'obtenir des gains de productivité significatifs. Une moindre flexion de l'outil ainsi qu'un meilleur dégagement des copeaux, notamment dans le cas de rainurages profonds, sont également observés. Wakaoka [Wakaoka2002] compare le tréflage et l'usinage en flanc pour la réalisation de parois de hauteur importante. Ses conclusions montrent une meilleure conformité et un meilleur état de surface pour le tréflage. Selon le matériau constitutif des arêtes de coupe, on parvient même à augmenter la vitesse de coupe et la durée de vie de l'outil. Une comparaison du tréflage et de l'usinage en flanc est également proposée par Al-Ahmad et al. [Al-Ahmad2005b]. Par la suite, ils déterminent l'influence de certains paramètres d'une opération de tréflage sur sa mise en œuvre [Al-Ahmad2007]. Ces travaux se focalisent néanmoins sur des aspects théoriques et ne prennent pas en compte les capacités cinématiques de la machine outil utilisée.

La même équipe de recherche [Al-Ahmad2005a; Al-Ahmad2006] propose également un modèle prédictif de calcul des efforts de coupe en tréflage consolidé par des essais sur MOCN. Une autre modélisation du processus d'usinage par tréflage est développée par Ko et Altintas [Altintas2006; Ko2007]. L'estimation, non seulement des efforts de coupe, mais aussi du comportement vibratoire et des moments de torsion de l'outil, permet aux auteurs de relier le comportement de l'outil en usinage à ses caractéristiques géométriques et aux conditions de coupe choisies, l'objectif étant d'optimiser la forme des arêtes de coupe et du corps d'outil.

2.2.2 Génération de trajectoires de tréflage optimisées

L'intérêt pour les parcours de tréflage étant assez nouveau, ces stratégies n'ont été intégrées que très récemment dans les logiciels de FAO : les acteurs majeurs du secteur (CATIA, Powermill, Pro-Engineer, ...) ne proposent des stratégies de tréflage, appelées aussi « fraisage par plongées », que dans leurs dernières versions logicielles. La construction des parcours d'usinage se base alors sur une définition de courbes

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

guides à l'aide de grilles ou de profils définis par l'utilisateur et sur une sélection de paramètres de plongée (retraits, incréments, ...). La trajectoire étant ensuite générée automatiquement à partir de ces éléments, il n'est pas facile de mesurer l'impact de chaque paramètre sur le bon déroulement du procédé. De plus, une génération de parcours par logiciel de FAO ne permet généralement pas de relier les performances de la stratégie d'usinage choisie à celle de la MOCN utilisée, ce qui limite l'efficacité des optimisations proposées.

C'est pour ces raisons que nous avons choisi de développer notre propre modèle de génération de trajectoires de tréflage codées directement en langage ISO 6983 [Rauch2007b]. Dans le but d'optimiser le processus de fabrication par une adéquation de la trajectoire d'usinage et des capacités de la MOCN utilisée, il est en effet crucial de maîtriser les paramètres de définition des parcours d'outil. Nous montrerons ainsi que certaines voies d'optimisation de la mise en œuvre des trajectoires de tréflage sur MOCN ne peuvent pas être prises en compte par une génération de type FAO.

2.2.2.1 Modèle de génération de trajectoires de tréflage

La Figure 20 propose des exemples de trajectoires construites par le générateur de trajectoires de tréflage que nous avons développé. Nous avons choisi de nous appuyer dans un premier temps sur deux types de courbes guide, le zigzag et le colimaçon, afin de pouvoir mesurer leurs influences sur la productivité du parcours généré.

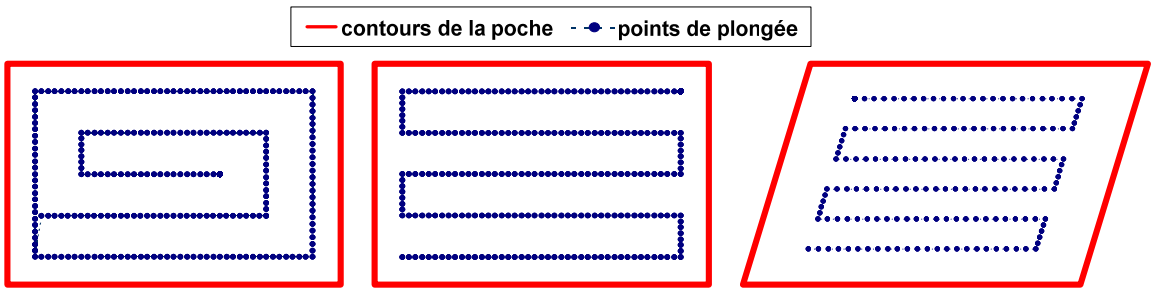


Figure 20 : Exemples de trajets de tréflage générés

Les autres paramètres de définition des parcours sont ceux que nous avons présentés précédemment (voir Figure 19). Il est néanmoins important de préciser que, pour des raisons de répartition uniforme de la matière retirée à chaque plongée, les valeurs exactes de ces paramètres sont calculées par le modèle à partir de valeurs maximales définies en entrée. Afin d'illustrer le propos, les principales étapes de la construction d'un parcours complet sont données par la Figure 21, dans le cas d'une courbe guide en zigzag.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

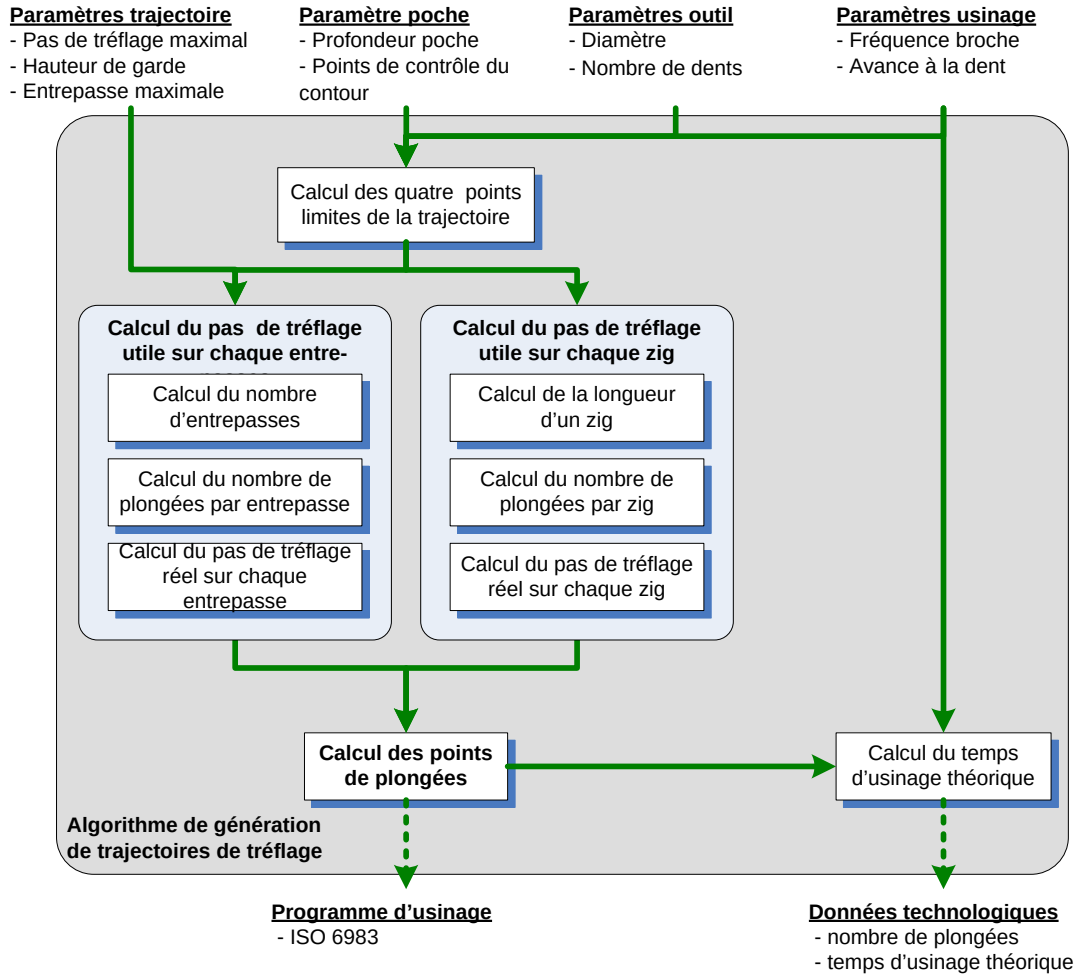


Figure 21 : Modèle de génération de trajectoires de tréflage pour un guide en zigzag

De manière plus large, développer notre propre générateur de trajectoires codées directement sous le format ISO 6983 (codes G) nous a également permis de ne pas dépendre d'une combinaison FAO/post-processeur pour la définition de l'optimisation des parcours de tréflage. Il a ainsi été possible de produire des trajets s'adaptant directement au DCN de la MOCN employée.

2.2.2.2 Optimisation du trajet de raccordement entre deux plongées

De par leur nature, les trajectoires de tréflage présentent de nombreuses discontinuités géométriques. Chacune d'entre elles génère un ralentissement des axes de la MOCN, dont l'amplitude dépend fortement des capacités cinématiques (accélération, jerk) et des paramètres de programmation. Une diminution de ces discontinuités, notamment au niveau des trajets de raccordement entre deux plongées successives, permettrait ainsi d'optimiser la mise en œuvre de ces stratégies d'usinage sur MOCN. Cette partie de la trajectoire, réalisée hors matière, est d'autant plus adaptée qu'une modification de sa géométrie n'a aucune incidence sur le rendu final de la pièce.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Le plus fréquemment, le trajet de raccordement est constitué d'un simple segment reliant les deux plongées dans un plan normal à l'axe de l'outil. S'il s'agit sans conteste du trajet de liaison le plus court, il n'est pas le plus « facile » à parcourir pour la MOCN. En effet, il génère d'une part deux discontinuités importantes en tangence (90°) qui forcent les axes machine à réduire leurs vitesses pour les franchir sans encombre et, d'autre part, il possède une longueur faible (quelques millimètres) sur laquelle la MOCN n'a pas le temps d'atteindre sa vitesse programmée.

De plus, la mise en œuvre de stratégies de tréflage sur machines à structure parallèle nous offre des possibilités nouvelles d'optimisation. En effet, leur comportement atypique (en comparaison de celui d'une machine sérielle) permet de proposer des approches d'optimisation originales, dont la validité n'apparaît pas à première vue. Nous avons par conséquent développé d'autres géométries de trajet de raccordement (Figure 22). L'objectif de ce paragraphe n'est pas de déterminer la géométrie universelle optimale mais plutôt d'indiquer des bases d'optimisation liées à la programmation des trajectoires de tréflage associée à leur implémentation sur MOCN, en fonction des performances et du comportement de celle-ci.

Tout d'abord, des trajets de raccordement faits d'arcs de cercles tangents aux segments de plongées ont été testés. Bien que le parcours soit plus long que dans le cas d'un segment de droite, le programme d'usinage s'exécute plus vite sur MOCN (essais réalisés sur la machine parallèle VERNE pour des pas de tréflage compris entre 3 et 9 mm). Ce gain peut s'expliquer par la suppression de la discontinuité de position et de vitesse créée par le remplacement du segment de droite. Seule subsiste une discontinuité d'accélération, cette dernière passant du mode linéaire au mode centripète au niveau du point de jonction entre la remontée et le trajet de prise de pas.

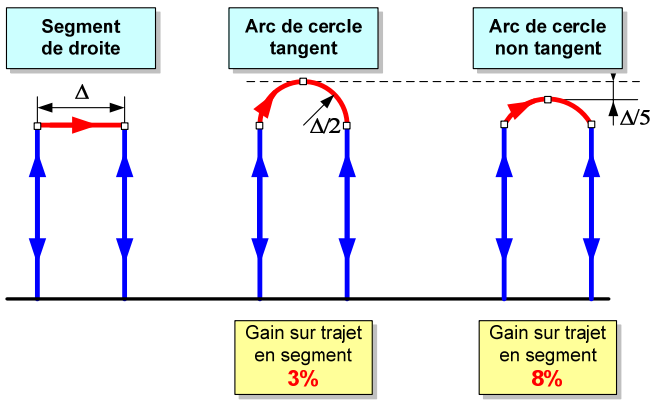


Figure 22 : Optimisation du trajet de prise de pas de tréflage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Un trajet constitué d'un arc dont le rayon est supérieur à la moitié du pas de tréflage permet encore de diminuer le temps d'usinage. Le trajet présente alors deux discontinuités, mais il est aussi plus court que dans le cas d'un demi-cercle tangent. Nous avons montré de manière expérimentale que le temps d'usinage passe par un minimum, pour les valeurs de pas testées, lorsque le point supérieur de l'arc de cercle est situé au cinquième du pas de tréflage Δ. Pour ces géométries de trajet, le comportement cinématique de la MOCN n'est pas perturbé de manière significative par les discontinuités.

Les résultats que nous présentons n'ont pas de vocation générique, mais ils indiquent de manière explicite qu'il faut tenir compte de la MOCN employée pour définir la trajectoire de tréflage optimale, le trajet le plus court n'étant pas systématiquement le plus productif ; de plus, la géométrie des trajets de raccordement entre plongées n'ayant pas d'influence sur les surfaces usinées, celle-ci peut constituer un lieu d'optimisation approprié, en particulier pour les machines à structure parallèle, qui présentent un comportement spécifique en usinage.

2.2.3 Implémentation sur MOCN : résultats expérimentaux

Nous présentons dans cette partie les résultats d'une étude expérimentale destinée à étudier la mise en œuvre de stratégies de tréflage sur MOCN [Hascoet2006b; Rauch2007a]. Pour cela, nous avons choisi d'usiner sur la MOCN VERNE des poches de dimensions 160 x 100 x 40 mm (L x l x h) à partir d'un brut en alliage d'aluminium de type aéronautique. Un outil de tréflage de diamètre 32 mm à 2 dents a été employé ; les conditions de coupe ont été choisies de manière à se trouver au maximum des capacités fournies par le carburier, bien que ces valeurs soient plutôt adaptées aux stratégies classiques.

Une spécificité importante du tréflage réside dans la discontinuité du processus de coupe. Il est alors possible de définir des cycles, que nous appellerons désormais « cycle de tréflage ». Ceux-ci sont constitués d'une plongée, d'une remontée et d'un trajet de raccordement jusqu'au point de plongée suivant.

En outre, pour disposer d'éléments de comparaison, des poches de mêmes caractéristiques ont été vidées dans un premier temps à l'aide d'une trajectoire de zigzag. Cette stratégie d'usinage radial est largement employée dans l'industrie car elle offre une bonne productivité, est facile à visualiser et offre un chargement d'outil constant sur une longueur [Sarma1999]. Deux jeux de conditions de coupe ont été utilisés pour ces essais, le premier est identique à celui utilisé en tréflage, le second est

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tiré des préconisations fournisseur pour obtenir des performances idéales. Le Tableau 3 rassemble les conditions de coupe utilisées pour chaque stratégie.

	Vitesse de coupe m/min	Avance mm/dent	Entre-passes mm	Pas radial mm	Profondeur de passe mm
tréflage	2413	0.35	25.00	11.00	
zigzag-1	2413	0.35	25.00		6.66
zigzag-2	1508	0.26	25.00		6.66

Tableau 3 : Conditions de coupe utilisées pour les essais de tréflage

Les critères d'analyse sélectionnés pour cette étude ont été les propriétés géométriques des surfaces usinées, les efforts de coupe et la productivité associés à chaque essai.

2.2.3.1 Analyse des efforts de coupe

Les efforts d'usinage ont été mesurés pour chaque essai à l'aide d'une table dynamométrique Kistler à trois composantes. Les résultats obtenus pour le tréflage sont donnés sur la Figure 23 (pour un cycle de tréflage).

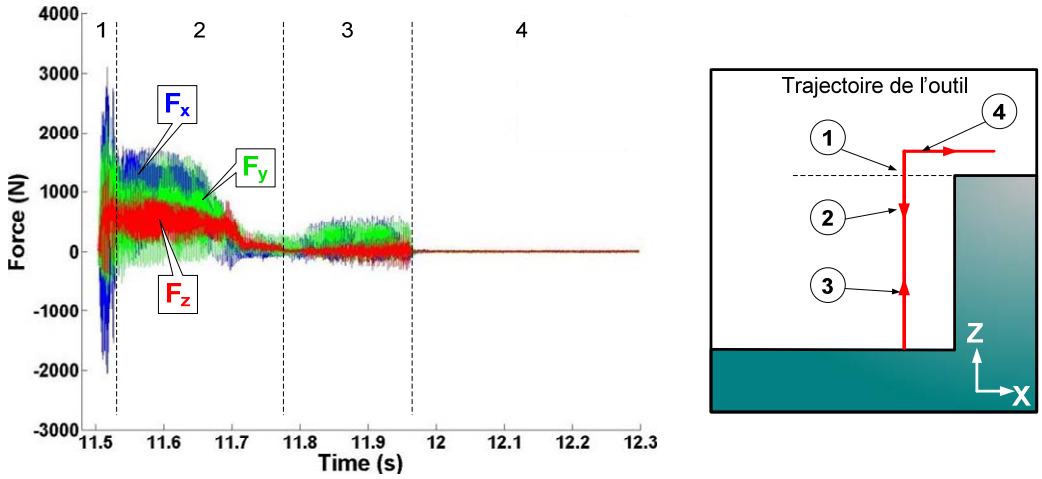


Figure 23 : Mesures d'efforts pour un cycle de tréflage

Etant donné que les relevés d'effort présentent une excellente répétabilité, nous nous focaliserons pour la suite sur un seul cycle de tréflage. Celui-ci peut être divisé en 4 phases (Figure 23):

1. entrée en matière. A cause des vibrations ou d'une trop faible hauteur de coupe, les forces relevées sont supérieures à celles des autres phases
2. descente selon Z. L'outil travaille avec les conditions de coupe programmées.
3. remontée selon Z. L'outil frotte sur la surface usinée lors de la phase 2.
4. déplacement hors matière pour atteindre le point de plongée suivant.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Le principal résultat qui apparaît est que, pour les paramètres opératoires choisis, les efforts selon l'axe Z sont inférieurs à ceux dans le plan XY, contrairement aux idées préconçues sur le tréflage. Nous rejoignons ainsi les travaux de Al-Ahmad et al. [Al-Ahmad2006] et de Furet et al. [Furet2006]. De plus, si l'on souhaite un meilleur état de surface sur les flancs, la phase 3 peut être supprimée en décalant l'axe de l'outil lors de sa remontée.

La Figure 24 propose les acquisitions relatives aux trois dernières couches de l'essai zigzag-1. Les chutes observées à l'intérieur de chacune d'entre-elles mettent en évidence les discontinuités de parcours à chaque changement de direction. L'outil est beaucoup plus sollicité que pour le tréflage.

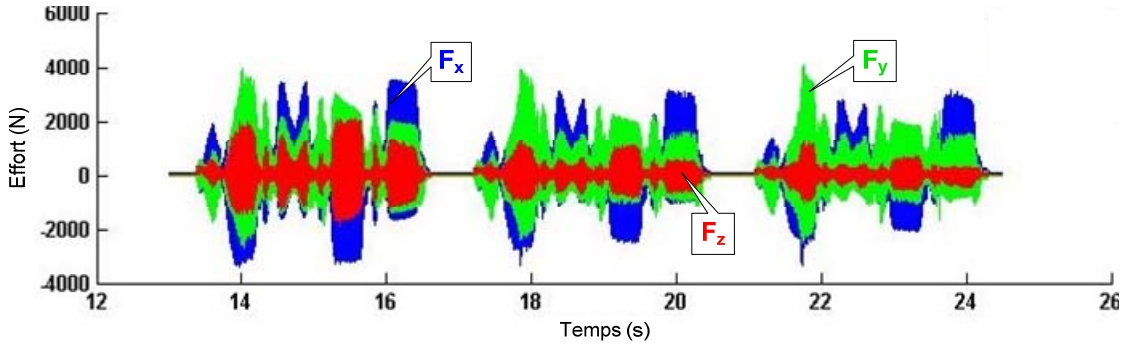


Figure 24 : Relevé d'efforts pour l'essai en zigzag

Un relevé d'effort a également été effectué pour zigzag-2 (N=15000 tr/min, V_f=7700 mm/min). Les résultats sont du même type que ceux obtenus pour zigzag-1 (N=24000 tr/min, V_f=16800 mm/min), avec néanmoins des valeurs nettement plus importantes. Les paramètres de coupe étaient pourtant plus faibles. Ce constat peut s'expliquer par l'apparition de vibrations au niveau du porte-pièce, celui-ci n'offrant pas la rigidité suffisante du fait de la présence d'une platine dynamométrique. Ainsi, les résultats de mesure de la platine ont pu être faussés.

Les données d'effort pour chaque essai sont consignées dans le Tableau 4. L'effort maximal mesuré a été obtenu directement par le maximal de chaque courbe d'effort total (norme euclidienne du vecteur effort à chaque instant). L'effort moyen est obtenu par un calcul de moyenne sur toute la durée de l'essai.

	Effort maximal mesuré	Effort moyen sur l'essai
tréflage	3693 N	430 N
zigzag-1	5671 N	1235 N
zigzag-2	7050 N	1878 N

Tableau 4 : Efforts relevés pour chaque essai

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

On note ainsi un écart important entre l'effort maximal et l'effort moyen sur l'essai de tréflage, dû aux nombreux déplacements hors matière. Les efforts générés par les trajectoires de zigzag sont, quant à eux, beaucoup plus importants. Cette situation laisse présager de la possibilité d'employer des conditions de coupe plus sévères en tréflage qu'en zigzag pour une même puissance de broche disponible.

2.2.3.2 Aspects liés à la productivité

Les débits annoncés sur la Figure 25 sont obtenus à partir des temps mesurés lors de l'usinage de chaque pièce. Ces valeurs sont donc non seulement associées à la géométrie de la trajectoire d'usinage, mais aussi au comportement cinématique de la machine outil face à chaque type de stratégie.

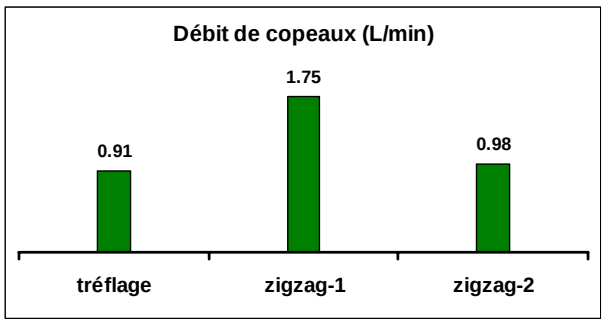


Figure 25 : Débit de copeaux associé à chaque stratégie

A paramètres de coupe égaux et pour la poche étudiée, le zigzag produit un débit deux fois plus important que le tréflage. Cela ne s'explique qu'en partie par la longueur des trajets générés : 4228 mm pour le zigzag contre 5408 mm pour le tréflage, soit un écart d'environ 20 %.

Le critère cinématique a donc une influence importante sur la productivité du tréflage : la productivité de ce type de trajectoires est fortement liée aux performances dynamiques de la machine outil utilisée. Ceci fait l'objet d'une étude plus approfondie au paragraphe *2.2.4 Définition d'une MOCN capable.*

2.2.3.3 Propriétés géométriques des surfaces usinées

Une inspection du fond de chaque poche usinée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle nous a permis d'évaluer le défaut de planéité associé à chaque type de trajectoire.

Les deux stratégies de zigzag testées offrent des résultats acceptables. Le défaut de planéité obtenu est inférieur à 0.2 mm ; il est même de 0.1 mm sur 90 % de la surface pour l'essai zigzag-1. Le défaut observé en fin de trajectoire (partie

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

inférieure droite des relevés de la Figure 26) trouve sans doute sa cause dans une usure anormale de l'outil observée après l'usinage et dans la présence de vibrations.

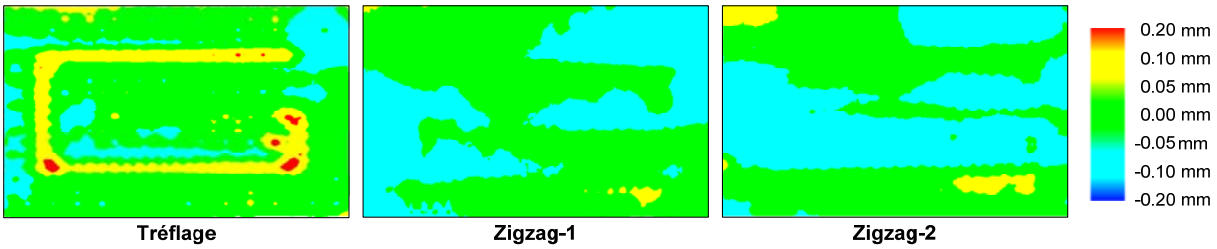


Figure 26 : Relevés de planéité sur le fond de poche usinée par tréflage

L'erreur mesurée est plus importante pour le tréflage où elle approche 0.3 mm. Cela vient principalement de la géométrie de l'outil utilisé et non de la discontinuité de la trajectoire : comme indiqué sur la Figure 27 la valeur de l'angle entre le bas de la plaquette et l'axe de l'outil utilisé est de 87°, ceci de manière à optimiser le travail de l'outil. De plus, l'outil ne dispose pas de coupe au centre. Par conséquent, la surface générée par une plongée d'outil n'est pas plane en fond de poche. Ailleurs, le défaut est inférieur à 0.1 mm.

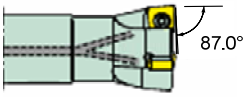


Figure 27 : Détail de l'outil de tréflage

Nous nous sommes également intéressés aux parois verticales. Si les deux types de stratégies donnent de bons résultats, la perpendicularité est meilleure en utilisant le tréflage. En cela, nous rejoignons les travaux de Wakaoka et al [Wakaoka2002].

2.2.4 Définition d'une MOCN capable

Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe traitant des aspects de productivité, les performances des trajectoires de tréflage sont directement liées aux capacités cinématiques de la machine outil utilisée. Nous définissons donc dans cette partie des éléments de capabilité de MOCN pour la mise en œuvre d'applications de tréflage.

Nous avons pour cela développé un simulateur de temps d'usinage par tréflage permettant de rendre compte du débit réel atteignable sur une MOCN donnée. Celui-ci est constitué de plusieurs interfaces, selon les résultats recherchés. Un exemple est donné sur la Figure 28.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

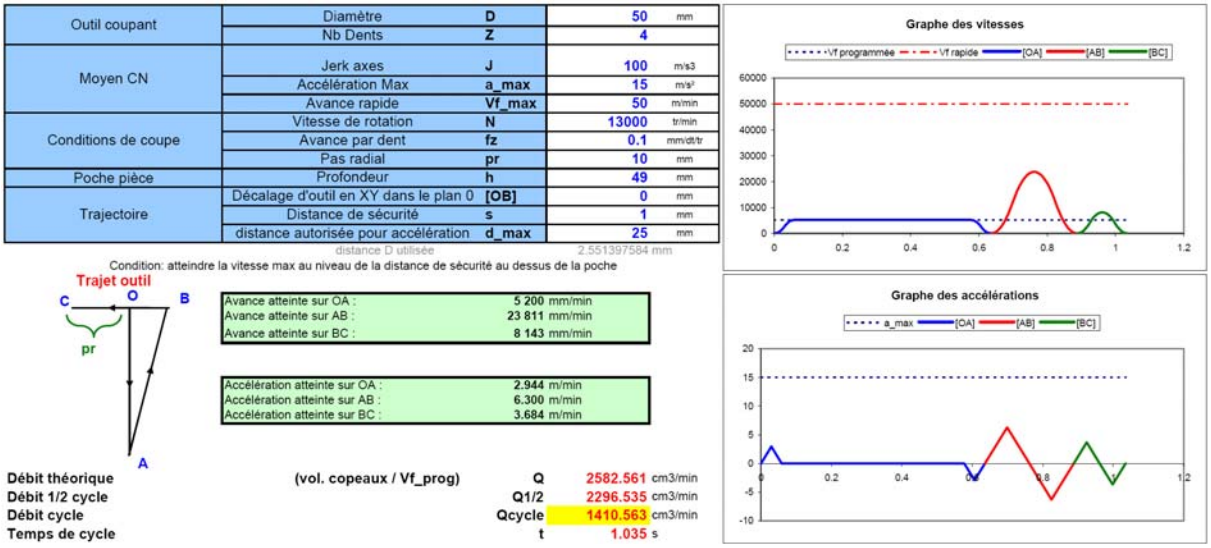


Figure 28 : Exemple d'interface de l'outil de simulation développé

Le recours à un tel outil a été motivé par un manque au niveau industriel, notamment à propos de l'évaluation de la productivité associée aux stratégies d'ébauche en tréflage. Plus précisément, deux objectifs ont été associés à cette action, d'une part mesurer les débits atteignables en utilisant un parc machines donné et d'autre part définir les performances cinématiques optimales, d'un point de vue technico-économique, à intégrer au cahier des charges de définition d'un moyen d'usinage. En effet, les performances cinématiques d'une MOCN résultent de la combinaison de nombreux facteurs : dynamique de la structure (jerk, accélération, vitesse, ...), performances du contrôleur CN, capacités de la broche, ... Ainsi, une augmentation drastique des capacités cinématiques d'une MOCN ne s'accompagne pas obligatoirement de gains significatifs en termes de productivité.

2.2.4.1 Mise en évidence de l'importance de la dynamique de la MOCN

Pour chaque essai de la campagne expérimentale, nous avons comparé le temps d'usinage théorique, que nous appelons « temps FAO » et pour lequel la trajectoire est entièrement parcourue à la vitesse programmée, avec le temps réel, mesuré lors de l'usinage sur la machine à structure parallèle. Les résultats sont donnés sur la Figure 29.

Le tréflage présente l'écart le plus important avec une différence de 50% entre le temps FAO et le temps mesuré. Cela vient du fait que cette stratégie présente beaucoup de discontinuités, en particulier sur l'axe Z, où on observe une inversion du vecteur vitesse lorsque l'outil amorce sa remontée. En effet, du fait des limitations du contrôleur CN et des actionneurs de la machine, chaque discontinuité importante du parcours d'usinage se traduit par une chute de la vitesse d'avance [Dugas2002]. Ainsi,

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

le parcours en zigzag présente 51 discontinuités tandis que le parcours de tréflage en présente 159, soit plus de trois fois plus ; les chutes de vitesse d'avance seront donc plus nombreuses en tréflage qu'en zigzag. En outre, l'écart entre temps FAO et temps mesuré est inférieur pour l'essai zigzag-2 (18%) en comparaison de l'essai zigzag-1 (32%) ; cela vient du fait que, la vitesse d'avance programmée étant plus faible, les ralentissements aux discontinuités sont moins importants et ont une influence moindre sur le temps d'usinage total.

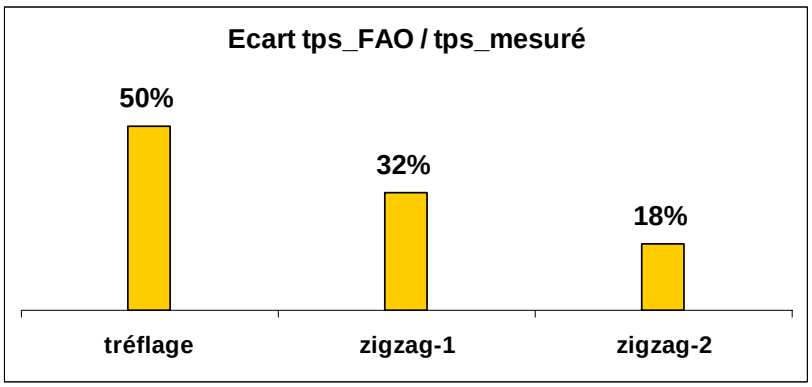


Figure 29 : Ecarts entre temps FAO et temps mesuré

Ces premiers résultats montrent donc l'importance de disposer d'une dynamique élevée (au sens vitesse, accélération et jerk) et d'une commande numérique adaptée à ces performances pour que les stratégies de tréflage bénéficient d'une productivité intéressante.

2.2.4.2 Débit réel en fonction des capacités de la MOCN

Au vu des écarts importants entre les temps FAO et les temps mesurés sur machine outil, nous avons décidé de développer un simulateur de débit réel en tréflage intégrant le comportement cinématique de la machine outil utilisée, afin de pouvoir disposer de temps d'usinage représentatif sans essais sur MOCN.

Le cœur du simulateur de débit est constitué d'un modèle cinématique de commande d'axe numérique basé sur un pilotage à Jerk constant. S'il ne s'en inspire pas, ce modèle rejoint ceux développés par Erkorkmaz [Erkorkmaz2001] et Pateloup [Pateloup2005]. Il calcule les profils de vitesse, d'accélération et de jerk ainsi que le temps d'usinage associés au parcours d'un trajet linéaire, en fonction des capacités cinématiques de l'axe numérique (jerk, accélération, vitesse) et des paramètres de programmation du trajet (distance à parcourir, vitesse programmée).

Pour évaluer le débit associé à une trajectoire de tréflage, nous avons choisi de travailler sur un seul cycle, soit une plongée, une remontée et un décalage. Ceci donne

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

une image satisfaisante du débit réel associé au vidage d'une poche complète étant donné la répartition uniforme des plongées sur l'ensemble du parcours d'usinage. En pratique, les débits réels sont obtenus en prenant en compte à la fois la géométrie de la trajectoire (pas de tréflage, retrait à la remontée, hauteur de garde), les capacités cinématiques de la machine outil utilisée (jerk programmé, accélération maximale, vitesse maximale), les conditions de coupe (fréquence de broche, avance par dent), l'outil utilisé (diamètre, nombre de dents) ainsi que les caractéristiques de la poche (profondeur). Afin d'optimiser la productivité, seul le mouvement de plongée est effectué à vitesse d'avance de travail (v_{prog}), les deux autres segments le sont en utilisant la vitesse maximale de la machine outil (v_{max}).

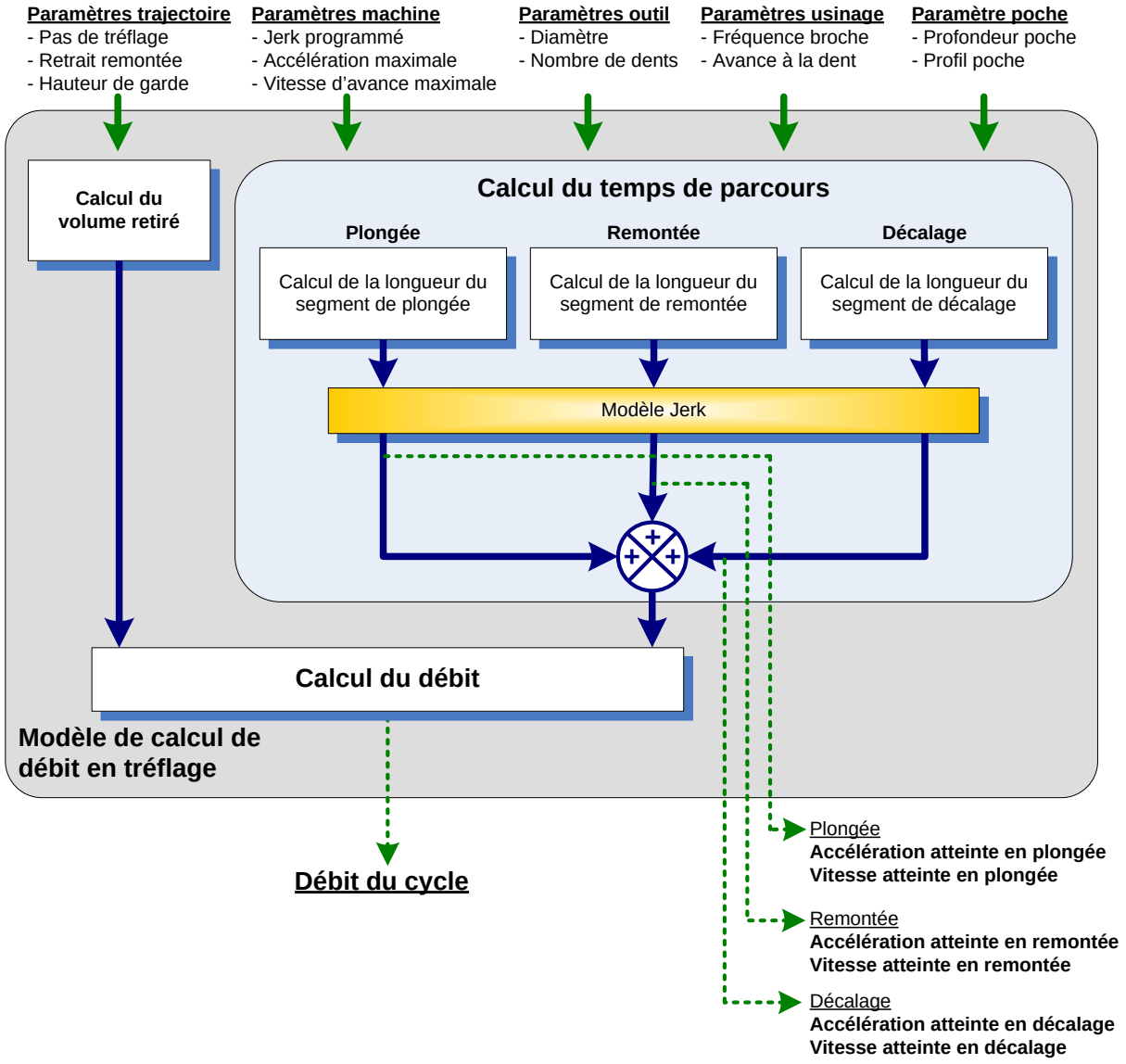


Figure 30 : Modèle de calcul de débit en tréflage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Comme le montre la Figure 30, le principe du simulateur de débit est d'appliquer le modèle de pilotage par jerk présenté plus haut à chaque segment d'un cycle de tréflage. Ce choix implique l'hypothèse d'une vitesse nulle à chaque changement de bloc, ce qui correspond à une programmation avec arrêt précis aux points programmés (fonction G60 sous Siemens 840D). Ceci n'est pas gênant pour un trajet de tréflage dans la mesure où cet arrêt est effectif entre une plongée et une remontée.

Pour calculer le débit associé à la combinaison de paramètres étudiée, nous déterminons le volume de matière retiré à partir de la section de copeaux $S_{copeaux}$ retirée à chaque plongée. Celle-ci est modélisée sur la Figure 31.

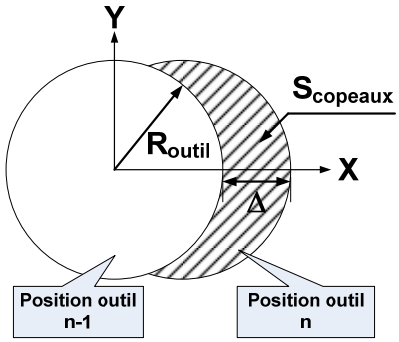


Figure 31 : Surface retirée lors d'une plongée

Le calcul de la surface de cette section à partir des paramètres de programmation de la trajectoire est obtenu par l'équation (1) :

$$S_{copeaux} = \pi.R_{outil}^{2} - 2.R_{outil}^{2}.\arccos\left(\frac{\Delta}{2.R_{outil}}\right) + \Delta.R_{outil}.\sqrt{1-\left(\frac{\Delta}{2.R_{outil}}\right)^{2}} \qquad (1)$$

Au final, le modèle que nous avons développé permet de calculer le débit réel atteint par une trajectoire de tréflage donnée en tenant compte à la fois des capacités de la machine outil utilisée et du comportement cinématique de celle-ci. Nous allons donc pouvoir l'appliquer sur des cas réels de MOCN à structures parallèle et sérielle, l'objectif étant de mesurer la relation entre les performances du moyen de production et le débit obtenu en tréflage.

2.2.4.3 Comparaison des performances des MOCN

Il est communément admis que les opérations de tréflage sont essentiellement destinées aux poches profondes. Nous avons montré qu'elles demandent également des capacités cinématiques importantes pour être concurrentielles. Nous avons donc fait évoluer le simulateur de débit réel en tréflage pour pouvoir mesurer l'évolution du

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

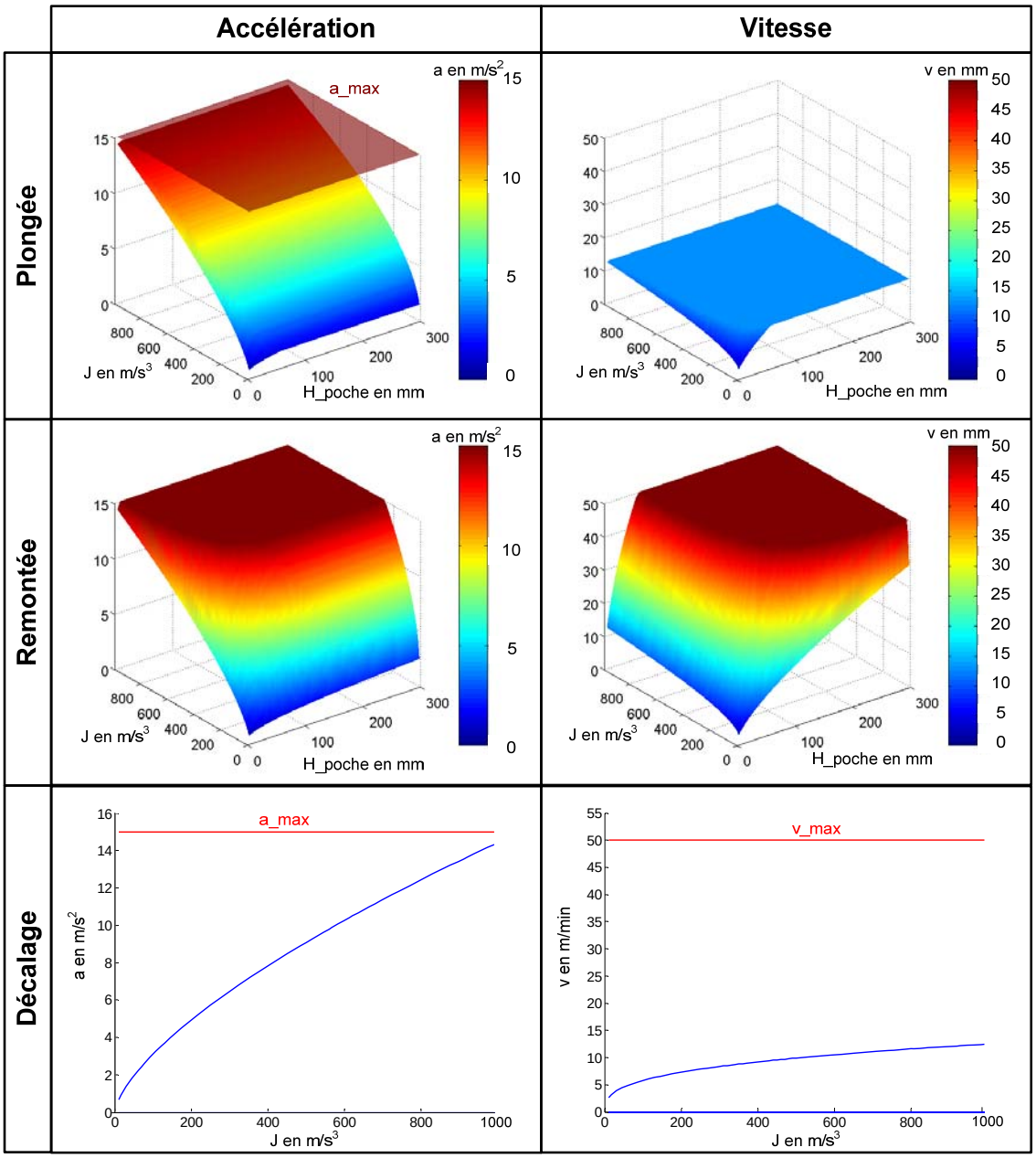
temps de production en fonction des réglages et des propriétés cinématiques de la MOCN ainsi que de la géométrie de la poche à usiner, le but étant de déterminer la stratégie d'usinage la plus adaptée à un moyen d'usinage donné et de répondre à deux problématiques complémentaires : d'une part, quelle performance attendre d'un moyen de fabrication donné et d'autre part, quelle MOCN choisir pour obtenir les performances optimales.

Dans cette optique, l'évolution du simulateur a pour premier objet de mesurer le débit atteignable par une combinaison MOCN-outil de coupe donnée lors d'opérations de vidage de poche. Les variables étudiées sont le jerk programmé et la profondeur de la poche, les autres étant fixés par la MOCN et l'outil de coupe. Il nous a également paru pertinent d'indiquer les valeurs réelles de l'accélération maximale et la vitesse d'avance atteinte pour chaque phase du cycle de tréflage, afin d'évaluer la contribution de chaque phase à la performance générale de l'opération, mais aussi de visualiser les marges de progression possibles.

La Figure 32 présente un exemple de graphes-résultats obtenus avec l'outil de simulation développé. Il s'agit d'une trajectoire de tréflage implémentée sur la machine VERNE (a_{max}=15 m/s², v_{max}=50 m/min) et dont les paramètres sont : $Ø_{outil}$=40 mm, Z=4, fz=0.2 mm/dt/tr, Vc=2000 m/min, Δ=6 mm, h_{garde}=1 mm, $retrait_{remontée}$=0 mm. Pour cette étude, le Jerk varie de 5 m/s³ à 1000 m/s³ et la hauteur de poche de 1 mm à 300 mm.

Ainsi, sur l'exemple traité, la phase de plongée n'exploite pas toute l'accélération disponible du fait de la faible valeur de vitesse d'avance programmée. Par contre, lors de la remontée effectuée à vitesse machine maximale, il y a rapidement saturation en vitesse et en accélération. En conséquence, et pour cette phase, augmenter le Jerk au-delà de 150 m/s³ ne conduit pas à une diminution du temps de parcours. De plus, c'est la phase de décalage qui est la plus limitante : l'écart entre vitesse programmée (dans cette phase v_{max}) et vitesse réelle est lié à la faible longueur de trajet. Enfin, un dernier graphe expose le débit réel atteint pour les paramètres donnés en fonction du jerk programmé et de la profondeur de la poche. On y établit d'une part que, sur la MOCN VERNE, le tréflage ne peut fournir une productivité supérieure à 1400 cm³/min pour les poches dont la hauteur est inférieure à 50 mm, ceci quel que soit le réglage du jerk. D'autre part, pour les valeurs usuelles de profondeur de poche, c'est-à-dire, comprises entre 0 et 150 mm, la valeur du jerk n'a quasiment plus aucune influence sur la productivité au-dessus de 150 m/s³.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009



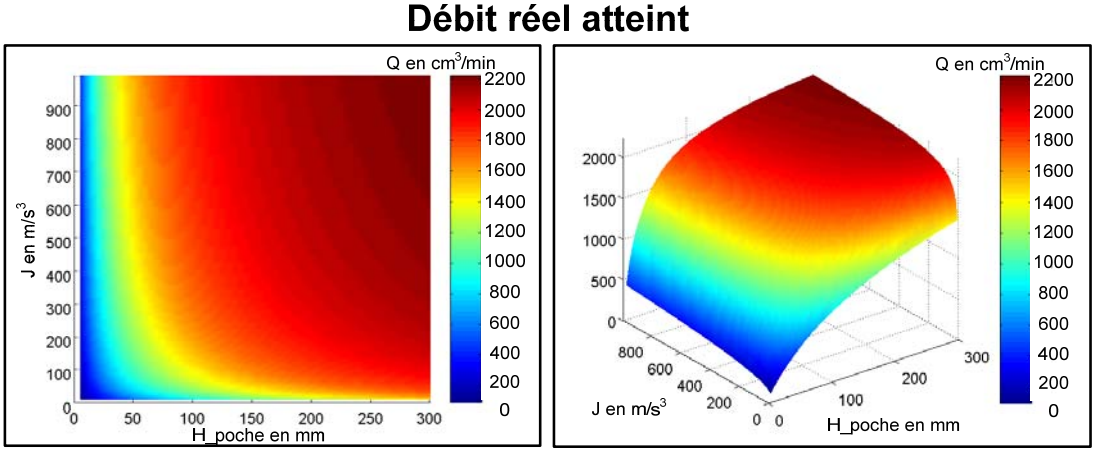


Figure 32 : Performances de la MOCN VERNE pour une opération donnée de tréflage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Cette situation démontre l'intérêt de l'outil de simulation mis en place, en particulier lors de la rédaction de cahiers des charges de MOCN. En effet, il montre que des valeurs de paramètres cinématiques très importantes ne conduisent pas à des gains significatifs de productivité mais définissent un moyen « surcapable ».

En outre, il est possible grâce à cet outil d'adapter la stratégie d'usinage au moyen de production. On peut ainsi par exemple rapidement évaluer la viabilité économique du tréflage sur une MOCN donnée en fonction des caractéristiques de la poche à usiner.

Dans un second temps, nous allons répondre à la seconde problématique, la définition de la MOCN optimale vis-à-vis de la productivité parmi un parc machine hétérogène. Cette démarche s'applique également à la définition du cahier des charges des performances cinématiques lors de l'acquisition d'un nouveau centre d'usinage.

D'un point de vue pratique, cette étude s'appuie sur une comparaison des débits atteignables en tréflage en fonction des caractéristiques cinématiques d'un échantillon de MOCN (par exemple, celui d'un atelier de production donné).

Dans le cadre de nos travaux, nous avons retenu un panel de huit MOCN représentatives des performances actuelles des moyens de production UGV : quatre machines à structure parallèle (PKM n°1 à 4) et quatre machines à structure sérielle (SKM n°1 à 4). Nous nous sommes délibérément restreints aux valeurs de vitesse d'avance maximale et d'accélération maximale de chacune des MOCN. Ainsi, les différences en termes d'architecture, notamment pour les machines parallèles, ou en termes de commande numériques n'ont pas été prises en compte. De même, comme le tréflage peut très bien être implémenté sur une machine 3 axes, le nombre d'axes des machines outils n'a pas été retenu comme critère de sélection.

Les performances cinématiques nominales pour chaque MOCN sont présentées dans le Tableau 5. Outre le fait que les machines parallèles présentent globalement des capacités cinématiques plus élevées que les machines sérielles, celles-ci sont plus homogènes dans le sens où une réserve d'accélération importante s'accompagne d'une réserve de vitesse importante. A l'inverse, comme l'indiqueront les résultats de la comparaison de débit, c'est principalement la capacité d'accélération qui fera défaut aux machines sérielles.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

	PKM n°1	PKM n°2	PKM n°3	PKM n°4	SKM n°1	SKM n°2	SKM n°3	SKM n°4
Vitesse maximale (m/min)	50	90	100	40	60	20	30	18
Accélération maximale (m/s²)	15	20	35	5	10	3	2	3

Tableau 5 : Performances cinématiques du panel de MOCN testées

La Figure 33 synthétise le comparatif de débit réel en tréflage pour le panel de MOCN testé. Celui-ci a été réalisé à l'aide d'une extension du simulateur calculant le taux d'enlèvement matière pour chaque MOCN en fonction de ses capacités cinématiques. Pour tous les cas, les paramètres d'usinage ont été les mêmes que pour l'étude des performances de la MOCN VERNE seule : $Ø_{outil}$=40 mm, Z=4, fz=0.2 mm/dt/tr, Vc=2000 m/min, Δ=6 mm, h_{garde}=1 mm, $retrait_{remontée}$=0 mm.

Nous avons ainsi pu mesurer l'évolution du débit atteint pour chaque machine en fonction du Jerk (variant de 5 m/s^3 à 1000 m/s^3) et de la hauteur de poche (variant de 1 mm à 300 mm).

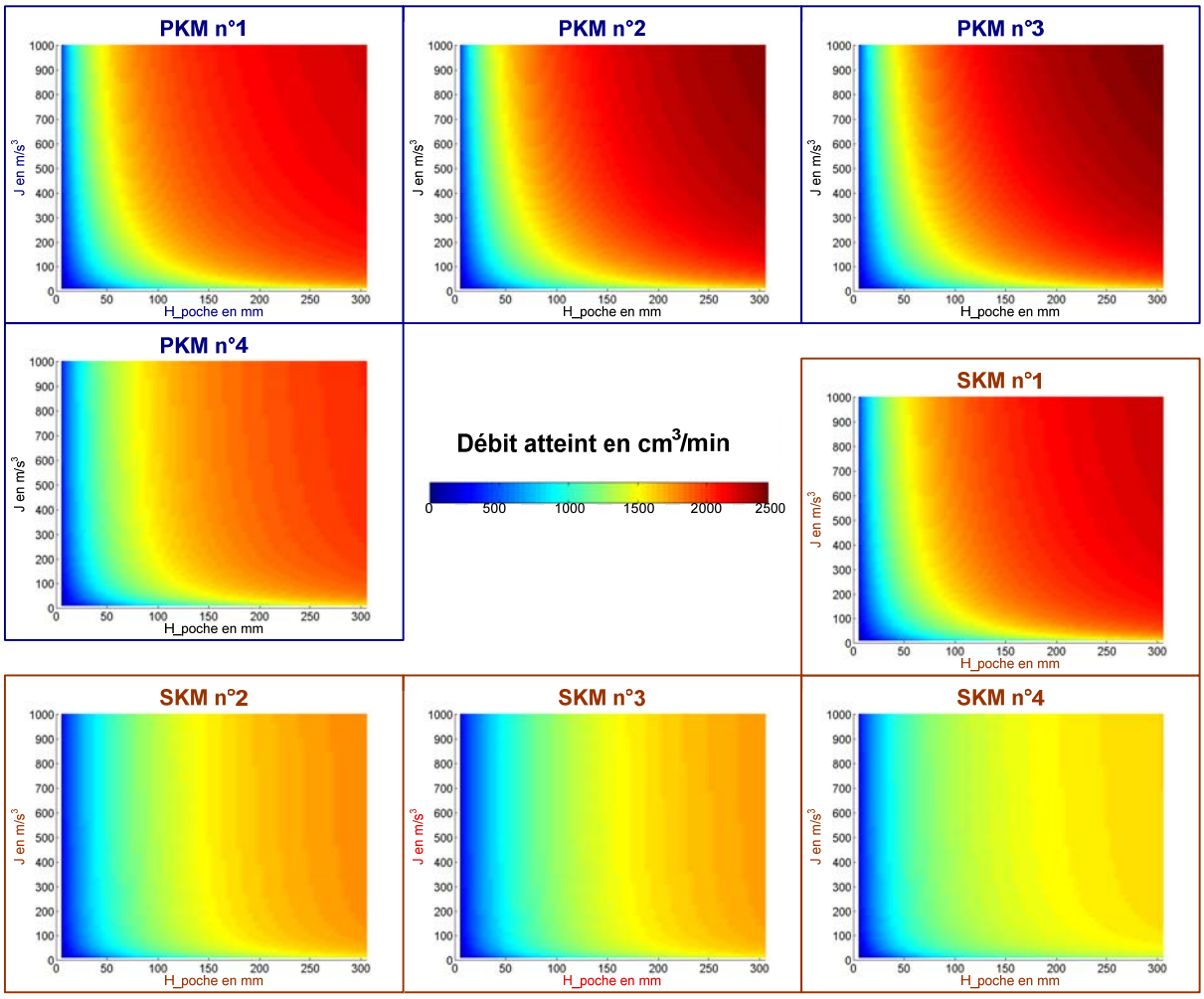


Figure 33 : Comparatif des débits atteints pour le panel de MOCN testées

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Ces résultats de simulation montrent que les machines sérielles peinent à offrir un débit supérieur à 1500 cm^3/min alors que l'on dépasse les 2000 cm^3/min avec les machines parallèles. Seule la SKM n°1 rivalise avec les PKM. On retrouve également le fait que, pour les poches de profondeur usuelles, à partir de 150 m/s^3, augmenter le jerk ne permet pas d'augmenter la productivité.

D'une manière générale, les courbes d'isodébit présentent toutes la même topologie. En dessous d'un certain seuil, c'est le jerk qui influe massivement sur le débit atteignable ; au-dessus la productivité est fixée par la hauteur de poche. Seules les machines à performances cinématiques élevées échappent à cette règle pour les régions à hauteur importante et jerk important. La combinaison de valeurs élevées pour les deux paramètres permet de gagner encore en débit mais en proportion relativement faible. De plus, les cas pratiques d'usinages à de telles hauteurs de poche sont très rares.

Enfin, en extrapolant ces résultats et en les complétant par des simulations, réalisées à l'aide de l'outil développé, sur des machines fictives à performances incohérentes (vitesse maximale faible couplée à une très forte accélération et inversement), nous pouvons modéliser les variations de la surface de débit en fonction des capacités cinématiques de la MOCN.

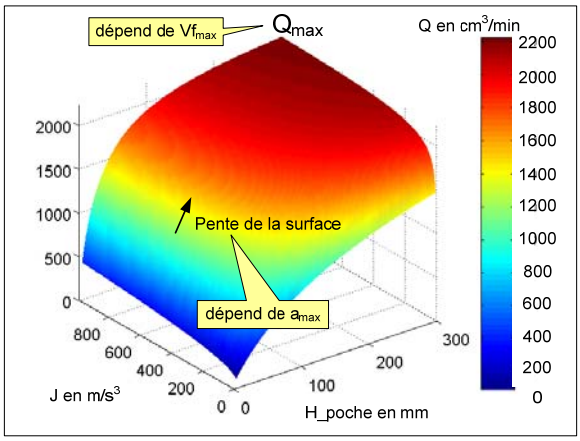


Figure 34 : Variations de la surface de débit

Ainsi en notant Q le débit associé au jerk j, à la profondeur de poche h comme indiqué par la relation (2), nous montrons que la limite de vitesse de l'axe Vf_{max} définit le sommet de la surface de débit (équation (3), où $Q_{max} = Q(j_{max}, h_{max})$ représente le débit maximal atteignable) tandis que la limite d'accélération fixe les pentes de cette surface et la rapidité à laquelle on atteint le sommet, comme modélisé par l'équation (4), comme représenté su la Figure 34.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

$$\forall (j,h) \in [0, J_{\max}] \times [0, h_{\max}], \exists f(a_{\max}, Vf_{\max}) : \begin{matrix} \mathbb{R}^{+2} \to \mathbb{R} \\ j,h \mapsto Q = f(j,h,a_{\max}, Vf_{\max}) \end{matrix} \quad (2)$$

$$\exists \alpha \in \mathbb{R}^{+}, Q_{\max} = \alpha . Vf_{\max} \quad (3)$$

$$\forall (j,h) \in [0, J_{\max}] \times [0, h_{\max}], \exists \beta \in \mathbb{R}^{+}, \left\| \left(\frac{\partial Q}{\partial j}, \frac{\partial Q}{\partial h} \right) \right\| = \beta . a_{\max} \quad (4)$$

Dans les équations (3) et (4), les réels α et β tiennent lieu de coefficients de proportionnalité. Leur valeur est fonction des propriétés de la MOCN et des paramètres de la trajectoire programmée.

2.2.5 Conclusions

Dans cette partie, nous avons étudié la mise en œuvre d'applications de tréflage sur MOCN. Nous avons montré que les performances de ce type de parcours d'usinage sont fortement liées à celle du moyen d'usinage employé.

La définition de notre propre modèle de génération de trajectoires nous a, dans un premier temps, permis de proposer et de mettre en œuvre des optimisations pour la définition des trajets. Ensuite, une étude expérimentale menée sur la MOCN parallèle VERNE du laboratoire a mesuré la mise en œuvre de ces stratégies innovantes sur MOCN selon des critères de conformité, de coûts et de productivité. Nous avons notamment montré que, si les propriétés géométriques des surfaces produites sont tout à fait comparables à celles obtenues par des stratégies plus classiques comme le zigzag, la productivité d'un parcours de tréflage dépend particulièrement des capacités cinématiques de la MOCN employée. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des outils de simulation développés dans le but de prévoir la productivité associée à une combinaison donnée MOCN-application de tréflage. Nous avons également pu montrer par ce biais qu'il est important de pouvoir s'appuyer sur des simulations pour savoir quelle stratégie d'usinage il est préférable de mettre en œuvre, dans le but d'optimiser le choix d'un moyen de production capable.

Notre étude a ensuite mis en évidence que la productivité d'une trajectoire de tréflage dépend des aptitudes cinématiques de la MOCN utilisée. Nous nous sommes basés sur des résultats issus des outils de simulation développés. Dans un premier temps, l'évaluation des performances accessibles sur une MOCN donnée a été effectuée. Puis, nous avons dans un second temps défini les capacités nécessaires et suffisantes de la machine outil pour atteindre un objectif de productivité fixé, ceci dans le but de choisir la MOCN optimale parmi un parc connu ou de rédiger un

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

cahier des charges de machine spécifique à un besoin. En particulier, nous avons montré que les machines à structure parallèle, grâce à l'importance et à l'homogénéité de leurs aptitudes cinématiques, sont parfaitement adaptées à une implémentation efficace d'opérations de tréflage. Cette action s'est appuyée sur une extension du simulateur de débit en tréflage, développée dans le but de comparer diverses MOCN au regard d'une stratégie de tréflage donnée. De manière générale, les outils de simulation mis au point conduisent non seulement à l'évaluation de la productivité accessible par une stratégie de tréflage pour une application donnée, mais surtout à la définition d'une MOCN capable d'optimiser la mise en œuvre de ce type de parcours.

2.3 L'usinage trochoïdal, une réponse pour les cas d'usinage difficiles

Tout comme le tréflage, l'usinage trochoïdal est un type de trajectoire d'usinage émergent grâce à l'augmentation des performances des moyens de fabrication. Le principe d'une courbe trochoïdale est de faire décrire à l'outil de coupe une courbe de courbure continue, lui évitant ainsi de travailler en pleine matière. Comme nous le montrerons par la suite, elles permettent donc de contrôler l'engagement axial de l'outil ce qui conduit à une meilleure gestion des efforts de coupe.

Dans cette partie, après avoir présenté de manière détaillée les courbes trochoïdales, nous mettrons en place un algorithme de génération de trajectoires trochoïdales pour le vidage de poche. Nous l'appliquerons ensuite pour la mise en œuvre d'une campagne expérimentale. Celle-ci aura pour objectif d'évaluer les performances de ce type de stratégies d'usinage en se focalisant notamment sur des aspects de propriétés géométriques des surfaces produites, de productivité et d'efforts de coupe. Il s'agira également de définir la capabilité du moyen de fabrication relativement à ce type de parcours d'usinage.

2.3.1 Principe de mise en œuvre et intérêts pour le vidage de poche

D'un point de vue mathématique, on désigne par trochoïde la courbe obtenue par la combinaison d'un mouvement circulaire uniforme et d'un mouvement linéaire uniforme. Par exemple, sur la Figure 35, le point B tourne de manière uniforme autour du point A, lui-même étant animé d'un mouvement linéaire.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

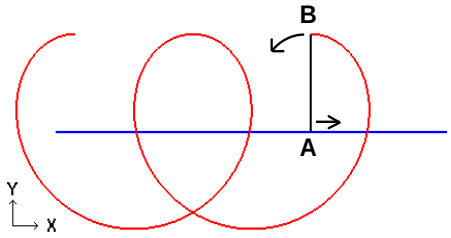


Figure 35 : Mouvement trochoïdal

Une équation paramétrée d'une trochoïde est donnée dans le plan complexe par l'équation (5) ; ce qui, en coordonnées cartésiennes, correspond au système d'équations (6), en utilisant les paramètres suivants : **V**, vitesse du centre du cercle dans son mouvement rectiligne uniforme, **R**, rayon du cercle (R>0), **ω** pulsation (ω>0) et **t**, paramètre de la courbe (t>0).

$$z = V.t + R.e^{i.\omega.t} \tag{5}$$

$$\begin{cases} x = V.t + R.\cos(\omega.t) \\ y = R.\sin(\omega.t) \end{cases} \tag{6}$$

Par la suite, nous appellerons « courbe guide », la courbe du type de celle suivie par le point A de la Figure 35. Celle-ci définit en effet la direction générale de déplacement. Elle permet également de positionner le mouvement trochoïdal, le point B effectuant ses révolutions autour de la courbe guide.

Le principal atout des parcours trochoïdaux (Figure 36) est de présenter un rayon de trajectoire continu conduisant le processus d'usinage à se dérouler dans des conditions favorables (pas de chocs, moins de marquage de la pièce, …).

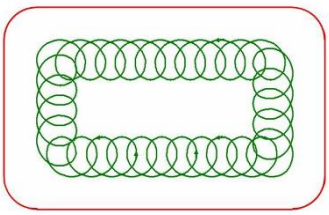


Figure 36 : Exemple de trajectoire d'usinage trochoïdal

Tout comme le tréflage, l'usinage trochoïdal est un type de stratégie encore jeune et l'on trouve peu de travaux sur le sujet. Néanmoins, des études de rainurage dans des matériaux durs effectuées par Guérin [Guérin2004] ont montré une productivité multipliée par deux par rapport aux stratégies classiques. Les forces de coupe et le temps de contact outil-pièce sont moindres. La durée de vie de l'outil peut aussi être augmentée. Guérin insiste toutefois sur la nécessité de définir des

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

morphologies types de pièce pour lesquelles les gains en usinage trochoïdal sont significatifs. Plus récemment, Otkur et al. [Otkur2007] ont proposé une modélisation de l'usinage trochoïdal en vue de prédire les efforts de coupe dans des cas simples. Celui-ci est basé sur une interpolation circulaire du trajet. De plus, les auteurs proposent d'enrichir ce type de parcours par l'utilisation de doubles trochoïdes, permettant ainsi d'augmenter la productivité de ce type de trajet. Ces trajectoires génèrent néanmoins des configurations alternant usinage en avalant et usinage en opposition, ne pouvant être mises en œuvre pour certains couples outil-matière. De plus, l'ensemble des travaux présentés se focalise sur des opérations de rainurage basées sur des interpolations circulaires du mouvement trochoïdal. A cela s'ajoute le fait que la cinématique de la MOCN employée n'est pas prise en compte.

Face à cette situation, nous avons développé notre propre méthode de définition de trajectoires trochoïdales optimisées, basées sur des parcours respectant les modèles mathématiques de définition d'une trochoïde.

2.3.2 Génération de trajectoires trochoïdales optimisées

De la même manière que pour le tréflage, nous avons décidé de développer notre propre algorithme de génération de trajectoires trochoïdales pour des applications de vidage de poche [Rauch2007b]. Ce choix a été motivé par la possibilité de mieux maîtriser les paramètres opératoires et leur influence sur le bon déroulement du process. Mais surtout, il permet, contrairement aux logiciels de FAO qui emploient une interpolation circulaire, de construire un parcours d'outil basé sur une courbe trochoïdale au sens mathématique du terme. Nous montrerons dans un premier temps l'intérêt du format trochoïdal par rapport à l'interpolation circulaire, avant d'exposer en détail le principe de génération de trajectoires développé, celui-ci aboutissant à un parcours d'outil exempt de toute discontinuité.

2.3.2.1 Intérêt du format trochoïdal par rapport à l'interpolation circulaire

Deux modèles coexistent pour la description de trajectoires trochoïdales : le modèle circulaire et le modèle trochoïdal (Figure 37). Le premier est très utilisé, notamment par les logiciels de FAO, bien qu'il ne soit qu'une approximation de la courbe trochoïdale par des segments de droite et des arcs de cercle. A l'inverse, si le second respecte parfaitement les propriétés mathématiques de continuité d'une trochoïde, la définition du trajet est plus complexe. Ce dernier format n'est donc quasiment pas employé, malgré ses avantages.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

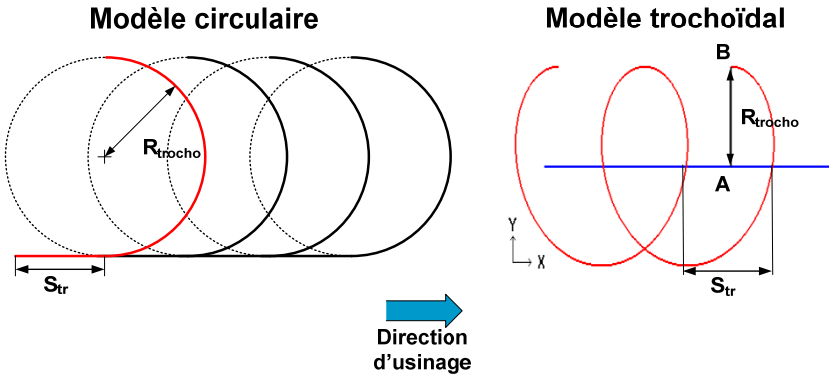


Figure 37 : Modèles circulaire et trochoïdal

En pratique, ces deux formats de description ne conduisent pas au même comportement de la MOCN en usinage. Ainsi, le modèle trochoïdal produit des parcours d'outil qui ne sont pas symétriques : le point de rebroussement n'est pas situé sur l'axe de déplacement (que parcourt le centre du cercle de définition de la trochoïde). La différence de forme entre les deux types de modèles est illustrée par la Figure 38 en utilisant le jeu de paramètres suivants : un rayon d'outil R_{outil} de 6 mm, un rayon trochoïdal R_{trocho} de 4 mm et un pas trochoïdal S_{tr} de 2 mm.

Cette différence de forme influe de manière importante sur l'évolution de l'engagement radial instantané. Comme le point de rebroussement du modèle trochoïdal est décalé par rapport à celui du modèle circulaire, le point de la courbe correspondant à l'engagement radial maximal l'est également. De plus, comme le montre la partie droite de la Figure 38, la valeur de cet engagement maximal est plus faible pour le modèle trochoïdal pour les paramètres précités.

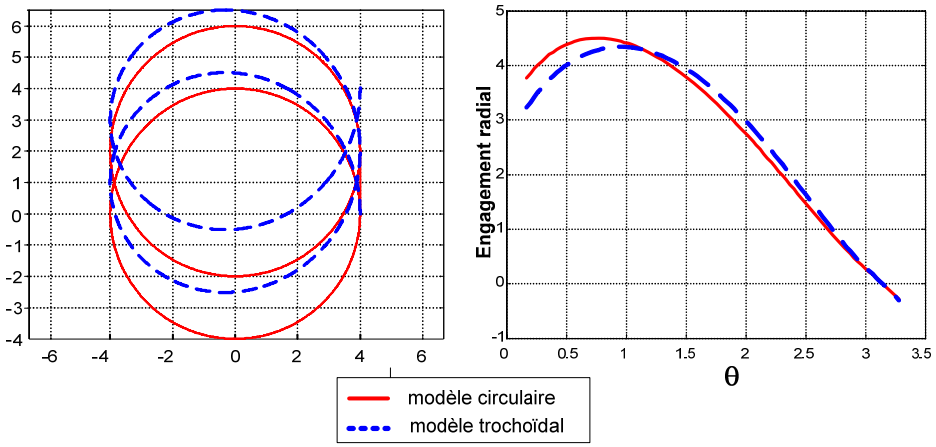


Figure 38 : Comparaison des modèles circulaire et trochoïdal

Ce résultat est confirmé et généralisé par une étude statistique, réalisée au Laboratoire de Mécanique et Ingénieries de Clermont-Ferrand, portant sur le calcul

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

de l'engagement radial pour un grand nombre de combinaisons de paramètres (R_{trocho}, R_{outil}, S_{tr}) : l'engagement radial associé au modèle trochoïdal est inférieur à celui associé au modèle circulaire. Cet écart croît lorsque S_{tr} augmente et lorsque R_{trocho} diminue, c'est-à-dire lorsque la valeur de l'engagement radial augmente. En pratique, la valeur de cet écart n'est réellement profitable que pour les valeurs importantes d'engagement radial (évitant toutefois un engagement pleine fraise), c'est-à-dire 60 à 70% du diamètre de l'outil : l'emploi du modèle trochoïdal conduit à une réduction de 25% du temps d'usinage car le pas trochoïdal peut être augmenté de 25% pour un même engagement radial maximal.

Le format de description trochoïdal est donc beaucoup plus performant que le modèle d'interpolation circulaire pour la mise en œuvre sur MOCN. Il autorise en effet une diminution significative du temps d'usinage par rapport au modèle circulaire, pour un même engagement radial maximal de l'outil. De plus, il permet de retranscrire pleinement la continuité d'un parcours trochoïdal et améliore ainsi la fluidité des déplacements de la MOCN, car la géométrie du parcours ne présente aucune discontinuité. C'est donc ce format que nous avons choisi pour générer les trajectoires trochoïdales.

Le format circulaire reste néanmoins bien adapté aux méthodes de choix des paramètres par calcul numérique. En effet, il permet de déterminer rapidement la combinaison des paramètres (R_{trocho}, R_{outil}, S_{tr}) répondant à un engagement radial donné ; les résultats, très proches de ceux obtenus en se basant sur le format trochoïdal et nécessitant un processus itératif, sont tout à fait exploitables. Il sera donc employé de manière préférentielle pour les premières étapes de détermination des paramètres de programmation des trajets trochoïdaux.

2.3.2.2 Génération d'une trajectoire exempte de discontinuités

Lors de l'usinage d'une poche complète, les principales problématiques résident dans le franchissement des discontinuités géométriques du trajet ; l'objectif du modèle développé est de produire des trajectoires continues (évitant ainsi les chutes de vitesse d'avance) et permettant de maîtriser l'engagement radial. C'est pourquoi, la définition mathématique du trajet trochoïdal présentée par l'équation (6) a été modifiée afin de pouvoir prendre en compte la géométrie de la poche.

La courbe guide est ainsi définie à l'aide de segments de droite ; chacun d'entre eux est caractérisé par un point de départ $M_i(X_i, Y_i)$, une direction $V_i(V_{xi}, V_{yi})$, et une longueur l_i. Nous ferons également appel à un paramètre t_i, défini à l'aide de l'équation (7) :

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

$$\forall i \in [\![1,n]\!], \begin{cases} t_1 = 0 \\ t_{i+1} = t_i + \dfrac{l_i}{S_{tr}} \end{cases} \quad \text{avec } S_{tr}\text{, le pas trochoïdal} \qquad (7)$$

Par suite, le mouvement trochoïdal sur chaque segment linéaire de courbe guide est défini par la relation (8). La Figure 39 propose deux exemples de trajectoires générées.

$$\forall t \in [\![t_i, t_{i+1}]\!], \begin{cases} x(t) = X_i + V_{xi}.S_{tr}(t - t_i) + R_{trocho}.\cos(2.\pi.t) \\ y(t) = Y_i + V_{yi}.S_{tr}(t - t_i) + R_{trocho}.\sin(2.\pi.t) \end{cases} \qquad (8)$$

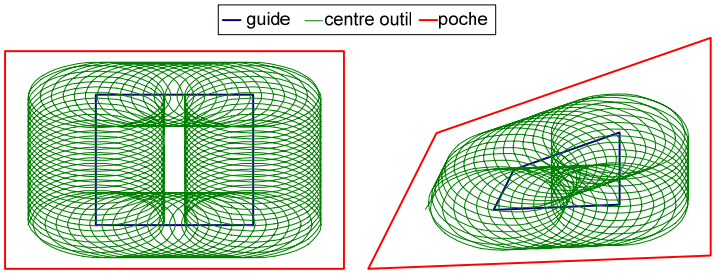


Figure 39 : Exemples de trajets trochoïdaux générés

De plus, ce choix de modélisation permet de s'affranchir des deux types de discontinuités liées à la génération d'un parcours de vidage de poche. Le premier apparaît lors d'un changement de direction de la courbe guide, en basculant sur le point M_{i+1} et au vecteur directeur V_{i+1} ; le second se produit lors du passage d'une couche à l'autre, la principale problématique à résoudre se situant au niveau de la prise de passe axiale depuis la fin de la passe précédente jusqu'à la profondeur de passe souhaitée.

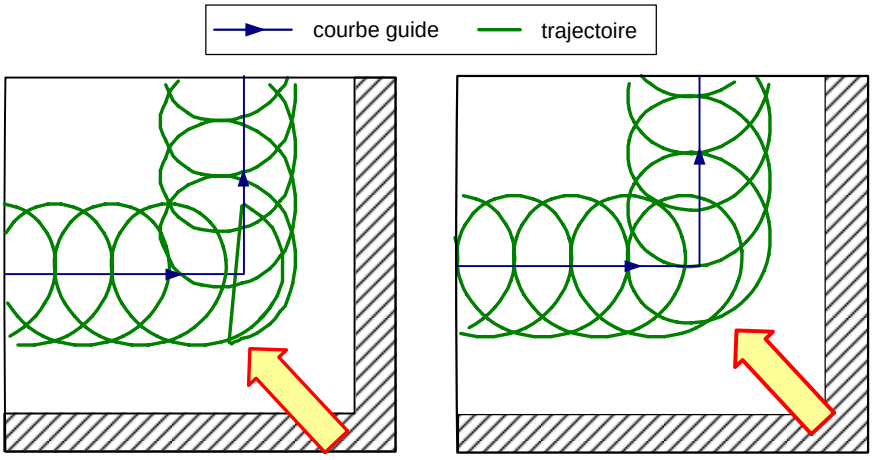


Figure 40 : Gestion des discontinuités de la courbe guide

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Ainsi, nous nous affranchissons de la discontinuité lors du changement de segment de courbe guide. L'utilisation du paramètre t_i uniquement pour la composante linéaire du mouvement trochoïdal crée un découplage entre la composante linéaire et la composante circulaire : le taux de rotation n'est pas affecté par les changements de segment guide, ce qui assure la continuité des trajectoires générées sur toute la passe effectuée à altitude constante (Figure 40).

En faisant appel à une plongée trochoïdale, notre approche tient également compte du trajet de liaison entre deux couches successives, contrairement à la majorité des trajectoires d'usinage par couche (contour parallèle, zigzag,...) qui s'appuient sur des plongées hélicoïdales ou des rampes. Un exemple de plongée trochoïdale est proposé sur la Figure 41. On observe une similitude avec un motif hélicoïdal ; cependant, la présence du pas trochoïdal S_{tr} (celui-ci n'ayant pas de composante selon l'axe z) permet de se rapprocher de la trajectoire utilisée pour vider le reste de la couche. Afin d'éviter le talonnage de l'outil, il convient également de s'assurer que la pente de courbe guide associée à la plongée trochoïdale est adaptée à l'outil utilisé.

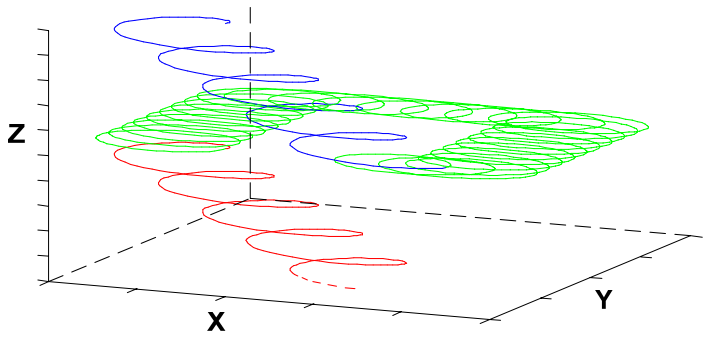


Figure 41 : Prise de passe trochoïdale entre deux couches

Lorsque la profondeur programmée est atteinte, l'outil continue sa trajectoire, mais en conservant une altitude constante. Il n'y a ainsi pas de discontinuité entre la plongée et l'usinage de chaque couche. De même, à la fin de l'usinage d'une couche, l'outil enchaîne directement par une plongée trochoïdale assurant ainsi la continuité de la trajectoire.

Par conséquent, le vidage d'une poche complète est assuré par une seule et unique trochoïde. Cela permet de s'affranchir de toute discontinuité le long du parcours. La productivité associée à ce type de trajet est ainsi améliorée car aucun arrêt du mouvement trochoïdal n'est nécessaire durant l'usinage de toute la poche. D'autre part cette situation tend à améliorer la qualité des surfaces usinées. En effet,

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

aucun marquage de la pièce dû à une discontinuité de trajectoire ne sera observé. Concernant l'outil de coupe, la plongée trochoïdale entre deux couches supprime les surcharges liées habituellement aux plongées en matière, ce qui est bénéfique du point de vue de l'usure.

2.3.3 Implémentation sur MOCN : Résultats expérimentaux

Nous avons mené une étude expérimentale visant à évaluer les performances associées à la mise en œuvre de stratégies de vidage de poches par usinage trochoïdal [Hascoet2006b; Rauch2007a], dans le même esprit que le tréflage. L'objectif était également d'étudier le comportement de la MOCN face à ces parcours d'outil atypiques. En pratique, les conditions expérimentales ont été sensiblement les mêmes que pour l'étude de tréflage : les dimensions de la poche ont été 160 x 100 x 40 mm (L x l x h), celle-ci a été usinée dans un brut en alliage d'aluminium de type aéronautique à l'aide de la MOCN VERNE. Un outil de coupe de 32 mm de diamètre à 2 dents a été utilisé. Deux trajets trochoïdaux ont été testés, les conditions de coupe associées sont rassemblées dans le Tableau 6.

	Vitesse de coupe m/min	**Avance** mm/dent	**Pas trochoïdal** mm	**Profondeur de passe** mm
trochoïde-1	2413	0.35	8	6.66
trochoïde-2	2413	0.35	2	13.50

Tableau 6 : Conditions de coupe utilisées pour les essais d'usinage trochoïdal

L'étude a porté sur l'évaluation des efforts de coupe, de la productivité ainsi que des propriétés géométriques des surfaces usinées.

2.3.3.1 Analyse des efforts de coupe

Les efforts de coupe ont été acquis à l'aide d'un dynamomètre Kistler pour chacun des deux essais. Les résultats ont permis de conforter une hypothèse communément admise au sujet des parcours trochoïdaux, à savoir la valeur relativement faible des efforts de coupe. Comme on peut le voir sur la Figure 42, l'écart entre les pics d'efforts mesurés (3668 N pour l'essai 1) et la valeur moyenne de l'effort de coupe sur une révolution trochoïdale (386 N pour l'essai 1) est très important. A titre comparatif, ces valeurs sont de 5671 N pour l'effort maximal relevé et 1235 N pour l'effort moyen dans le cas d'un trajet en zigzag utilisant une profondeur de passe de 6.66 mm et une entre-passes de 25 mm est de 4440 mm.

Ces efforts de coupe relativement faibles permettent donc d'utiliser des trajets trochoïdaux dans les cas où les efforts sur l'outil doivent être minimisés, par exemple

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

pour limiter son usure. De plus, les trajectoires trochoïdales permettent de maîtriser l'engagement radial instantané. Les courbes d'effort total de la Figure 42 montrent en effet que selon la combinaison de paramètres R_{trocho}-R_{outil},-S_{tr} choisie, l'évolution de l'engagement radial n'est pas la même.

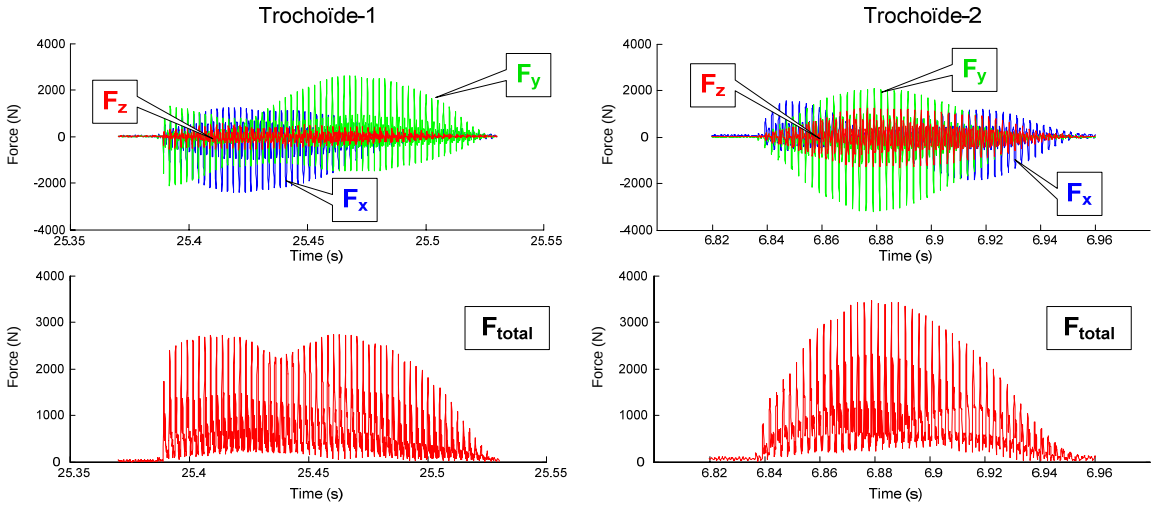


Figure 42 : Relevés d'efforts de coupe sur une révolution trochoïdale

2.3.3.2 Aspects liés à la productivité

Du fait même de la forme des parcours générés, les trajectoires trochoïdales sont pénalisées par rapport aux trajets plus classiques comme le zigzag. En effet, l'étude basée sur la mesure des efforts de coupe en usinage trochoïdal a montré que l'outil ne travaille que 50 à 60% du temps. Ainsi, la longueur du trajet pour vider la poche test est de 15270 mm pour l'essai 1 et 29388 mm pour l'essai 2. A titre comparatif, la longueur d'un trajet en zigzag utilisant une profondeur de passe de 6.66 mm et une entre-passes de 25 mm est de 4440 mm, soit quatre fois moins que pour l'essai trochoïde-1.

Par conséquent, pour disposer de temps de fabrication similaires à un trajet en zigzag, une stratégie trochoïdale doit faire appel à des vitesses d'avance et des vitesses de coupe beaucoup plus élevées que les parcours en zigzag. Au regard des capacités actuelles des moyens de production (outils, MOCN, …), il est très difficile de remplir ces conditions.

2.3.3.3 Propriétés géométriques des surfaces usinées

Le fond de chaque poche usinée a été inspecté sur machine à mesurer tridimensionnelle afin d'en évaluer le défaut de planéité. Les résultats, présentés sur la Figure 43, confirment ce que la forme d'une courbe trochoïdale laissait à penser :

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

comme l'outil repasse plusieurs fois au même endroit et élimine ainsi les crêtes d'usinage, le défaut de planéité finalement obtenu est assez faible, même en utilisant des pas trochoïdaux assez importants. Un défaut de planéité inférieur à 0.1 mm a été en effet obtenu sans aucune optimisation. Cette valeur est plus importante au centre de la poche dans le cas de l'essai trochoïde-1 car les plaquettes de l'outil de coupe possèdent un rayon de 2 mm ; un rayon plus petit corrigerait ce défaut. Toutefois, le défaut de planéité est moindre pour l'essai trochoïdes-2 qui s'appuie sur un pas trochoïdal plus petit.

En conclusion, l'utilisation de trajectoires trochoïdales pour des opérations d'ébauche autorise à se passer de finition dans la majorité des cas courants. Cette situation pourrait ainsi compenser le manque de productivité associé à ces stratégies par la suppression d'opérations de finition dans la gamme de fabrication.

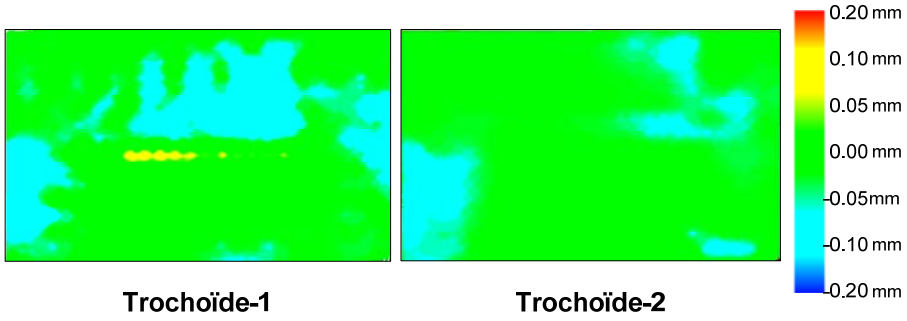


Figure 43 : Relevés de planéité du fond des poches usinées par stratégies trochoïdales

2.3.4 Définition d'une MOCN capable

De par sa richesse et sa complexité, l'usinage trochoïdal nécessite un certain nombre d'aptitudes de la MOCN employée pour être mis en œuvre de façon compétitive. La définition d'une machine capable est ainsi fortement liée aux performances de son DCN et à ses capacités cinématiques.

2.3.4.1 Capacités du DCN : format de description utilisé

La programmation des trajectoires d'usinage au niveau du DCN se base actuellement sur une discrétisation des parcours à l'aide de points de contrôle. Il est donc nécessaire de choisir un format de description adéquat, permettant de tirer le meilleur profit des propriétés mathématiques d'une courbe trochoïdale tout en étant interprétable par le DCN.

De ce fait, nous avons testé quatre formats de description, proposés par le contrôleur Siemens Sinumerik 840D qui équipe la MOCN VERNE : l'interpolation

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

linéaire, l'interpolation circulaire, le format B-splines et le format C-splines (Tableau 7). Ceux-ci sont à l'image des possibilités offertes par les DCN récents. D'autres formats de description peuvent toutefois être employés pour mettre en œuvre des trajectoires trochoïdales sur MOCN, comme par exemple en s'appuyant sur le standard Step_NC [Hascoet2007]. Notre objectif ici est de déterminer le meilleur format de description des trajets au regard de la mise en œuvre sur MOCN.

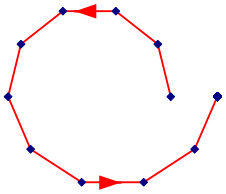
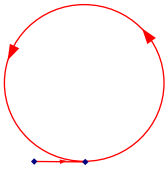
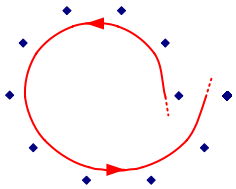
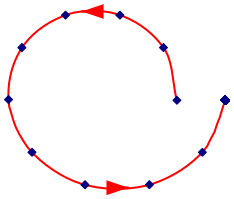
Interpolation linéaire Fonction CN : G1	**Interpolation circulaire** Fonction CN : G2-G3	**Interpolation B-spline** Fonction CN : BSPLINE	**Interpolation splines cubiques** Fonction CN : CSPLINE
			

Tableau 7 : Formats de description disponibles

En pratique, chaque format a été testé à vide pour la mise en œuvre de parcours trochoïdaux basés sur la même géométrie de trajectoire : un rayon de trochoïde R_{trocho} de 28 mm ainsi qu'un pas trochoïdal S_{tr} de 4 mm. Les résultats obtenus désignent le format C-splines comme étant le plus approprié à une implémentation sur MOCN. Proposé par le DCN Siemens Sinumerik 840D, il utilise en effet des splines cubiques continues en tangence et en courbure [Siemens2006] ; le parcours généré possède donc les mêmes propriétés qu'un trajet codé en B-splines mais contrairement à ce dernier, il passe par les points de contrôle défini dans le programme d'usinage. Ceux-ci peuvent donc être directement extraits de la définition mathématique proposée par le système d'équations (8). A l'inverse, l'interpolation linéaire présente des discontinuités géométriques qui pénalisent le comportent de la MOCN lors de leur franchissement ; même une augmentation du nombre de points d'interpolation (diminuant ainsi l'erreur cordale par rapport à la forme exacte d'une trochoïde), ne résout pas les problèmes de cinématique associés. L'interpolation circulaire, quant à elle, ne respecte pas la géométrie d'une trochoïde ; nous avons de plus montré au paragraphe précédent que ce format est plutôt destiné aux calculs des paramètres.

Cette étude montre que les performances du DCN de la machine outil employée vont induire celles de la mise en œuvre de parcours trochoïdaux : celui-ci doit en effet pouvoir déployer un format d'interpolation capable de retranscrire les propriétés de ces courbes, c'est-à-dire une continuité de classe C^2. Sans cela, l'usinage trochoïdal perd de son intérêt.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

2.3.4.2 Capacités cinématiques : optimisation du déroulement de la trajectoire

L'intérêt récent pour les stratégies d'usinage trochoïdal s'explique en grande partie par la nécessité de disposer de moyens de fabrication à dynamique élevée pour que leur mise en œuvre sur MOCN soit compétitive. En effet, bien que la trajectoire générée soit continue, les nombreux changements de direction du vecteur vitesse d'avance imposent une réactivité maximale des axes du centre d'usinage utilisé.

Pour illustrer ce phénomène, nous avons mené une étude comparative sur deux centres d'usinage aux capacités cinématiques bien différentes. Le premier est la machine outil VERNE. Le second, de facture plus ancienne, est constitué d'une architecture sérielle et dispose de capacités plus modestes (0.2 m/s², Num 750). Le même programme d'usinage a été utilisé sur chacune des deux machines : une poche de 100 x 100 x 40 mm a été usinée à l'aide d'un outil de 20 mm de diamètre. La trajectoire trochoïdale, décrite par interpolation linéaire, a été paramétrée par un pas trochoïdal de 5 mm et un rayon trochoïdal de 15.5 mm. Pour chaque essai, une comparaison du temps théorique, où la trajectoire est entièrement parcourue à la vitesse d'avance programmée, et du temps d'usinage réel a été effectuée.

Les résultats, donnés sur la Figure 44, montrent l'influence évidente des capacités cinématiques de la machine sur la mise en œuvre performante d'une trajectoire trochoïdale sur MOCN : l'écart entre le temps d'usinage théorique et le temps réellement mesuré sur la machine n'est que de 1% pour la machine à structure parallèle, réglée avec un jerk de 100 m/s³. Ceci s'explique par le rapprochement légitime entre un mouvement trochoïdal et un mouvement circulaire uniforme (à accélération centripète et de valeur constante). La machine parallèle VERNE, disposant d'une forte accélération et d'un important jerk, peut tout à fait supporter ces variations quasi-sinusoïdales d'accélération. Par contre, l'écart est supérieur à 15% pour la machine sérielle, pénalisée par le faible couple jerk-accélération disponible.

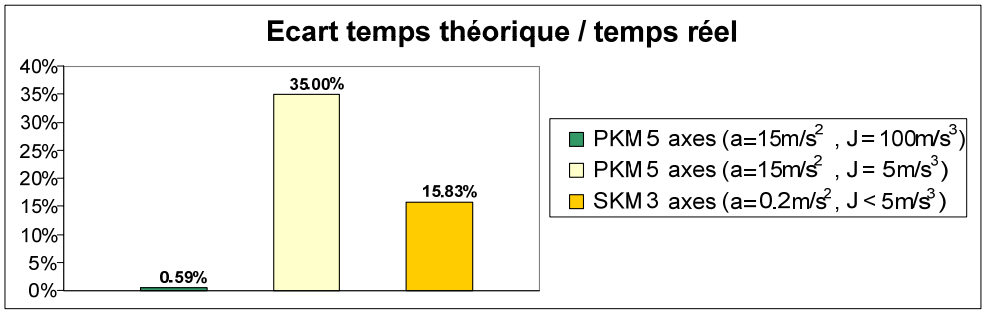


Figure 44 : Comparaison de deux MOCN pour l'implémentation de trajectoires trochoïdales

Un essai complémentaire est venu souligner l'influence du jerk seul. Une poche a été usinée sur la machine parallèle avec un parcours trochoïdal avec un jerk réduit à 5 m/s^3. L'écart entre temps théorique (prévu par le logiciel de FAO) et temps réel est passé à 35%. La même analyse a enfin été menée sur les expériences trochoïde-1 et trochoïde-2. Ses résultats ont montré un écart inférieur à 1% entre les temps prévus FAO et les temps mesurés sur MOCN. A titre de comparaison, une stratégie d'usinage en zigzag retourne des temps réels d'usinage de l'ordre de 25% supérieurs aux temps prévus (c'est-à-dire exécutés entièrement à la vitesse d'avance programmée). La valeur de l'écart entre le temps d'usinage théorique et le temps mesuré sur machine outil n'influe pas uniquement sur la productivité associée à l'application. Ainsi, un écart minime montre que les conditions de coupe programmées sont respectées tout au long du trajet, ce qui assure un bon déroulement de process. En conséquence, la mise en œuvre de trajectoires trochoïdales sur machines outils à fortes capacités cinématiques permet non seulement une maîtrise de l'engagement radial mais fournit également l'assurance de travailler avec les conditions de coupe programmées ; ce qui assure son efficacité. A l'inverse, si le moyen d'usinage n'offre pas des valeurs de vitesse, d'accélération et de jerk suffisantes, l'implémentation de stratégies trochoïdales n'est pas intéressante d'un point de vue technico-économique (efforts de coupe et productivité en particulier).

2.3.5 Conclusions

Cette partie a porté sur la mise en œuvre d'applications d'usinage trochoïdal sur MOCN. Nous avons tout d'abord présenté les avantages associés à ce type de trajectoires. Ainsi, les parcours trochoïdaux permettent non seulement d'éviter les situations d'usinage en pleine fraise, mais aussi, d'assurer une maîtrise de l'engagement radial instantané. Ils sont donc bien adaptés aux situations d'usinage pour lesquelles le couple outil/matière restreint fortement le choix des conditions de coupe.

Nous avons ensuite proposé un modèle de génération de trajectoires optimisées d'usinage trochoïdal. Grâce à lui, le vidage complet d'une poche s'effectue à l'aide d'une seule et unique trochoïde, c'est-à-dire sans aucune discontinuité géométrique. La mise en œuvre sur MOCN gagne donc en performance. Par suite, nous avons mené une étude expérimentale sur la MOCN VERNE afin d'étudier la mise en œuvre de ce type de parcours d'outil au regard de critères de productivité, de coûts (par un relevé des efforts sur l'outil) et de propriétés géométriques des surfaces usinées. Les résultats

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

obtenus confirment les attentes associées au format trochoïdal : les valeurs des efforts sur l'outil restent assez faibles et les surfaces usinées présentent un bon état de surface, relativement à une opération d'ébauche.

Nous avons enfin pu mettre à jour un certain nombre de critères de définition d'une MOCN capable relativement aux trajectoires trochoïdales. Ceux-ci portent d'une part sur les performances du DCN qui doit offrir un format de description permettant de retranscrire les propriétés de continuité d'une courbe trochoïdale (au sens mathématique). D'autre part ces critères portent sur les capacités cinématiques des axes de déplacement qui doivent supporter les nombreux changements de direction des vecteurs vitesse et accélération afin d'assurer un usinage aux conditions de coupe programmées.

2.4 Choix d'une stratégie d'usinage adaptée aux contraintes

Après avoir présenté deux types particuliers de trajectoires d'usinage innovantes permettant d'optimiser la mise en œuvre d'usinages d'ébauches sur MOCN, nous présenterons dans une dernière partie de ce chapitre des critères d'aide au choix d'une stratégie d'usinage adaptée à l'application visée. De manière concrète, nous évaluerons les performances en termes de productivité de plusieurs combinaisons de stratégies pour l'usinage complet d'une poche (ébauche et finition) en fonction de la géométrie de celle-ci et des capacités cinématiques de la MOCN utilisée. Notre approche sera basée sur des simulations numériques du débit réel associé à chaque combinaison de paramètres. Pour ce faire, nous avons développé un simulateur comparant les évolutions de débit associées à chaque type de parcours en fonction des paramètres évalués. Les résultats obtenus visent à déterminer l'influence de divers critères liés à la géométrie à usiner et aux moyens de fabrication sur la productivité d'une stratégie de fabrication complète, associant une ébauche et une finition. De plus, un des objectifs est de déterminer les performances du tréflage face à l'une des stratégies d'usinage les plus répandues, le zigzag.

2.4.1 Simulation du débit réel pour le vidage de poche

2.4.1.1 Présentation du modèle

La comparaison de la productivité associée à la mise en œuvre de chaque combinaison de stratégies a été effectuée à l'aide de simulations numériques de débit.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Le simulateur développé se base sur les mêmes principes (pilotage des axes par le jerk) que celui que nous avons présenté au cours du paragraphe 2.2.4.2, dédié à la simulation de débit atteint en tréflage.

D'un point de vue pratique, nous avons décidé de restreindre l'étude à deux stratégies d'ébauche, le tréflage et le zigzag, ainsi qu'à deux stratégies de finition, le contournage et le tréflage. Nous avons ainsi délibérément exclu les stratégies trochoïdales, qui n'auraient pas été compétitives étant donné que le seul critère mesuré a été le temps d'usinage. De plus, nous avons choisi la stratégie de zigzag pour donner une image des performances des stratégies d'usinage radiales. En combinant les trajectoires d'ébauche et de finition retenues, nous avons testé trois stratégies complètes de vidage de poche :

- *Stratégie 1* : Ebauche en zigzag et finition en contournage
- *Stratégie 2* : Ebauche en tréflage et finition en contournage
- *Stratégie 3* : Ebauche et finition en tréflage

Le débit réel atteint par chacune des trois stratégies d'usinage est calculé en fonction de paramètres géométriques, cinématiques et technologiques. Tous les paramètres utilisés par le modèle sont rassemblé dans le Tableau 8.

Objet	Attributs
Poche	Longueur, Largeur, Profondeur
Outil de tréflage	Diamètre, Nombre de dents, Pas radial max, Entre-passes max
Outil de Zigzag	Diamètre, Nombre de dents, Profondeur de passe max, Entre-passes max
Outil de contournage	Diamètre, Nombre de dents, Profondeur de passe max
Programme de tréflage	Avance par dent, Fréquence de rotation, Hauteur de sécurité, Décalage dans le plan XY lors de la remontée, Hauteur de crête max en finition
Programme de zigzag	Avance par dent, Fréquence de rotation
Programme de contournage	Avance par dent, Fréquence de rotation, Surépaisseur de finition
Machine	Avance max, Accélération max, Jerk programmé, Temps de changement d'outil

Tableau 8 : Paramètres du modèle de comparaison des stratégies d'usinage

Afin de clarifier les principes de génération de chaque stratégie de vidage de poche, nous jugeons utile de préciser certains points. Le tréflage d'ébauche s'appuie sur une

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

courbe guide en zigzag ; pour le tréflage de finition, le pas de tréflage est calculé de manière à respecter la hauteur de crête indiquée par le cahier des charges. Pour les stratégies 1 et 2, un temps de changement d'outil est ajouté au total, afin de se rapprocher des cas réels. Il n'y en a pas pour la stratégie 3 car elle emploie le même outil de tréflage pour l'ébauche et la finition. Nous avons également associé un outil à chaque type de trajectoire. Chacun d'entre eux possède ses propres conditions de coupe qui déterminent les vitesses de coupe et d'avance utilisées sur la MOCN. Enfin, les capacités de la MOCN utilisée sont nécessaires à une simulation de temps de parcours fidèle à la mise en œuvre réelle.

2.4.1.2 Hypothèses formulées et limites du modèle proposé

La première hypothèse formulée pour la simulation des temps de parcours concerne la gestion des discontinuités géométriques. Pour chaque simulation, les temps d'usinage sont calculés en considérant un arrêt de la MOCN à chaque discontinuité du parcours d'usinage. L'outil s'arrête donc à chaque changement de direction, ce qui correspond à une programmation en mode « arrêt précis » (G60 sous Siemens 840D).

De plus, pour les trajectoires d'ébauche en zigzag et de finition en contournage, le modèle ne tient pas compte des trajectoires de raccordement entre chaque couche permettant la prise de profondeur de passe. La longueur des trajets simulés est un peu plus courte que lors d'un usinage réel. Ainsi, le temps simulé est toujours inférieur au temps réel mesuré sur MOCN. L'écart est inférieur à 3% pour l'usinage d'une couche ; il est inférieur à 10% pour l'usinage d'une poche complète, car les trajectoires de raccordement ne sont pas prises en compte lors des simulations.

Pour le tréflage, nous avons choisi de générer des trajets de raccordement entre plongées linéaires constituées de segments de droite, sans prendre en compte les optimisations proposées au paragraphe 2.2.2.2. D'un point de vue quantitatif, l'écart entre le temps simulé et le temps mesuré sur machine est voisin de 5% (comparaisons effectuées sur la MOCN VERNE).

2.4.1.3 Cas types étudiés

Nous avons centré notre étude sur deux géométries de poche. Les outils et conditions de coupe ont été choisis pour chacun des cas de manière à être représentatifs de cas d'utilisation courants. Nous avons également choisi d'utiliser deux modèles de MOCN à capacités cinématiques différentes afin de disposer d'éléments liés aux performances cinématiques du moyen de fabrication. De ce fait,

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

sauf mention contraire, les valeurs des paramètres d'entrée seront celles indiquées sur le Tableau 9.

Attributs	Cas 1	Cas 2
Poche	300 x 250 x 70	160 x 100 x 40
Outil de tréflage	D=50, Z=5, pr=12, Emax=45	D=32, Z=2, pr=12, Emax=26
Outil de Zigzag	D=50, Z=5, ap=8, Emax=45	D=32, Z=2, ap=8, Emax=26
Outil de contournage	D=40, Z=4, ap=8	D=32, Z=2, ap=8
Programme de tréflage	fz=0.2, N=15000, Hsecu=1, DecXY=0, HC_max=0.02	fz=0.2, N=24000, Hsecu=1, DecXY=0, HC_max=0.02
Programme de zigzag	fz=0.2, N=15000	fz=0.2, N=24000
Programme de contournage	fz=0.1, N=15000, sur_fini=8	fz=0.1, N=24000, sur_fini=8
MOCN	Fmax=50, a_max=15, J=100, T_outil=10	Fmax=18, a_max=3, J=100, T_outil=10

Tableau 9 : Valeurs des paramètres pour les cas types étudiés

Nous avons dans ce premier paragraphe présenté les principes de fonctionnement de l'outil de simulation développé dans le but de comparer les débits associés à plusieurs stratégies d'usinage (ébauche et finition) lors de leur mise en œuvre sur une MOCN donnée. Les divers résultats proposés dans la suite de cette partie sont issus de ce simulateur et sont répartis en deux catégories, ceux liés à l'application visée et ceux liés aux capacités des moyens de fabrication disponibles. Les deux cas d'étude détaillés dans le Tableau 9 (Cas 1 et Cas 2) tiennent lieu d'exemple d'illustration pour chaque type de résultat.

De façon plus générale, le simulateur mis en place permet de choisir la stratégie d'usinage la plus adaptée aux contraintes liées à l'application et aux moyens de fabrication en fournissant rapidement l'ensemble des résultats proposés dans les paragraphes suivants.

2.4.2 Adaptation à la géométrie de la poche

2.4.2.1 Géométrie du profil de la poche

Dans ce paragraphe, nous mesurons l'influence de la géométrie de la poche sur la productivité associée à chaque stratégie en fonction des propriétés de la MOCN. Pour chacun des cas d'étude, la longueur initiale est conservée (300 mm pour le cas 1 et 160 mm pour le cas 2) ; la largeur de poche varie entre le quart et la totalité de la longueur de la poche, ce qui correspond à la majorité des cas pratiques usuels. Par

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

ailleurs, la profondeur de poche est choisie comme paramètre d'entrée, ses valeurs variant de 1 mm à 300 mm.

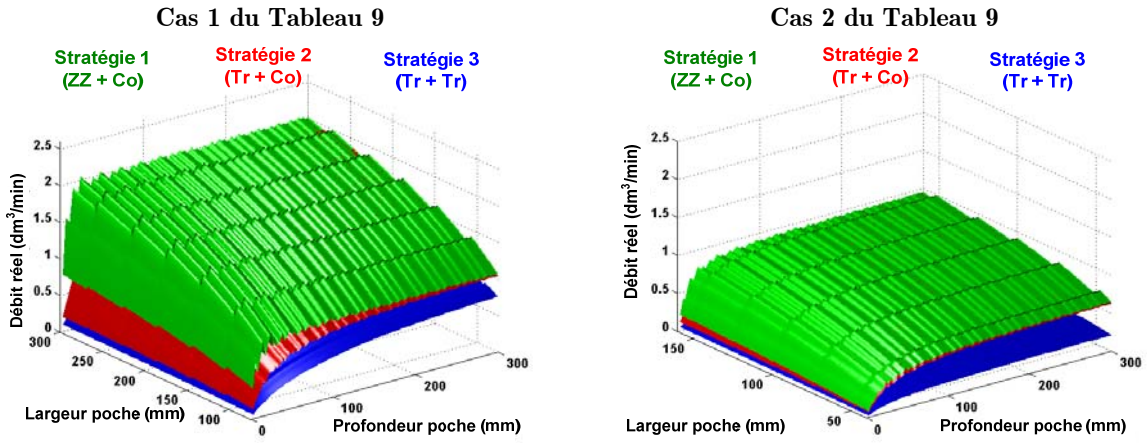


Figure 45 : Influence de la géométrie du profil de la poche

Les surfaces de débit obtenues (Figure 45) montrent que, pour une profondeur de poche donnée, la courbe de débit associée à chaque trajectoire présente des discontinuités avec des chutes brutales qui s'expliquent par l'ajout d'une passe de zigzag pour pouvoir couvrir l'augmentation de volume d'ébauche. Cette passe supplémentaire augmente la longueur du trajet d'ébauche dans une proportion supérieure à l'augmentation de volume résultant de l'augmentation de largeur de poche. A partir de cette discontinuité le débit augmente régulièrement jusqu'à un nouvel ajout de segment car la longueur de trajectoire reste fixe pour un volume à retirer croissant.

Pour toutes les stratégies, une variation de largeur se traduit par une plus forte augmentation de débit, comparativement à une variation de profondeur. On retrouve également une caractéristique des trajectoires radiales illustrée par la stratégie 1 : lorsque la machine est dynamique, la surface de débit atteint très vite des valeurs proches du débit maximal. Enfin, la profondeur de poche n'a que peu d'influence sur le débit atteint. Les stratégies de tréflage, quant à elles, gagnent en productivité avec la profondeur mais pour les plages de valeurs testées, leur productivité reste inférieure à celle de la stratégie 1.

Concernant le tréflage d'ébauche, la productivité associée est pénalisée pour les faibles profondeurs par les performances cinématiques de la MOCN utilisée, la proportion du trajet effectuée à vitesse programmée étant assez faible.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

2.4.2.2 Hauteur de crête en finition

Le paramètre « hauteur de crête » n'est utilisé que pour calculer le pas maximal utilisable en tréflage de finition. Il n'aura donc aucune influence sur les stratégies 1 et 2 où la finition s'effectue par contournage. Notre objectif principal ici est de déterminer la rentabilité du tréflage de finition au regard de la productivité, mais d'autres points peuvent être éclaircis ici.

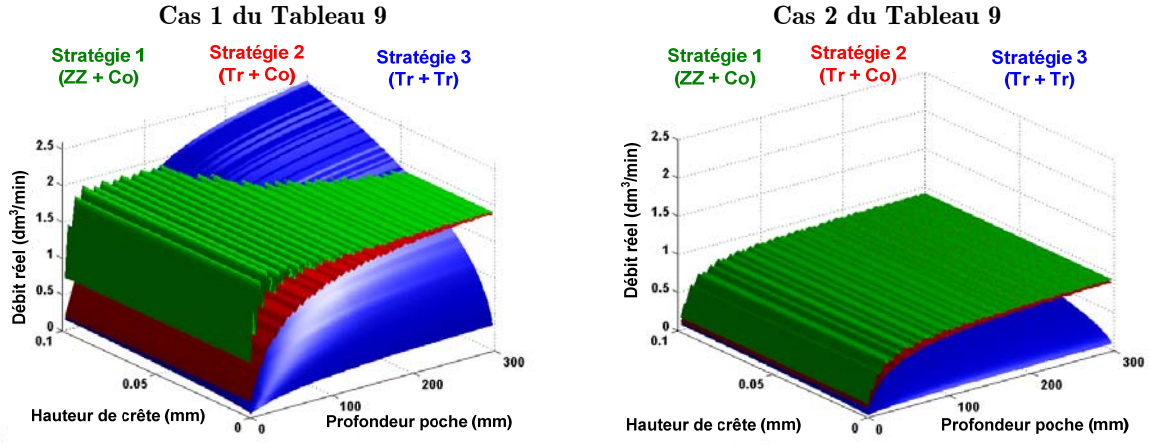


Figure 46 : Influence de la hauteur de crête en tréflage de finition

La Figure 46 présente l'évolution du débit pour chaque stratégie en fonction de la hauteur de crête en finition qui varie de 0.001 à 0.1 mm, et de la profondeur de la poche, qui varie de 1 à 300 mm. Ces résultats montrent qu'en finition, le tréflage peine à concurrencer le contournage. En effet, la stratégie 3 ne diffère de la stratégie 2 que par la finition, effectuée en tréflage. Le graphe relatif au cas 1 de la Figure 46 montre que la surface associée à la stratégie 3 ne dépasse celle associée à la stratégie 2 que pour les cas combinant pour une profondeur supérieure à 100 mm avec une hauteur de crête sur la paroi de 0.1 mm ou alors combinant une profondeur de poche supérieure à 300 mm avec une hauteur de crête de 0.05 mm, ce qui ne couvre qu'une partie des cas pratiques courants. Pour le cas 2, la productivité associée à la stratégie 3 est toujours inférieure à celle de la stratégie 2.

Au final, le maximum de productivité atteignable est très souvent supérieur en tréflage qu'en zigzag mais il n'est atteint que pour des profondeurs de poche assez importantes (contrairement au zigzag où il est quasi immédiat) ou nécessitant un enlèvement de matière élevé.

Par contre, il sera préférable de faire appel à une finition par contournage plutôt que par tréflage dans la majorité des cas industriels courants, si la productivité est le critère de choix prépondérant.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

2.4.3 Adaptation aux moyens de fabrication

2.4.3.1 Diamètre de l'outil d'ébauche

La problématique de choix d'outil pour les opérations de vidage de poche a été déjà largement étudiée [Yao2003]. Notre but ici n'est pas de définir un nouvel algorithme de sélection de diamètre d'outil, mais plutôt de mesurer, au regard de la productivité, la validité du choix usuellement effectué d'employer en ébauche un outil de diamètre plus important qu'en finition. Nous étudierons donc dans cette partie l'évolution du débit réel pour chaque stratégie en fonction du diamètre de l'outil d'ébauche en tréflage et en zigzag : sa valeur minimale est celle de l'outil de finition, sa valeur maximale est 63 mm. L'entre-passes maximale admissible est fixée à 80% du diamètre pour chaque outil. Nous avons également choisi de travailler à vitesse de coupe et vitesse d'avance par dent constantes pour tous les diamètres d'outil testés.

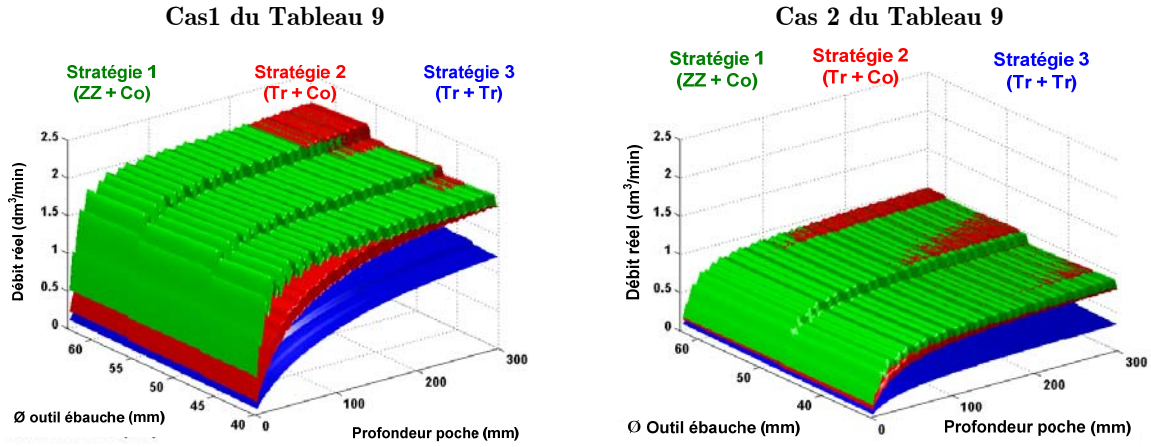


Figure 47 : Influence du diamètre de l'outil d'ébauche

Les résultats de ces essais sont présentés sur la Figure 47. Comme nous avons choisi de travailler à vitesse de coupe constante, les gains en longueur de trajet lors de l'emploi de diamètres outil plus importants sont compensés par la diminution de la vitesse d'avance. Ainsi, l'emploi d'un grand diamètre outil ne se solde pas par une augmentation significative du débit pour la stratégie 1 (zigzag et contournage). A l'inverse, on observe une légère augmentation de la productivité pour les stratégies employant du tréflage ; comme les vitesses de déplacement sont plus faibles pour les grands diamètres, les limitations cinématiques sont moins importantes et la vitesse d'avance réelle est plus proche de la vitesse programmée.

Selon cette étude, il ne semble pas donc pas très profitable de sélectionner des outils de grand diamètre pour réaliser les opérations d'ébauche. Il convient toutefois de nuancer ces résultats. En effet, une augmentation du diamètre de l'outil peut se

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

traduire par une modification de la morphologie de l'outil en ajoutant une dent de coupe. Il sera alors possible d'augmenter la vitesse d'avance (à paramètres de coupe constants) et les gains de productivité seront alors significatifs. De plus, l'emploi d'outils de diamètres plus importants limite la flexion de l'outil et permet d'augmenter la hauteur de coupe disponible, ce qui autorise un accroissement de la profondeur de passe.

2.4.3.2 Performances cinématiques de la MOCN utilisée

Nous avons montré précédemment que les performances des trajectoires de tréflage sont fortement liées aux capacités cinématiques du moyen de production utilisé. Afin de conforter de ce résultat, le cas d'étude n°1 a été traité sur deux machines supplémentaires, en plus de la MOCN-1 (avance maximale 50 m/min, accélération maximale de 15 m/s, jerk programmé de 100 m/s^3 et temps de changement d'outil de 10 s) employée initialement (voir Tableau 9). L'une, notée MOCN-2 sur la Figure 48, est celle du cas d'étude n°2 du Tableau 9 (avance maximale 18 m/min, accélération maximale de 3 m/s, jerk programmé de 100 m/s^3 et temps de changement d'outil de 10 s) ; l'autre, notée MOCN-3, dispose de performances nettement plus modestes : avance maximale de 12 m/min, accélération maximale de 0.2 m/s, jerk programmé de 5 m/s^3 et temps de changement d'outil de 10 s.

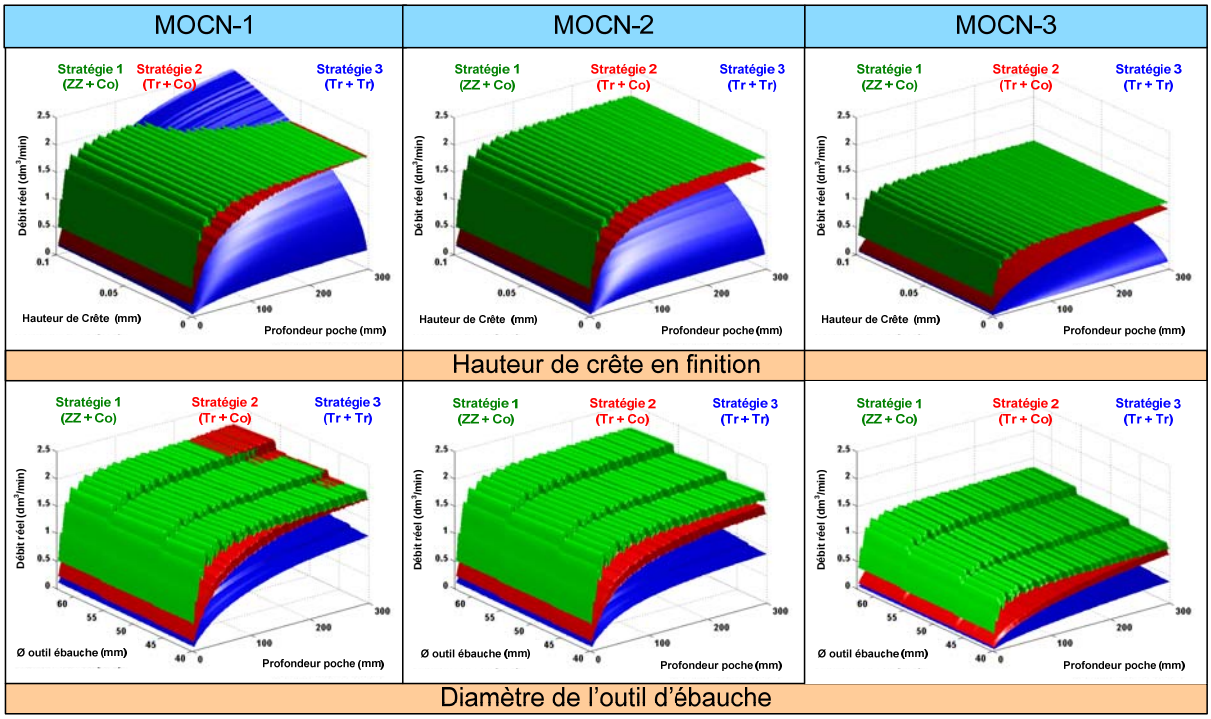


Figure 48 : Comparaison de MOCN de capacités cinématiques différentes

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

La Figure 48 compare les surfaces obtenues pour chaque machine en se focalisant sur deux exemples, la hauteur de crête en tréflage de finition et le diamètre de l'outil d'ébauche. On retrouve tout d'abord le fait qu'à conditions de coupe égales, la stratégie 1 est la plus productive. Ensuite, les résultats montrent un lien entre le débit maximal atteignable et les capacités cinématiques du moyen utilisé : autour de 2.5 dm^3/min pour la MOCN-1, 2.0 dm^3/min pour la MOCN-2, 1.5 dm^3/min pour la MOCN-3. Cependant, la forme de la surface pour la stratégie 1 reste sensiblement la même, quelle que soit la MOCN, avec un débit maximal atteint quasi-immédiatement. A l'inverse, la productivité des stratégies 2 et 3, utilisant le tréflage, dépend plus des performances cinématiques. En effet, les pentes de la surface de débit sont plus faibles pour un moyen moins dynamique et l'écart entre les débits maximaux atteignables est plus important.

Ainsi, les capacités cinématiques de la MOCN sont déterminantes pour fixer le débit maximal atteignable par chaque type de trajectoire. Pour le tréflage, elles régissent même la manière d'atteindre ce maximum, ce qui fait que ce type de trajectoire ne sera pas rentable pour une MOCN peu dynamique. Est-il pour autant intéressant de chercher à tout prix le moyen de fabrication présentant les meilleures performances cinématiques ? Pour répondre à cette question, nous avons mesuré le rapport entre le débit atteint et les performances cinématiques de la MOCN, en utilisant comme exemple non seulement les deux cas d'étude n°1 et n°2 mais aussi une poche dont la profondeur dépasse la largeur : 200 x 100 x 180 mm, usinée dans les mêmes conditions que pour le cas 2 (outils, programmes, MOCN). Cette dernière est appelée Cas 3 sur la Figure 49. Seules les valeurs de l'accélération maximale et du jerk programmé sont modifiées pour cette étude.

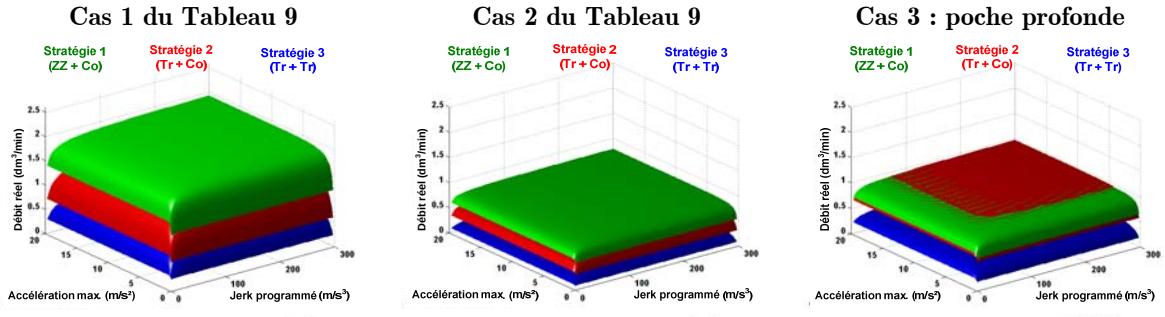


Figure 49 : Performances cinématiques

Il est intéressant de remarquer que l'on approche assez rapidement les performances maximales, quelle que soit la stratégie choisie. Une accélération

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

maximale de 5 m/s² et un jerk de 75 m/s³ suffisent à obtenir 96% du débit maximal pour la stratégie 1 et 90% du débit maximal pour la stratégie 2.

Par conséquent, il convient de rechercher les performances cinématiques nécessaires et suffisantes à l'objectif fixé, que cela soit pour le choix d'une MOCN parmi un parc connu ou pour la définition d'un cahier des charges de conception de machine outil. La course à la performance ne s'accompagne en effet pas toujours de gains significatifs.

2.4.4 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus mettent en avant la supériorité de l'ébauche en zigzag sur le tréflage en termes de débit instantané. Pour chacun des cas testés, le tréflage ne dépassera le zigzag que pour des profondeurs de poche importantes. De plus, le débit maximal possible est atteint très rapidement avec des trajets de zigzag, pour les évolutions de paramètres testées et à paramètres de coupe semblables. Néanmoins, il ne faut pas s'attacher uniquement à la profondeur des poches pour sélectionner la stratégie d'usinage la plus adaptée. A titre d'exemple, la Figure 50 propose une pièce mécanique dont la forme s'adapte bien à une stratégie de tréflage, même si certaines poches ne sont pas considérées comme profondes. Ainsi, s'il est a priori préférable d'employer du tréflage seulement pour la poche de droite, ce choix peut être répercuté sur les autres poches de la pièce. Il convient en effet de sélectionner la stratégie optimale au regard de la forme globale de la pièce et ne pas considérer les entités à usiner de manière isolée.

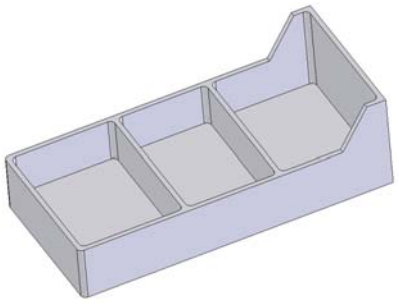


Figure 50 : Exemple de pièce adaptée à une ébauche par tréflage

Parallèlement à cela, l'étude montre que la stratégie de finition par tréflage ne peut concurrencer une stratégie de finition par contournage à moins d'avoir une poche profonde et la possibilité de laisser des hauteurs de crêtes assez importantes en finition (supérieures à 0.05 mm).

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Néanmoins, un avantage du tréflage est de pouvoir travailler avec des conditions de coupe plus élevées que pour le zigzag. Nous avons en effet montré aux paragraphes précédents qu'en fonction de l'outil et des conditions de travail utilisées le tréflage génère moins d'efforts d'usinage qu'une trajectoire de zigzag, tout en offrant des états de surface acceptables. On pourra ainsi gagner nettement en débit si la puissance disponible à la broche permet d'augmenter les conditions de coupe. Par exemple, s'il est possible de multiplier la vitesse d'avance par deux par rapport au zigzag (0.4 mm/dent/tr), le tréflage devient beaucoup plus intéressant dès que la profondeur de la poche dépasse sa largeur, comme l'indiquent les graphes présentés sur la Figure 51.

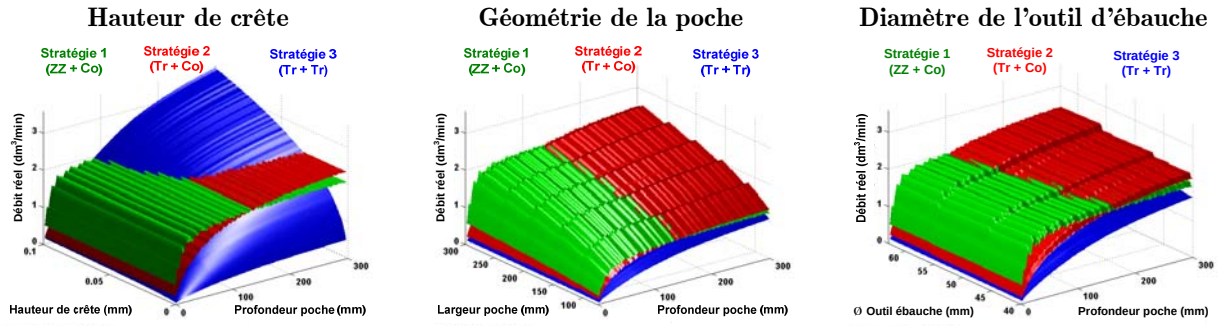


Figure 51 : Résultats avec une avance double en tréflage

Les résultats que nous avons proposés dans cette partie ne reflètent donc pas l'exacte réalité dans la mesure où, en pratique, les conditions de coupe sont différentes selon le type de trajectoire choisi. Toutefois, les conclusions sur l'évolution du débit en fonction des paramètres opératoires obtenues pour chaque stratégie donnent des critères de choix tout à fait valides ; elles pourront servir à la définition des capacités machines justes nécessaires pour la mise en œuvre optimale d'une application d'usinage donnée.

Enfin, cette dernière partie souligne l'intérêt de disposer d'outils de simulation pour optimiser les choix de stratégies d'usinage, afin que celles-ci soient en accord avec les propriétés de la MOCN employée.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les évolutions de la préparation de la fabrication liées à l'amélioration des performances des MOCN, en nous concentrant sur le choix d'une stratégie d'usinage. Il est en effet crucial pour l'efficacité de l'application mise en œuvre que la définition des parcours d'outil soit en adéquation

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

avec la géométrie à réaliser et les moyens de production employés. Avec les progrès récents, certaines stratégies d'usinage, basées sur des critères technologiques, deviennent compétitives. Nous avons ainsi choisi d'étudier de manière détaillée la mise en œuvre de stratégies de tréflage et d'usinage trochoïdal sur MOCN.

Dans le cas du tréflage, nous avons défini un modèle de génération de trajectoires optimisées, de manière à maîtriser l'ensemble de la programmation des parcours. La validité du modèle et des optimisations de programmation proposés a ensuite été évaluée par une étude expérimentale sur la MOCN parallèle VERNE du laboratoire. Le comportement de la machine ainsi que les propriétés des surfaces produites ont été observés via des critères de productivité, de coûts et de conformité. Nous avons ainsi pu montrer que, si elle se destine naturellement à l'usinage de poches profondes, la performance d'une trajectoire de tréflage dépend aussi fortement des capacités cinématiques de la machine outil employée. C'est pourquoi, nous avons développé un outil de simulation destiné à la définition d'une MOCN capable, au regard d'applications de tréflage, en nous basant sur des critères de productivité. Deux aspects principaux ont été traités : d'une part la recherche de la performance que l'on peut attendre d'une machine donnée en fonction des paramètres opératoires choisis et d'autre part, la sélection parmi un panel de MOCN permettant d'optimiser la productivité d'une opération de tréflage. Sur ce point, les MOCN à structure parallèle présentent des capacités cinématiques qui les prédisposent à la mise en œuvre d'applications de tréflage offrant une très bonne productivité.

Dans un second temps, nous avons étudié l'implémentation de parcours trochoïdaux. Ce type de trajectoire possède des domaines d'application assez spécifiques nécessitant un contrôle de l'engagement radial de l'outil. Nous avons également défini un modèle de génération de trajectoires optimisées permettant le vidage d'une poche complète à l'aide d'une seule et unique trochoïde, supprimant ainsi toute discontinuité géométrique sur le trajet. Des essais sur MOCN, analysés selon les mêmes indicateurs que l'étude menée pour le tréflage (conformité, coûts et délais), ont ensuite évalué la mise en œuvre des trajectoires trochoïdales sur machine outil en s'appuyant sur le modèle de programmation proposé. Nous avons, par la suite, mis en place des éléments de définition d'une MOCN capable, au regard de l'implémentation de trajets trochoïdaux : pour une mise en œuvre performante, la machine outil employée doit être équipée d'un DCN permettant de retranscrire les propriétés de continuité des trochoïdes sur les déplacements de l'outil ; de plus, elle doit posséder des capacités cinématiques élevées pour garantir l'utilisation des conditions de coupe programmées.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Enfin, nous avons proposé des critères de choix d'une stratégie d'usinage adaptée aux contraintes associées à la géométrie de la poche à vider et aux moyens de fabrication. Dans ce but, nous nous sommes appuyés sur des simulations numériques de débit réel en fonction des capacités cinématiques de la MOCN et du couple de trajets d'ébauche et de finition choisi. L'un des objectifs majeurs a été de mesurer la performance de parcours de tréflage face aux parcours usuels. Comme nous l'avions prévu, l'efficacité d'une stratégie de tréflage dépend des performances cinématiques du moyen, dans une mesure beaucoup plus importante que pour les autres trajets testés. Dans la majeure partie des cas usuels, il n'offre donc pas une meilleure productivité qu'un parcours en zigzag. Il est toutefois possible d'employer des conditions de coupe plus élevées, si les moyens le permettent. Dans ce cas, le tréflage augmente significativement l'étendue de son domaine de performances.

De manière générale, l'augmentation des capacités des MOCN tend à élargir le choix des stratégies d'usinage capables de répondre à une problématique de fabrication. Il devient alors plus difficile de déterminer une trajectoire adaptée à l'application à mettre en œuvre, dans la mesure où le choix s'effectue parmi un ensemble de solutions plus large. Par conséquent, le développement d'outils de simulation tels que ceux présentés au cours de ce chapitre montre alors un intérêt important. Cela permet de disposer, rapidement et à moindre coût, de critères de comparaison des stratégies d'usinage en fonction des capacités des moyens de fabrication. Ce type d'outil souligne également l'importance de la programmation pour l'efficacité de mise en œuvre d'une opération de fabrication, en particulier au regard de critères de productivité.

De manière générale, l'augmentation des capacités des MOCN tend à élargir le choix des stratégies d'usinage capables de répondre à une problématique de fabrication. Il devient alors plus difficile de déterminer une trajectoire adaptée à l'application à mettre en œuvre, dans la mesure où le choix s'effectue parmi un ensemble de solutions plus large. Par conséquent, le développement d'outils de simulation tels que ceux présentés au cours de ce chapitre montre alors un intérêt important. Cela permet de disposer, rapidement et à moindre coût, de critères de comparaison des stratégies d'usinage en fonction des capacités des moyens de fabrication. Ce type d'outil souligne également l'importance de la programmation pour l'efficacité de mise en œuvre d'une opération de fabrication, en particulier au regard de critères de productivité.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Chapitre 3. MOCN et choix des procédés : émergence du Formage Incrémental

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les nouvelles orientations possibles pour l'optimisation de la préparation de la fabrication, avec l'apparition de nouvelles stratégies d'usinage répondant à des contraintes technologiques. En parallèle des applications de fraisage, de nouveaux procédés, développés au cours des années 2000, peuvent être mis en œuvre sur MOCN grâce aux nouveaux développements techniques. Parmi eux, le formage incrémental concerne la mise en forme de pièces de tôlerie.

A l'heure actuelle, si les pièces de tôlerie sont très répandues dans l'industrie, notamment dans l'aéronautique et dans l'automobile, les processus d'obtention mis en œuvre dans l'industrie sont peu nombreux : l'emboutissage est de loin le plus utilisé grâce aux fortes cadences atteignables et à la variété de pièces réalisables. Il fait cependant appel à des outillages volumineux, coûteux et peu évolutifs, et nécessite des temps de mise au point assez longs. Lorsque les productions sont variées, il peut engendrer des problèmes de stockage des divers poinçons et matrices (Figure 52a). L'emboutissage trouve ainsi son champ d'application dans les productions en grandes séries.

Parallèlement à cela, le procédé d'obtention de pièces unitaires ou de petites séries le plus courant est toujours le martelage manuel (Figure 52b). Les temps de production sont longs et la conformité de la pièce réalisée à son dessin de définition dépend très fortement de la dextérité de la main-d'œuvre. Ce processus ne dispose donc pas d'une bonne répétabilité et se rapproche plutôt du travail d'un artisan de par ses outils et sa technique de mise en œuvre.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

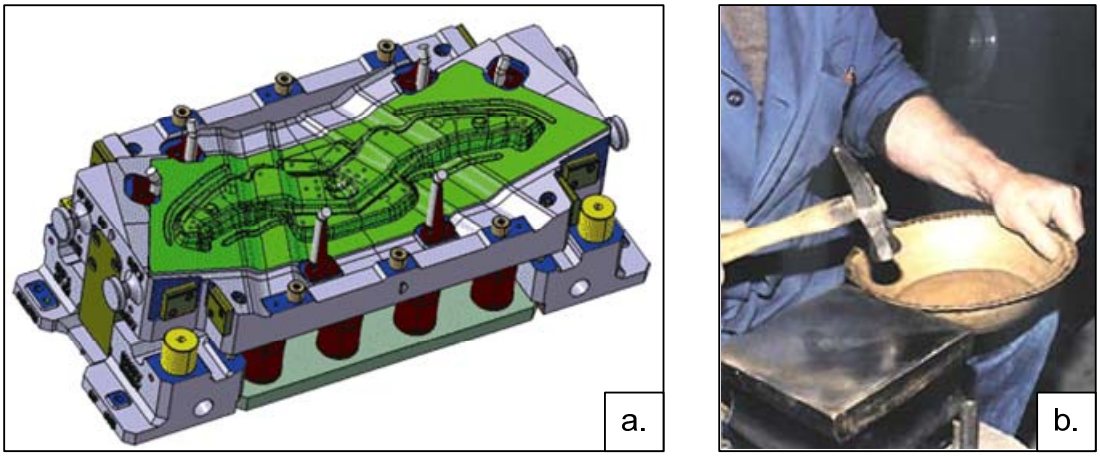


Figure 52 : a. Exemple de matrice d'emboutissage[1] - b. Martelage d'une pièce[2]

Quel procédé choisir alors pour des séries de taille moyenne (500 à 1000 pièces) ou pour la réalisation de prototypes, où la forme de pièce à réaliser peut subir plusieurs évolutions ? Un procédé émergent se positionne sur ce segment, le formage incrémental.

Concrètement, ce procédé de mise en forme consiste à déformer progressivement une tôle par repoussages successifs à l'aide d'un outil. Ce dernier suit une trajectoire calculée à partir du fichier CAO de la pièce et parcourt la tôle montée dans son porte-pièce en diminuant peu à peu son altitude jusqu'à la profondeur de pièce finale souhaitée [Lucas2006]. En conséquence, ce procédé dispose d'une bonne flexibilité car la forme de la pièce est obtenue par les trajectoires de l'outil. Sa mise en œuvre ne s'accompagne pas de coûts d'équipement importants car elle nécessite uniquement des moyens de fabrication usuels d'un atelier de fabrication mécanique, dont le principal est une MOCN.

Un brevet portant sur une machine dédiée au formage incrémental a néanmoins été déposé dès 1999 par la société japonaise AMINO. Il a été étendu à l'Europe en 2000. Il concerne une machine trois axes (x, y et z) à structure cartésienne, ainsi que les porte-pièces et outils associés. La Figure 53 présente quelques exemples de revendications relatives à ce brevet. AMINO commercialise depuis une machine de formage incrémental basée sur le brevet déposé.

La machine de formage développée possède toutefois peu de spécificités particulières dont ne disposerait pas une MOCN dédiée au fraisage. Il est donc tout à

[1] http://www.otm-france.com, 2007, date de consultation: juin 2007

[2] http://www.couleur-lauragais.fr/pages/journaux/2001/cl34/balade.htm, date de consultation: juin 2007

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

fait envisageable de réaliser des applications de formage incrémental sur une MOCN disposant de trois voire cinq axes.

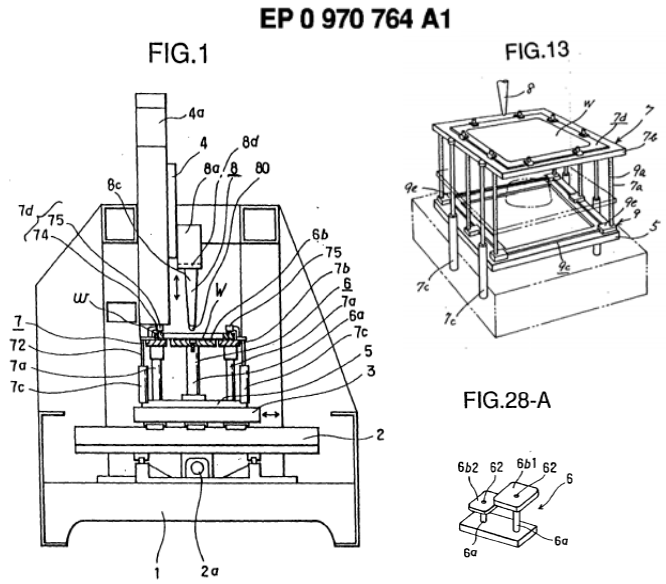


Figure 53 : Exemples de revendications du brevet AMINO [Matsubara2000]

Notre objectif dans ce chapitre est de lever les principaux verrous liés aux applications de formage incrémental sur MOCN, avec notamment la mesure de l'impact de la programmation de machine sur le déroulement du processus de mise en forme de la tôle. Les résultats exposés permettront non seulement de faire bénéficier les MOCN d'un nouveau champ d'application mais aussi d'améliorer la mise en œuvre du formage incrémental.

La première partie de ce chapitre est consacrée à une présentation technico-économique du formage incrémental. Les principales problématiques afférentes à ce procédé émergent et les principaux résultats issus de la littérature sont exposés. Nous présentons dans une deuxième partie les résultats d'une étude préliminaire à la mise en œuvre sur MOCN, visant à préparer la campagne expérimentale menée sur la MOCN VERNE. Exposée lors de la troisième partie, celle-ci étudie l'influence des principaux paramètres de programmation sur la mise en œuvre d'applications de formage incrémental. Enfin, nous concluons par quelques pistes d'optimisation de ce processus de fabrication, basées sur les capacités de la MOCN employée et sur une programmation adaptée des parcours d'outil.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

3.1 Présentation technico-économique du procédé de Formage Incrémental

L'objet de cette première partie est de présenter les principales thématiques de recherche liées au formage incrémental. Il s'agit d'un procédé de fabrication très récent, à propos duquel on ne dispose encore que peu de recul. Les travaux publiés ont tout d'abord porté sur les aspects de mise en œuvre, avec d'un côté des études sur la formabilité de la tôle, de l'autre des présentations d'outillages dédiés. Ce n'est que plus récemment que l'intérêt s'est déplacé vers la capabilité du procédé en termes de caractéristiques dimensionnelles des pièces formées et de conformité des produits fabriqués. En parallèle, la rentabilité économique du formage incrémental a été mesurée, ainsi que la définition de domaines d'application éventuels.

3.1.1 Principe de mise en œuvre et principales problématiques

Il existe plusieurs manières d'implanter le formage incrémental sur une MOCN ; celles-ci se regroupent en deux familles :

- le **formage négatif** : l'outil travaille sur la surface concave de la pièce et généralement ne nécessite aucun support.
- le **formage positif** : l'outil travaille sur la surface convexe de la pièce. L'utilisation d'un support est indispensable.

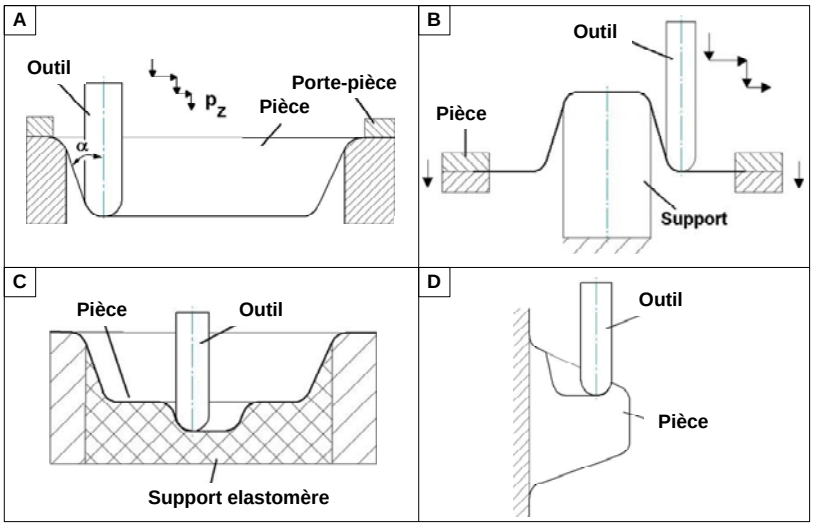


Figure 54 : Exemples de mise en œuvre du formage incrémental [Küttner2004; Pohlak2005]

La Figure 54 rassemble les principales variantes utilisées depuis l'émergence du procédé. On retrouve le formage négatif (A) ainsi que le formage positif (B). Afin

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

d'augmenter la conformité des pièces réalisées en formage négatif, des applications utilisant un support en élastomère ont également été développées (C). Enfin, certaines pièces peuvent nécessiter plusieurs directions d'approche, dans ce cas l'utilisation d'une machine multi-axes peut s'avérer avantageuse (D). D'un point de vue pratique, le formage négatif sans support est le plus facile à implémenter. La majorité des travaux de recherche dans le domaine se base sur cette approche.

En ce qui concerne la nature des matériaux utilisés, la quasi-totalité des essais réalisés emploient des alliages d'aluminium. Certains auteurs ont néanmoins testé le procédé sur d'autres matériaux : alliage de cuivre Cu DHP, acier inoxydable AISI 304, acier à emboutir, ... avec des résultats divers [Ceretti2004; Ambrogio2005; Jeswiet2005b].

Des études portant sur la formabilité des tôles ont également été menées. Elles ont suivi principalement deux voies : déterminer l'angle maximal de formage et mesurer les capacités de déformation du matériau à l'aide de ce nouveau procédé. Emboutissage et formage incrémental ont ainsi pu être comparés, sur la base de Courbes Limites de Formage (CLF) : il s'agit d'un outil graphique, très utilisé en emboutissage, représentant le lieu des points de striction dans le plan des déformations principales ($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$). Ceux-ci sont obtenus en faisant subir différents tests à un flan d'un matériau donné, dans une direction donnée par rapport à la direction de laminage. L'objectif est de faire travailler le matériau en expansion (diminution de l'épaisseur) et en rétreint (augmentation de l'épaisseur) afin de couvrir la plus grande zone possible du diagramme ($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$). Dans les faits, la CLF détermine « l'emboutissabilité » du matériau : plus les points de striction sont loin du centre du diagramme, plus le matériau est apte à être déformé. Les résultats présentés par les différents auteurs sont tous concordants : les CLF du formage incrémental sont bien au-dessus de celles de l'emboutissage [Shim2001; Kim2002b; Park2003; Hagan2004; Jeswiet2005b] ; un exemple de tracé est donné par la Figure 55. Cette situation s'explique par le fait qu'en formage incrémental, on contrôle mieux les lieux des déformations, ce qui permet de limiter les zones de striction. La forme de la CLF est également différente et se résume à une droite. Comme les résultats proposés ne concernent que du formage négatif, la déformation ne s'effectue qu'en expansion et la CLF est limitée au quadrant des valeurs positives du couple ($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$). Ce concept a depuis été étendu par Ham et Jeswiet à celui de surface de formage, permettant de visualiser les taux de déformation atteignable en fonction des paramètres du procédé [Ham2007].

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

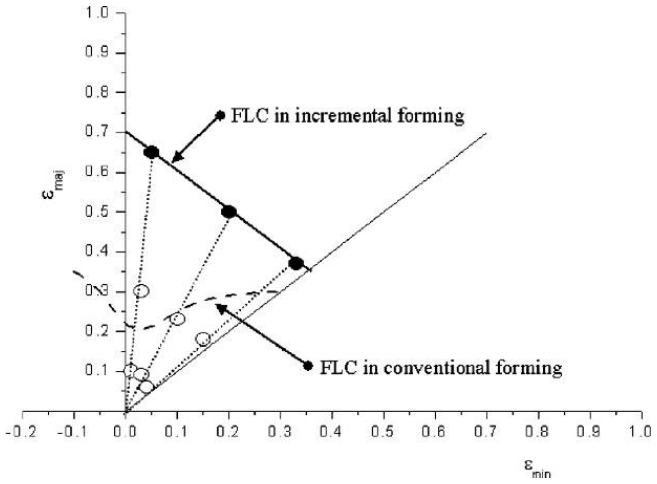


Figure 55 : CLF du formage incrémental et de l'emboutissage [Park2003]

Le second aspect lié à la formabilité est la détermination de l'angle maximal de formage. Il s'agit en effet d'un paramètre limitant pour la variété géométrique des pièces réalisables par formage incrémental. Ainsi, dans [Jeswiet2005c], Jeswiet et Young cherchent à déterminer l'angle jusqu'auquel la tôle peut être repoussée sans voir apparaître de zones de rupture, ceci pour des alliages d'aluminium 3003-0 et 5754-0. Le cas du formage positif est traité de manière expérimentale par Kopac et Kampus dans [Kopac2005]. Dans [Hussain2007], des pièces à profils paraboliques et exponentiels sont formées afin d'atteindre le même objectif. Enfin, certains résultats récents sont très encourageants : la réalisation de parois verticales (pièces à angle droit) en acier devient possible [Lucas2006].

Pour compléter ces résultats sur la formabilité, nous pouvons enfin faire référence aux travaux de Jeswiet et Young portant sur l'influence de la vitesse de rotation de l'outil [Jeswiet2005c]. Leurs conclusions indiquent que cette dernière n'a pas d'influence mesurable sur la formabilité de la tôle mais peut conduire, selon ses valeurs, à une usure prématurée de l'outil, à cause de l'échauffement créé par la friction.

Pour finir la présentation des principales problématiques soulevées, nous nous intéresserons aux travaux portant sur la conformité des pièces formées. Il s'agit d'une thématique plus récente que la formabilité ou la description des outillages. Sur ce point, il est apparu assez tôt que les pièces formées étaient souvent très éloignées de leur modèle CAO, en particulier à cause des effets du retour élastique [Ambrogio2005; Hascoet2006d]. La majorité des travaux sur le sujet a pour objet de prédire la forme finale par des analyses par éléments finis. Leur but est ensuite de modifier les trajectoires de l'outil pour que la pièce finale soit conforme au modèle CAO [Ambrogio2004]. La détermination d'un modèle convenable par méthode des éléments

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

finis est néanmoins assez difficile pour les procédés de mise en forme de pièces de tôlerie [Flores2007].

3.1.2 Moyens nécessaires

Outre une MOCN, le formage incrémental s'appuie sur des outillages spécifiques. De nombreux travaux de recherche ont été menés pour la définition d'outils et de matrices performants.

Les principaux outils de formage utilisés sont à tête hémisphérique, avec un rayon variant entre 5 mm et 25 mm. Cependant, d'autres modèles d'outil ont été testés par les différents auteurs. On retrouve par exemple l'utilisation d'outils vibrants, qui permettent de limiter les efforts sur la machine et de diminuer les déformations indésirables par une réduction des frottements [Schaefer2005]. Ce type d'outil a toutefois l'inconvénient de produire des vibrations importantes du flan, ce qui nécessite une isolation phonique du moyen de fabrication pour limiter les émissions sonores. Sur le même principe, on trouve également l'utilisation d'un outil multi-tête, dont la rotation provoque des impacts sur la tôle [Murata1999]. Comme on peut le voir sur la Figure 56, son utilisation peut s'avérer bénéfique dans le cas de pièces comportant des déformations importantes. Les auteurs restent toutefois discrets sur les caractéristiques de cet outil (dimensions, vitesse de rotation, …).

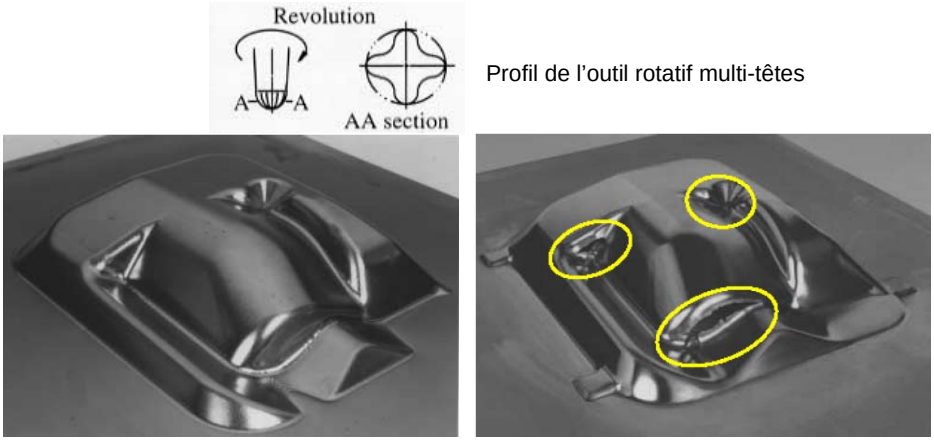


Figure 56 : Utilisation d'un outil de formage multi-têtes [Murata1999]

Dans le cas du formage positif, une autre amélioration intéressante a été proposée : l'utilisation d'un outil rétractable [Ceretti2004]. Il ne s'agit pas d'une modification de la forme de l'outil en lui-même, mais plutôt d'une nouvelle conception du porte-outil avec l'ajout d'un ressort (Figure 57). En pratique, le système se

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

rétracte lorsque l'effort sur l'outil devient supérieur à la précharge du ressort. On peut ainsi protéger la broche de la MOCN d'un écrasement de l'outil contre la matrice en assurant un effort maximal de déformation, chose qui n'est pas possible avec la programmation actuelle des MOCN basée sur des consignes de vitesse et de position uniquement. Malgré ses avantages, il semble que ce système n'ait connu qu'une diffusion restreinte. Le dimensionnement de ses éléments, par des simulations éléments finis, est en effet assez fastidieux.

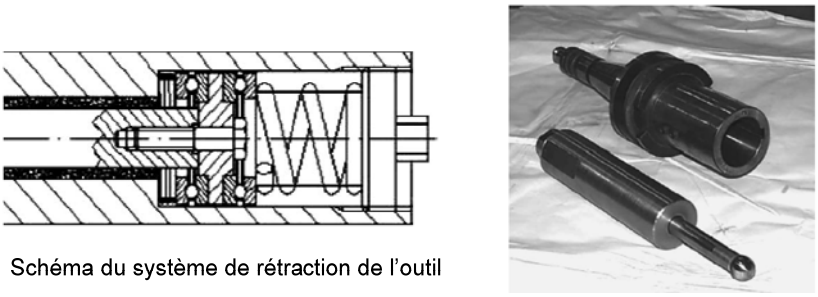


Figure 57 : Outil de formage rétractable [Ceretti2004]

Les applications de formage positif demandent également la réalisation de supports et de matrices (Figure 58). Ce type de formage est donc plus difficile et plus coûteux à mettre en œuvre. Il offre pourtant la possibilité de réaliser des pièces plus complexes qu'en formage négatif [Park2003]. Dans la plupart des cas, de simples supports peuvent suffire, mais ceux-ci doivent être conçus avec une attention particulière pour que la pièce réalisée soit conforme à son dessin de définition. Ceci a pour conséquence de diminuer la flexibilité du procédé, même si la réalisation d'un support de formage positif est moins complexe que celle d'une matrice d'emboutissage. Dans les faits, très peu de travaux portant sur des applications de formage positif ont été publiés, la majorité des auteurs se concentrant sur le formage négatif.

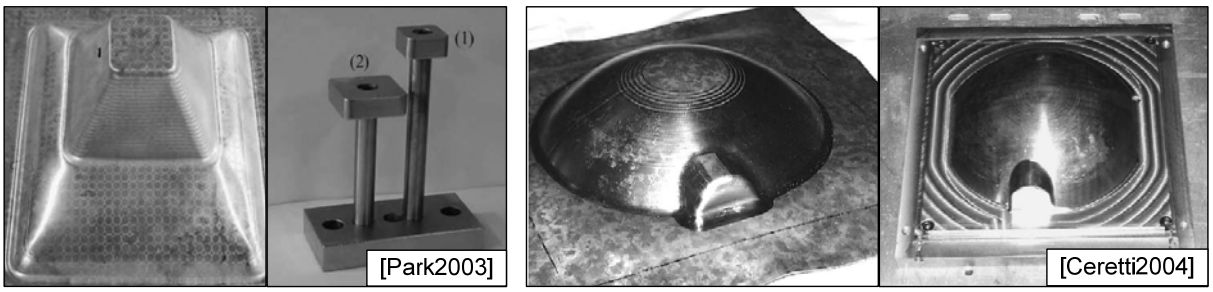


Figure 58 : Exemples de pièces réalisées en formage positif avec les supports associés

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Au niveau des machines de formage, la seule développée et vendue spécifiquement pour des applications de formage incrémental est le modèle commercialisé par AMINO (Figure 59), les revendications de leur brevet leur assurant un statut de monopole. Toutefois, le prix de cet équipement, voisin de 700 000 euros ([Lucas2006]), a limité sa diffusion et la quasi-totalité des laboratoires travaillant sur le formage incrémental utilisent des MOCN de fraisage pour réaliser leurs expérimentations. Les publications portant sur le formage incrémental restent toutefois très discrètes sur les caractéristiques des machines outils employées (performances cinématiques, DCN employé, …).

Figure 59 : Machine AMINO dédiée au formage incrémental [Jeswiet2005b]

3.1.3 Aspects économiques et domaines d'application

Grâce à sa flexibilité de mise en œuvre, le formage incrémental vise principalement deux types d'application, la réalisation de prototypes et la fabrication en petites et moyennes séries.

Dans le cas de prototypes, le formage incrémental permet ainsi de réaliser des pièces à moindre coût, comparativement à l'emboutissage. Lors des étapes de conception d'un nouveau produit, il est en effet assez aisé de répercuter les diverses évolutions de géométrie sur des prototypes réalisés en « vraie matière ». En effet, la mise au point du process s'appuie principalement sur des modifications de trajectoires ; elle s'effectue donc à moindre coût et de façon très réactive. A l'heure actuelle, le formage incrémental a été testé avec succès pour la réalisation de prototypes automobiles, comme des réflecteurs ou des collecteurs d'air [Jeswiet2005b], ou de produits à forte personnalisation, comme des prothèses de hanches [Ambrogio2005]. Le formage incrémental peut également constituer une solution pour

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

la réalisation de produits dont les outillages d'emboutissage ont des coûts prohibitifs, comme des fours solaires destinés aux pays en voie de développement [Jeswiet2005a].

Pour les fabrications en petites et moyennes séries, la rentabilité économique du formage incrémental a été étudiée par certains auteurs, afin de définir des domaines d'applications privilégiés pour ce procédé émergent. Ils ont pour cela comparé ce nouveau procédé avec l'emboutissage en se basant sur des modèles de coût [Hirt2003; Tuomi2004]. Ainsi, le formage incrémental est rentable pour les lots inférieurs à 700 pour les grandes pièces, tels les capots de voiture, et pour les lots inférieurs à 250 pour les pièces plus petites (Figure 60). Une comparaison des process de réalisation explique cette situation : en formage incrémental, les étapes de réalisation sont plus flexibles et le réglage des différents paramètres pour l'obtention d'une pièce conforme aux spécifications induit des coûts plus faibles que pour l'emboutissage [Tuomi2004].

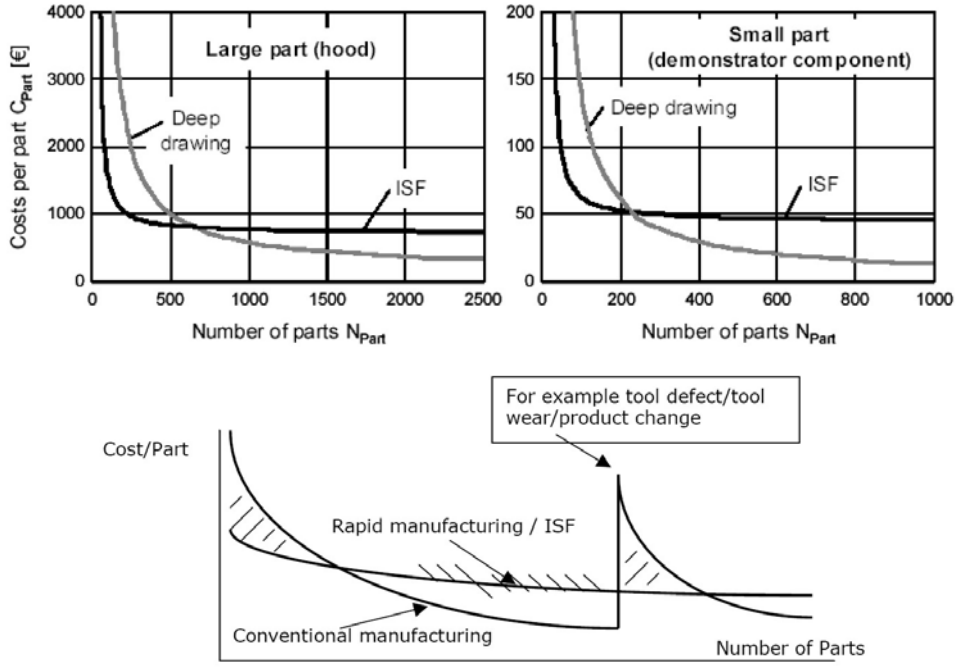


Figure 60 : Coûts estimés d'une pièce en formage incrémental et en emboutissage [Tuomi2004]

Jeswiet et al. apportent un autre éclairage. Selon eux, le seuil de rentabilité du formage incrémental à 700 pièces est pessimiste car il est basé sur une analyse purement économique, ce qui a tendance à pénaliser les procédés émergents [Jeswiet2005b]. Ainsi, en s'appuyant sur [Allwood2005], ils énoncent que le formage incrémental s'intègre très bien dans un environnement de production distribuée avec des produits hautement personnalisés. Néanmoins, cela reste avant tout un procédé

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

en plein essor et ses domaines d'applications s'étendront lorsqu'il aura gagné en capabilité et en notoriété.

3.1.4 Programmation de la MOCN et capabilité du procédé

Nous avons montré aux paragraphes précédents que la thématique portant sur la conformité des pièces produites est assez récente. Elle constitue néanmoins une étape nécessaire pour le développement d'applications de formage incrémental car celui-ci impose de disposer d'éléments solides concernant la capabilité de ce procédé.

Parmi les paramètres influents, les trajectoires programmées occupent une part importante. En effet, si un aperçu global du procédé, ainsi que les premières études publiées sur le sujet, laissent croire qu'il suffit d'utiliser des trajectoires générées par un logiciel de FAO pour former une tôle, l'obtention de produits conformes au dessin de définition passe nécessairement par une programmation de trajectoires spécifiques au formage.

Ce point de vue est repris par de nombreux travaux portant sur la capabilité du formage incrémental. La principale source de défaut identifiée est le retour élastique de la tôle après retrait de l'outil. Pour contrer ces effets, Ambrogio et al. proposent de programmer des trajectoires « viciées », délibérément fausses par rapport au modèle CAO, mais qui aboutissent à une géométrie de pièce conforme après desserrage de la pièce [Ambrogio2004; Ambrogio2005]. Une autre approche, développée par Hirt et al., consiste à adapter les trajectoires après mesure des défauts de la première pièce formée [Hirt2004].

Plus concrètement, les travaux publiés se basent principalement sur des trajectoires de type contour parallèle, et dans une moindre mesure, de type spirale. Kopac montre qu'en formage négatif, il faut partir des bords de la tôle pour finir vers le centre [Kopac2005]. L'emploi de stratégies en spirale est préconisé pour le formage positif [Ceretti2004] mais aussi pour le formage négatif [Jeswiet2005b]. Dans leurs travaux, Attanasio et al. comparent des trajectoires à incrément axial constant à des trajectoires à hauteur de crête constante. Les dernières améliorent nettement le positionnement et la rugosité des surfaces formées [Attanasio2006; Attanasio2007].

Enfin, une synthèse des publications portant sur le formage incrémental nous a permis d'identifier les paramètres influents sur le déroulement du procédé ainsi que les valeurs généralement utilisées. Le Tableau 10 regroupe ces paramètres ainsi que les valeurs testées dans les différents travaux.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Paramètre	Valeurs utilisées dans les publications sur le Formage Incrémental
Type	Positif – Négatif
Forme de l'outil	hémisphérique – à bille
Diamètre de l'outil	5 mm – 10 mm – 15 mm
Matériau de la tôle	Alliages d'aluminium – acier – cuivre
Epaisseur de la tôle	0.3 mm – 0.5 mm – 0.8 mm
Vitesse d'avance	0.1 m/min – 0.5 m/min – 1.0 m/min
Incrément radial	0.5 mm – 1.0 mm – 2.0 mm
Incrément axial	0.5 mm – 1.0 mm – 1.5 mm
Trajectoires	spirales – contours parallèles
Sens de parcours de la trajectoire	intérieur vers extérieur – extérieur vers intérieur
Lubrification	avec – sans
Inclinaison de la paroi	30° - 45 ° - 60°

Tableau 10 : Valeurs de paramètres relevées dans les différents travaux

Tout comme en usinage, la programmation de trajectoires de formage performantes est un enjeu central pour la capabilité de ce procédé. Il s'agit néanmoins d'une problématique non triviale, dont la résolution concentre la grande majorité des travaux actuels.

3.2 Etude préliminaire à la mise en œuvre : modélisation des déformations

Avant de mettre en œuvre le formage incrémental sur MOCN, nous avons réalisé une analyse par simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis [Hascoet2006d]. Notre but principal était de déterminer un ordre de grandeur des efforts de déformation de la tôle. Etant donné le peu de recul dont nous disposions sur ce procédé au moment de ces tests, il fallait également s'assurer de la capabilité de la MOCN VERNE tout en préservant ses éléments, en particulier la broche. De plus, cette action nous a permis d'obtenir des premiers résultats concernant l'impact de certains paramètres sur le déroulement du procédé, en particulier concernant la relation entre les déformations de la tôle et les efforts appliqués, ceci afin de mieux cibler les domaines d'investigation des travaux ultérieurs.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Des modèles éléments finis ont été développés pour des applications de formage positif et négatif. Les résultats de simulation ont ensuite été confrontés à des validations expérimentales menées sur la MOCN VERNE.

3.2.1 Simulation numérique de la déformation de la tôle

Dans ce paragraphe, nous détaillons les modèles développés ainsi que les résultats obtenus [Friant2005]. L'étude se concentre sur un seul matériau, l'alliage d'aluminium 5086 H111, qui possède les mêmes propriétés que ceux utilisés fréquemment dans l'industrie aéronautique. Nous avons choisi une modélisation élasto-plastique avec écrouissage. Afin d'obtenir un compromis entre précision et temps de calcul, un modèle plan basé sur des éléments triangulaires à six nœuds a été retenu.

Les efforts de l'outil sur la tôle sont représentés par une force constante F. Malgré le caractère plastique des déformations, le modèle de chargement obéit à la théorie de Hertz. Le rayon de contact entre l'outil sphérique et la tôle, notée a, est obtenu par l'équation (9), en utilisant les valeurs de paramètres suivantes : E_{outil}=210 GPa, ν_{outil}=0.3 car l'outil est en acier et : $E_{tôle}$=70 GPa, $\nu_{tôle}$=0.33 car la tôle est en alliage d'aluminium.

$$a = \left(\frac{r.F}{K} \right)^{1/3} \qquad \text{avec} \quad K = \frac{4}{3} \left(\frac{1-\nu_{outil}^{\ 2}}{E_{outil}} + \frac{1-\nu_{tôle}^{\ 2}}{E_{tôle}} \right)^{-1} \tag{9}$$

Par hypothèse, le chargement parabolique et prend une valeur maximale F en x=0 et une valeur nulle en x= -a et x=a. Enfin, le chargement est discrétisé en dix charges réparties constantes F_k, décrites par l'équation (10).

$$F_k = -\frac{F}{500}\left(3.k^2 - 33.k + 16\right) \quad , \; k \in [\![1;10]\!] \tag{10}$$

A l'aide de cette modélisation, trois types de simulation ont été développés à l'aide du logiciel Cast3M [CEA], pour rendre compte de situations courantes de formage positif et négatif.

La première étude a pour objet le formage positif. Il s'agit d'évaluer l'étendue et l'importance de la déformation d'une tôle lors de l'application d'un effort localisé. L'outil sphérique vient donc plaquer la tôle d'aluminium sur une matrice indéformable en exerçant un effort de 100 N et la variation d'épaisseur de la tôle est étudiée. Les paramètres variant d'une simulation à l'autre sont le diamètre d'outil (12, 17 et 22 mm) ainsi que l'épaisseur initiale de la tôle (0.5, 1.5, 2.5 mm).

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

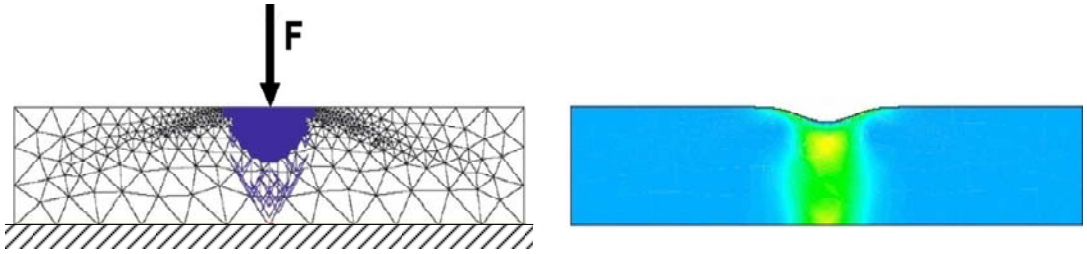


Figure 61 : Modélisation du formage positif

Un exemple de modélisation est donné sur la Figure 61. La déformation est localisée au droit de l'outil. On retrouve ainsi les résultats de Ceretti et al. dans [Ceretti2004]. Ses valeurs s'étendent de 0 µm en bleu à 83 µm en jaune. Plus le rayon de l'outil est grand, plus petite est la variation d'épaisseur. De plus, la déformation peut être considérée comme nulle pour la tôle de 2.5 mm ; elle est maximale pour la tôle de 0.5 mm. Ceci peut-être expliqué par le fait que la valeur de l'effort appliqué est la même pour tous les essais. Ainsi, avec un grand rayon, la pression surfacique est moindre. De la même manière, le ratio entre l'épaisseur de tôle et l'effort appliqué est plus important pour les épaisseurs plus faibles.

Le modèle suivant porte sur le formage négatif. Un outil sphérique applique un effort de 50 N sur tôle préformée. Nous étudions ici trois incréments axiaux (0.3, 0.6 et 0.9 mm), deux diamètres d'outil (10 et 20 mm) ainsi que deux pentes initiales (30° et 60°). Tout comme pour le modèle précédent, la variation d'épaisseur est étudiée.

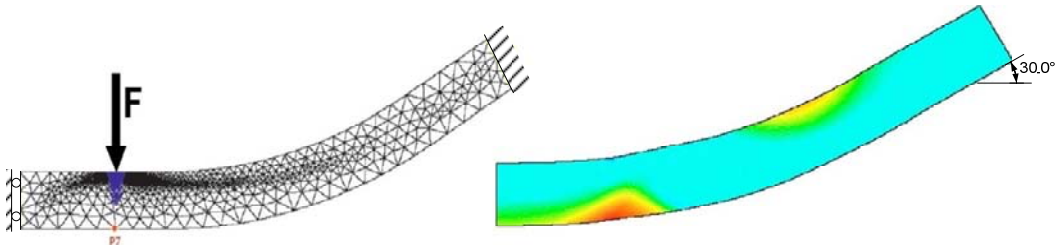


Figure 62 : Modélisation du formage négatif

Les résultats obtenus montrent que la variation d'épaisseur est très localisée au droit du point d'application de l'effort de formage (Figure 62). Les valeurs sont comprises entre 0 µm en bleu et 135 µm en rouge. Par contre, contrairement au formage positif, le taux de déformation est plus important pour un diamètre d'outil plus important. La déformation la plus importante est, quant à elle, obtenue pour une pente de 30° couplée à un incrément axial de 0.9 mm, soit la valeur maximale testée.

Un troisième modèle de simulation a été développé afin de rendre compte de chargements successifs en formage négatif. Ainsi, six chargements successifs F_1 à F_6

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

ont été appliqués, correspondant aux six premiers pas de déformation du flan. Du fait de la symétrie du problème, seule la partie droite de la tôle a été étudiée. Du fait de l'encastrement du flan sur tout son pourtour, le côté gauche du modèle (centre de la tôle) peut subir une translation selon l'axe z mais pas de rotation. Le côté droit (pourtour de la tôle) est modélisé en liaison encastrement. Le but de cette étude est d'évaluer les réductions d'épaisseur de la tôle lors de l'application successive des efforts F_1 à F_6. Les valeurs des paramètres utilisées sont les suivantes : 50 N pour chacun des F_i, 30° pour la pente finale de la tôle, 0.6 mm pour l'incrément axial, 20 mm pour le diamètre de l'outil et 1 mm pour l'épaisseur de la tôle.

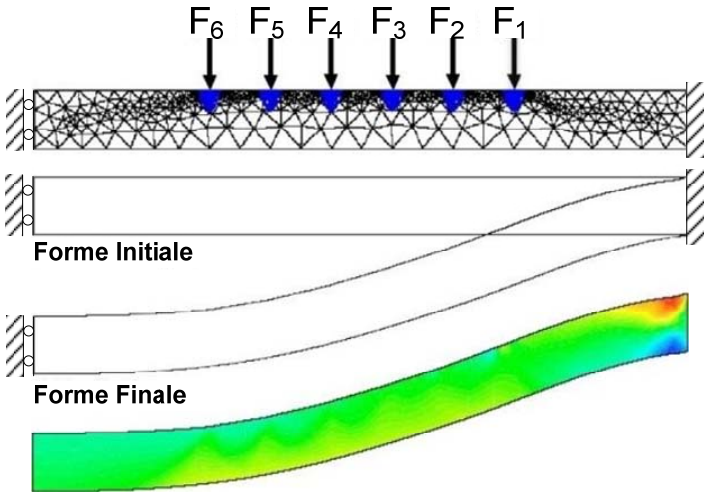


Figure 63 : Modélisation de chargements successifs en formage négatif

Les résultats de cette simulation, donnés sur la Figure 63 montrent que la déformation plastique la plus importante se situe au niveau de la zone de serrage de la tôle. Au niveau quantitatif, la valeur des déformations varie de - 120 µm en bleu foncé à 170 µm en rouge. Les zone en jaune représentent 25 µm. Les déformations apparaissant au droit de l'outil sont donc peu significatives comparées à celles de la zone de serrage.

Au global, les simulations effectuées montrent que les valeurs des efforts générés par le procédé permettent une implantation sur MOCN. En formage négatif, le passage de l'outil ne provoque pas de variation locale de l'épaisseur. En formage positif, la tôle est coincée entre l'outil et le support, la déformation est localisée au droit de l'outil. L'effort de pincement devient très vite important et peut endommager la pièce et les outillages. La mise en œuvre de formage positif nécessite donc une programmation rigoureuse des parcours d'outil afin d'éviter tout défaut.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

3.2.2 Validation des résultats sur MOCN Verne

Une étude expérimentale sur la MOCN VERNE a permis de confronter les résultats obtenus par simulation éléments finis à la mise en œuvre sur machine outil, en particulier pour le cas du formage positif. Elle a également eu pour but d'analyser la capabilité de la MOCN face à ce nouveau procédé.

Nous avons donc équipé le porte-outil de la machine d'un outil hémisphérique. Une platine d'acquisition d'efforts Kistler a été montée sur le plateau et nous avons placé une tôle d'aluminium de nuance 5086 H111 entre la plateforme et l'outil (Figure 64). Les efforts ont ensuite été acquis tandis que l'outil écrasait la tôle sur la plateforme. Afin d'éviter toute perturbation liée à un défaut de surface du bout de l'outil, obtenu par tournage, nous avons utilisé l'axe B de la machine outil pour éviter de travailler avec l'extrémité de l'outil.

Figure 64 : Dispositif expérimental

Trois diamètres d'outil (12 mm, 17 mm, 22 mm) et deux épaisseurs de tôle (0.6 mm et 1.2 mm) ont été testés pour disposer d'éléments de comparaison suffisants par rapports aux résultats de simulation. Contrairement à l'étude par éléments finis, les efforts n'ont pas été imposés mais mesurés en fonction du déplacement de l'outil. Une étude de répétabilité a également été menée pour ces essais. Elle s'est avérée concluante, la dispersion des mesures étant inférieure à 4%.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus nous conduisent aux premières conclusions suivantes : le paramètre épaisseur de la tôle ne devient significatif que pour les diamètres d'outil les plus importants. Ainsi, pour l'outil de 12 mm, les efforts relevés sont identiques pour chacune des épaisseurs alors que pour l'outil de 22 mm, on observe une différence de près de 25% entre la tôle de 0.6 mm et celle de 1.2 mm. Parallèlement à cela, pour une même valeur de déformation, l'effort

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

correspondant est supérieur pour l'outil de plus grand diamètre. Cette situation s'explique par une plus grande surface de contact.

Par suite, la comparaison des résultats expérimentaux avec les simulations numériques montre une assez bonne concordance pour la tôle de 0.6 mm. Les prévisions calculées sont supérieures de 15% aux valeurs mesurées. Par contre, l'écart est plus important pour la tôle de 1.2 mm, les valeurs mesurées sont doubles par rapport aux résultats de simulation. Une cause possible de cette discordance peut provenir du fait que les déplacements, mesurés à l'aide du DCN, ne correspondent pas exactement à la déformation plastique du matériau. En effet, ces relevés de position ne tiennent pas compte de l'erreur de pose de l'outil relative au modèle de transformation géométrique. Si bien que la valeur réelle de la position de l'outil ne correspond pas à la valeur affichée. A cela s'ajoute également une incertitude de mesure liée à la platine de mesure (50N pour une charge de 800 N, soit près de 6%).

3.2.3 Bilan des simulations

L'objectif des simulations par éléments finis réalisées ici n'est pas d'aboutir à la modélisation du processus d'obtention d'une pièce complète. Il s'agit essentiellement de préparer une mise en œuvre du procédé sur MOCN en identifiant certains paramètres influents et de valider la capabilité d'une machine à structure parallèle pour l'implémentation d'applications de formage incrémental.

Dans le cas du formage négatif, les résultats des simulations montrent que le passage de l'outil crée une déformation de la tôle sans variation d'épaisseur significative. Une programmation efficace des trajectoires suivies par l'outil permettra donc de contrôler le flux de déformation de la tôle. Par contre, la variation d'épaisseur est importante au niveau de la zone de serrage, cela conduit donc à une fragilisation de la pièce formée pouvant être néfaste pour la tenue en service.

Dans le cas du formage positif, comme la tôle est coincée entre l'outil et la matrice, la déformation et la variation d'épaisseur deviennent rapidement importantes au droit de l'outil. Un écrasement peut ainsi conduire à l'endommagement non seulement de la tôle mais aussi de la machine outil (en particulier la broche en cas de collision avec la contre-forme). La définition de trajectoires permettant d'éviter ce type de cas s'avère donc un enjeu crucial lié à la mise en œuvre de formage incrémental positif.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Ces premiers résultats présagent que la mise en œuvre performante d'applications de formage incrémental nécessite une programmation optimisée des trajectoires de l'outil, tant en formage positif qu'en formage négatif.

Les essais sur MOCN ont validé les conclusions de la pré-étude par éléments finis pour les tôles de faible épaisseur. De plus, ils ont constitué une première approche de la mise en œuvre du formage incrémental sur MOCN, permettant ainsi la préparation d'une campagne expérimentale plus poussée ayant pour objectif de mesure l'impact des trajectoires programmées sur la MOCN sur le déroulement du process.

3.3 Impact des trajectoires programmées sur la mise en œuvre du process

Les simulations numériques nous ont permis de mieux identifier les paramètres influents lors de la mise en œuvre du formage incrémental. Cette partie est consacrée à une étude expérimentale de mise en œuvre du formage incrémental négatif (sans support) menée sur la machine outil parallèle VERNE. Son principal objectif est d'évaluer l'influence des principaux paramètres du procédé lors de la réalisation d'une pièce complète (Figure 65), en particulier ceux liés à la programmation de la MOCN [Hascoet2006d]. En effet, nous montrerons qu'une optimisation de la mise en œuvre du formage incrémental s'appuie nécessairement sur une programmation adaptée des parcours d'outil : trajectoires, valeurs des incréments, vitesses de déplacement, … Ainsi, si ce procédé de fabrication est très différent de l'usinage, les problématiques qu'il soulève en sont très proches. Des compétences en génération de trajectoires de fraisage constituent alors un avantage certain pour une mise en œuvre performante d'applications de formage incrémental. Dans une moindre mesure, cette étude expérimentale a aussi conduit à l'identification des difficultés de mise en œuvre de ce nouveau procédé. Le formage incrémental n'ayant été développé que depuis le début des années 2000, nous ne disposions que de peu de retours sur expérience.

En nous appuyant sur les résultats obtenus par les travaux présentés au cours de l'étude bibliographique, nous avons choisi de centrer notre travail sur trois paramètres liés à la programmation de la machine : la vitesse d'avance, l'incrément axial (Δz) et le type de trajectoire utilisé. Cette décision nous a placés dans la situation de pouvoir monter un plan d'expérience complet.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

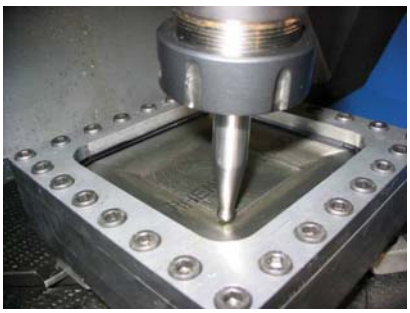


Figure 65 : Mise en œuvre du procédé

Les autres paramètres sont restés identiques pour tous les essais effectués. Ainsi, après une courte étude visant à comparer plusieurs diamètres d'outil et en nous basant sur les résultats trouvés lors de l'étude bibliographique, nous avons utilisé un outil à tête hémisphérique d'un diamètre de 10 mm. En utilisant cette valeur de diamètre, nous rejoignons les résultats de Kim et Park dans [Kim2002b]. Quant au porte-pièce développé, il a été conçu de manière à pouvoir maintenir la tôle sur tout son périmètre sans nécessiter le perçage de trous de fixation (Figure 65).

La tôle à former est constituée d'un alliage d'aluminium 5086H111 et son épaisseur est de 0.6 mm, ceci afin de coller aux cas d'étude usuels. La géométrie de la pièce test, présentée sur la Figure 66, est une pyramide à base carrée de pente 30°.

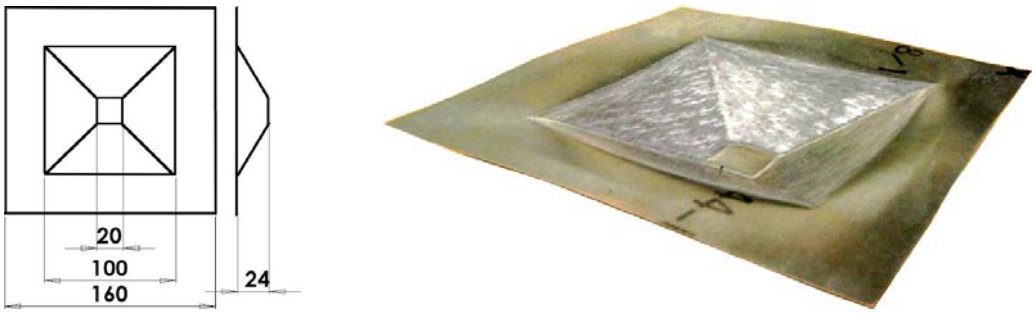


Figure 66 : Géométrie de la pièce test

Lors de la définition du plan d'expérience, nous avons choisi deux paramètres à deux niveaux, la vitesse d'avance et l'incrément axial, et un paramètre à trois niveaux, le type de trajectoire. Douze essais ont donc été nécessaires au test de toutes les combinaisons. La répartition des valeurs des paramètres pour chacun des essais est donnée par le Tableau 11.

Essai	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Vitesse d'avance (m/min)	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5
Incrément axial (mm)	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5	1	1
Type de trajectoire	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3

Tableau 11 : Valeurs des paramètres pour chaque essai

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Les trajectoires de formage testées sont définies à l'aide de la Figure 67. De manière concrète, la stratégie 1 exécute des passes à z constant ; la prise d'incrément axial entre chaque passe est prise uniquement le long de l'axe de l'outil (selon z). Pour la stratégie 2, la prise de passe axiale est obtenue graduellement le long d'un côté du carré constituant la coupe de la pyramide normale à l'axe z. Enfin, pour la stratégie 3, le quart de l'incrément axial est pris sur chaque côté du carré de manière progressive. La stratégie 1 et la stratégie 3 sont directement inspirées de trajectoires de fraisage très répandues (contournage et spirale) et dédiées à des opérations de finition. Afin de préciser le propos, il est utile de rappeler que notre but n'est pas ici de proposer de nouvelles trajectoires de formage mais plutôt de mettre en lumière l'importance des stratégies de formage sur la mise en œuvre du formage incrémental.

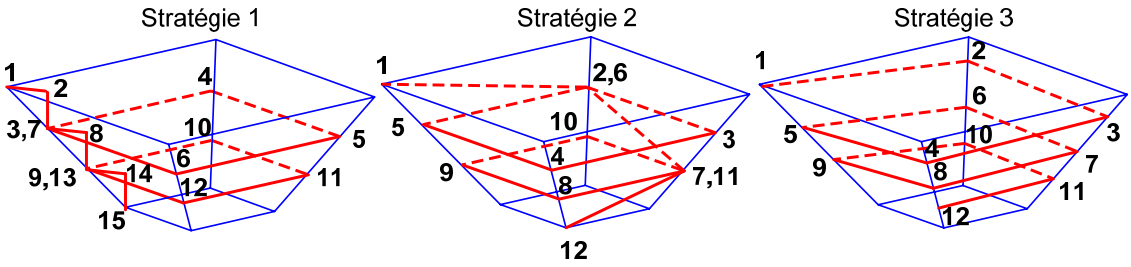


Figure 67 : Stratégies de formage testées

Enfin, l'objet des expérimentations menées dans le cadre de ce plan d'expériences n'est pas uniquement de déterminer la meilleure combinaison de paramètres mais principalement de montrer en quoi la programmation de la MOCN utilisée, notamment la définition des trajectoires de formage, peut être un facteur d'optimisation de la mise en œuvre du procédé de formage incrémental.

De manière concrète, nous allons baser cette étude sur l'observation des réponses relatives à la productivité, à la conformité de la pièce formée au modèle initial et aux efforts de formage.

3.3.1 Efforts de formage

Bien que les simulations numériques et leur validation expérimentale aient montré que des essais en formage négatif ne risquaient par d'endommager la MOCN VERNE, nous avons jugé utile de mesurer les efforts de formage lors de chaque essai. En effet, ceux-ci donnent une très bonne image de la déformation de la tôle et s'avèrent être un indicateur performant de l'intégrité de la pièce formée.

Lors de chaque essai, les efforts nécessaires au formage d'une pièce complète ont ainsi été mesurés à l'aide d'une platine dynamométrique 3D Kistler. Nous nous

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

sommes intéressés à deux types de relevés. Tout d'abord la Force Maximale Mesurée, définie comme la valeur maximale mesurée sur tout l'essai ; ensuite la Force Maximale Lissée, calculée à partir d'une courbe de tendance déduite de la courbe mesurée. Si elle ne donne aucune information sur l'effort maximal nécessaire et ne peut donc pas être utilisée seule (pour des raisons de sécurité de équipements notamment), la Force Maximale Lissée donne une bonne représentation des efforts moyens demandés pour former une pièce complète. Un exemple d'acquisition de la platine dynamométrique est proposé sur la Figure 68.

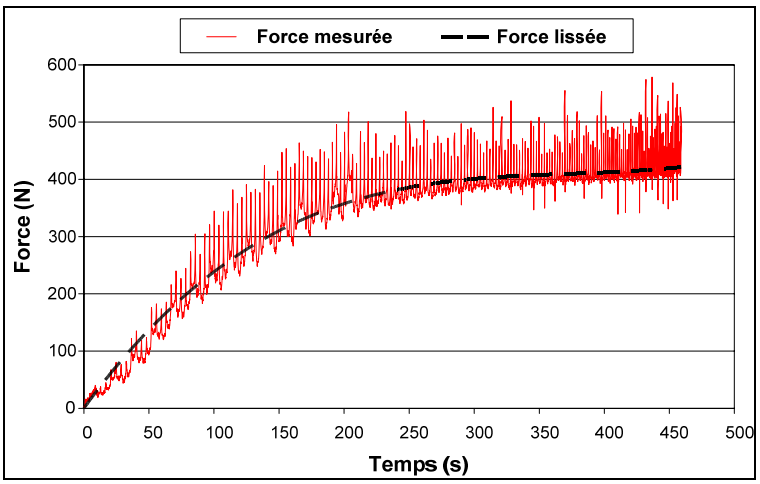


Figure 68 : Exemple de courbe d'effort de formage obtenue lors des essais

Comme notre objectif ici n'est pas de rechercher l'angle maximal de formage (pente maximale de la pyramide) avant qu'un défaut apparaisse sur la tôle, les relevés d'efforts que nous avons obtenus ne présentent pas le pic, caractéristique d'une rupture, que proposent beaucoup de publications sur le formage incrémental et dont un exemple est donné par la Figure 69 [Filice2006] (où l'abscisse n'indique pas le temps de formage mais un paramètre qui lui est proportionnel, la profondeur atteinte). Nos résultats sont plutôt à rapprocher de ceux de Duflou et al. présentés dans [Duflou2007].

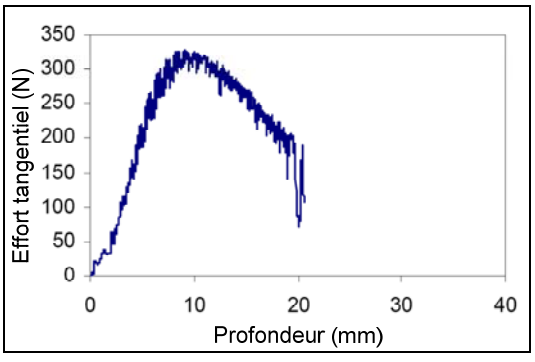


Figure 69 : Courbe d'effort caractéristique d'une pièce endommagée [Filice2006]

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Les résultats pour chacun des douze essais sont consignés sur la Figure 70. Ceux-ci montrent que la vitesse d'avance n'a aucun effet significatif sur les efforts de formage. Cette hypothèse est confirmée par d'autres essais menés avec des vitesses d'avances de 3 m/min et 5 m/min, dont les relevés de force mesurée et de force lissée restent dans une zone de 4% autour de la valeur obtenue pour 1.5 m/min. De plus, ces résultats ne présentent aucune tendance particulière.

A l'inverse, le type de trajectoire utilisé influe sur les efforts nécessaires au formage de la tôle. Ainsi, la stratégie 1 génère les pics d'effort mesurés les plus importants, la valeur du pic le plus haut étant quasiment égale au double de la valeur de la Force Maximale Lissée. Cela s'explique par la manière dont l'incrément axial est obtenu avec cette trajectoire : la plongée selon l'axe z (normal à la base de la pyramide) provoque un impact sur la tôle. Néanmoins, aucune influence déterminante de la stratégie de formage sur les efforts moyens n'est observée.

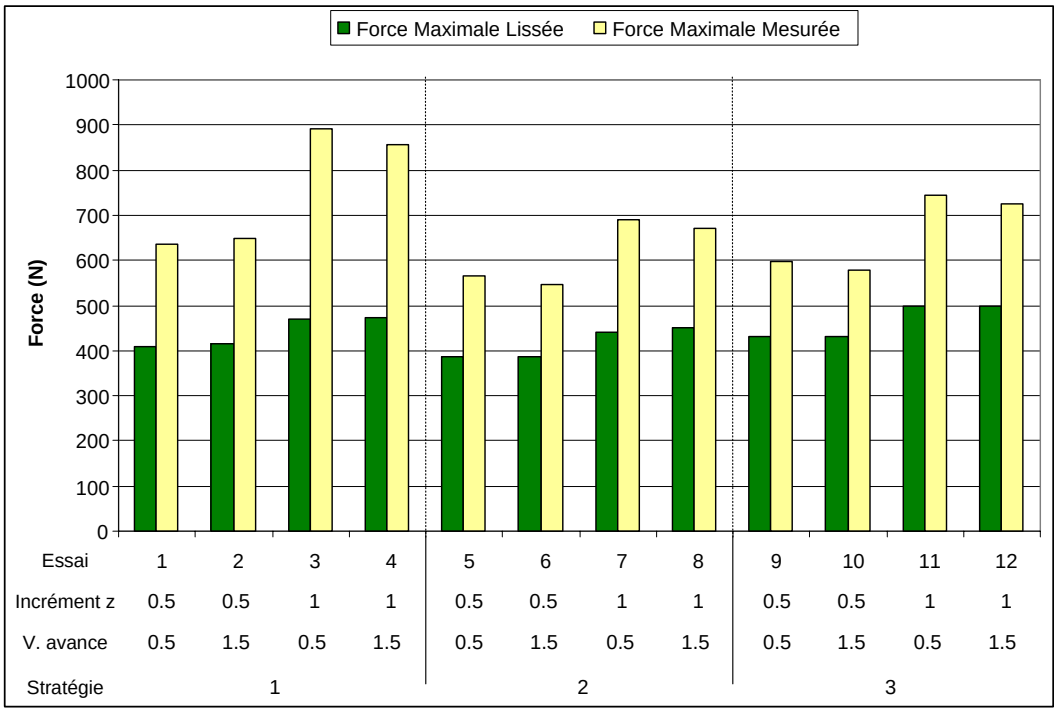


Figure 70 : Résultats des relevés d'efforts

Nous avons par ailleurs procédé à des tests de répétabilité afin d'asseoir les résultats proposés et de déterminer leur marge d'erreur. La dispersion observée n'a été que de 0.4% pour la Force Maximale Lissée et 2.7% pour la Force Maximale Mesurée. Le procédé de formage incrémental possède donc une très bonne reproductibilité au niveau des efforts mis en jeu. Nos résultats confirment ainsi ceux fournis par Duflou et al. dans [Duflou2007].

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

3.3.2 Aspects de productivité

La deuxième réponse étudiée concerne le temps de formage. Il s'agit d'un élément essentiel portant sur la rentabilité économique du procédé lorsque celui-ci est destiné à des fabrications en petites et moyennes séries ; comme nous le verrons par la suite, la productivité dépend fortement des paramètres de programmation de la MOCN.

Les vitesses d'avance utilisées en formage incrémental sont assez faibles comparées aux capacités cinématiques maximales de la MOCN VERNE. Ceci a pour conséquence que les temps de fabrication que nous avons mesurés lors des essais ont été très proches des temps de formage théoriques, calculés à partir de la longueur de la trajectoire et de la vitesse d'avance programmée. A titre d'exemple, pour l'essai 1, la différence entre ces deux temps n'a été que de 20 secondes pour une durée totale mesurée de 23 minutes. Par conséquent, les données relatives à la productivité peuvent être directement déduites des longueurs des trajectoires et des vitesses programmées. Il faudra néanmoins s'assurer que la machine outil utilisée dispose bien de capacités cinématiques largement supérieures à la vitesse de formage utilisée.

En pratique, comme indiqué sur la Figure 71, la stratégie 1 (essais 1 à 4) et la stratégie 3 (essais 9 à 12) retournent des résultats similaires en termes de productivité : elles génèrent toutes deux des parcours de longueurs semblables. Par contre, la stratégie 2 est 20% moins productive que les autres, à valeurs des autres paramètres égales. Cela s'explique par le motif utilisé à chaque couche (correspondant à une profondeur de formage donnée) qui comporte cinq segments, contre quatre pour les autres stratégies.

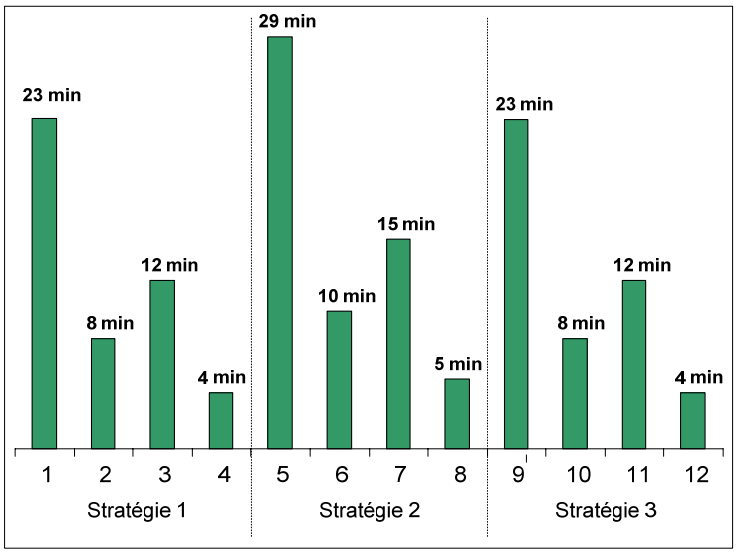


Figure 71 : Mesures des temps de formage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

La combinaison des paramètres de programmation de la MOCN choisie pèse donc de manière importante sur le temps de formage. L'étendue des valeurs prises sur l'exemple traité est en effet très élevée. Les aspects de productivité auront donc une influence prépondérante pour la performance globale d'applications de formage incrémental, destinées à supplanter l'emboutissage dans le cas de petites et moyennes tailles de lot.

3.3.3 Conformité des pièces formées

Nous nous sommes enfin préoccupés de la conformité au modèle CAO des pièces formées en mesurant à la fois une grandeur microgéométrique, la rugosité des surfaces formées et une grandeur macrogéometrique, la profondeur finale de la pièce.

Ainsi, après chaque essai, la profondeur finale de la pièce formée a été inspectée afin d'en évaluer la conformité par rapport au modèle géométrique. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un comparateur avant de retirer la pièce du porte-pièce, afin de s'affranchir des déformations induites par la libération des contraintes de serrage.

Pour des raisons de symétrie, nous avons choisi de ne mesurer que quatre points sur le plan inférieur de la pyramide. Ceux-ci dont indiqués sur la Figure 72.

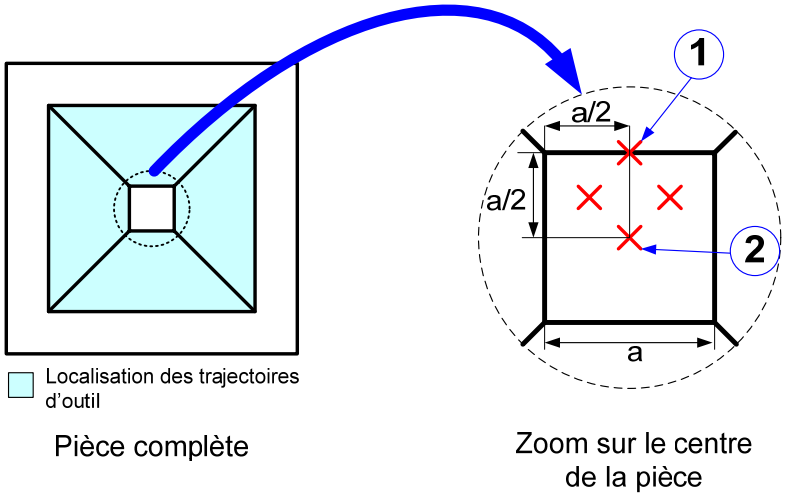


Figure 72 : Points mesurés sur le plan inférieur

La profondeur finale obtenue est systématiquement inférieure à sa valeur programmée (24 mm). Cette situation s'explique par la combinaison de l'élasticité de l'alliage d'aluminium et de la forme du porte-pièce. En effet, la surface disponible au niveau du système de serrage est plus grande que la surface de travail. L'aire restée libre entre la forme et le bord du porte-pièce travaille donc dans le domaine élastique

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

et cause l'écart de profondeur en revenant à sa position initiale après le retrait de l'outil de formage, comme indiqué sur la Figure 73.

Le plan inférieur de la pièce présente le même défaut pour tous les essais réalisés. On observe un bombement vers le haut. L'erreur la plus faible est obtenue au niveau du point 1 de la Figure 72, l'erreur la plus grande au niveau du point 2. Ce dernier point est situé au centre du carré. Nous pouvons donc en déduire que les points appartenant à la trajectoire de l'outil sont ceux qui présentent le plus faible défaut.

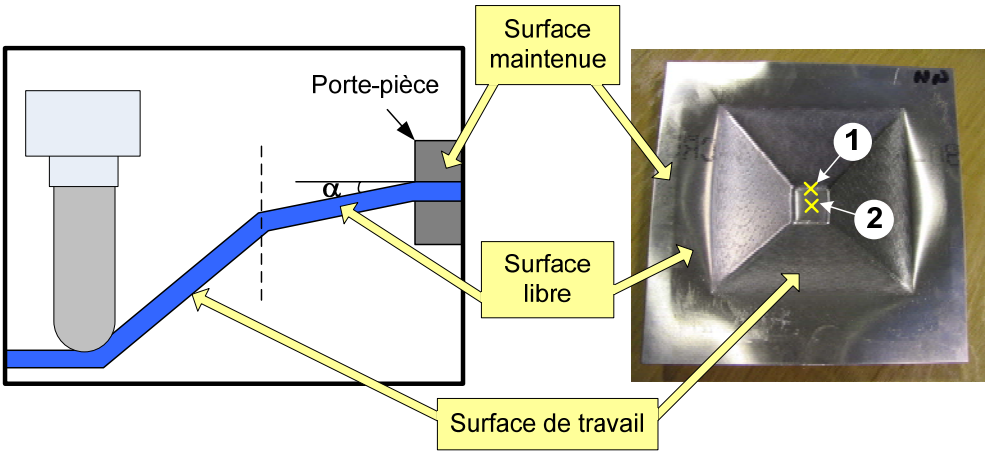


Figure 73 : Mise en évidence de la surface libre

Par conséquent, l'écart de profondeur entre les points 1 et 2 peut être considéré comme une bonne représentation du défaut de forme du plan inférieur, en nous appuyant sur les propriétés de reproductibilité énoncées précédemment. Les résultats associés à chaque essai sont consignés sur la Figure 74, qui présente d'une part l'erreur de profondeur mesurée au point 1 et d'autre part l'écart entre le point 2 et le point 1, interprété comme un défaut de planéité.

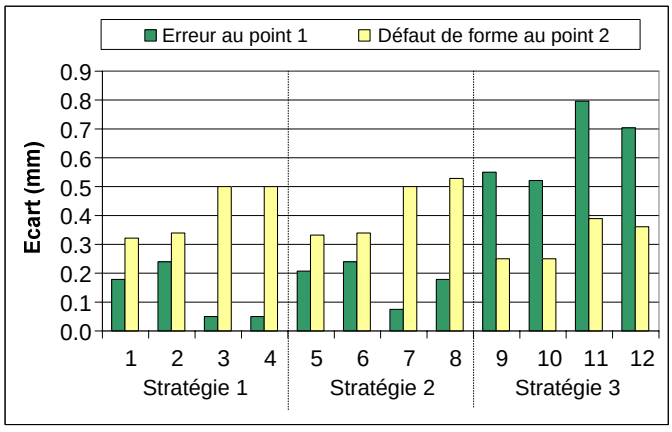


Figure 74 : Mesures des défauts de profondeur

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Un premier point important se dégage des résultats de la Figure 74 : tout comme pour les relevés d'efforts, la vitesse d'avance n'a pas d'influence sur la conformité des pièces formées, ceci pour les valeurs de vitesse testées, inférieures à 1.5 m/min. Afin de confirmer cette affirmation, nous avons mené d'autres tests en augmentant la vitesse d'avance : jusqu'à 2 m/min, aucun effet n'a été détecté. Néanmoins, à partir de cette valeur, la formabilité du matériau diminue lorsque la vitesse d'avance augmente. Nous rejoignons ainsi les travaux de Ham et Jeswiet [Ham2006]. Dans le cadre de nos travaux, nous n'avons pas cherché à établir de loi reliant la vitesse d'avance à la conformité des pièces produites pour ces plages de valeurs.

Par contre, nous avons détecté un lien fort entre l'incrément axial et la conformité de la pièce. Par exemple, la seule différence entre les essais 1 et 3 se situe au niveau de l'incrément z. Pour l'essai 1, sa valeur est de 0.5 mm, l'erreur au point 1 est de 0.18 mm et le défaut de forme au point 2 est de 0.32 mm. Pour l'essai 2, l'incrément z est de 1.0 mm, l'erreur au point 1 passe à 0.05 mm et le défaut au point 2 passe à 0.50 mm. Cette situation est assez singulière dans le sens où l'augmentation de l'incrément axial diminue le défaut de positionnement mais augmente le défaut de forme. Elle peut être expliquée en se limitant aux profondeurs mesurées de chaque point. En effet, seule l'altitude du point 1 a été modifiée de façon significative lors du passage d'un incrément de 0.5 mm à 1.0 mm, l'altitude du point 2 restant la même. L'erreur de profondeur au point 1 se voit donc diminuée et le défaut de forme (écart entre les altitudes des points 1 et 2) augmenté. Par contre, en se focalisant sur les essais 9 à 12, réalisés à l'aide de la stratégie 3, l'augmentation de la valeur de l'incrément z produit l'effet inverse et pénalise le positionnement du point 1. Par conséquent, il existe un couplage entre incrément radial et stratégie de formage pour la conformité de la pièce dans le sens où, selon le type de trajectoire choisi, une même augmentation de l'incrément axial peut provoquer un effet ou son contraire. Ainsi, s'il a un poids important dans l'erreur de profondeur, l'incrément radial optimal ne peut donc pas être sélectionné seul, mais en accord avec le type de trajectoire d'outil choisi.

Au niveau des effets de la trajectoire utilisée, les résultats de mesures sont sensiblement les mêmes pour les stratégies 1 et 2. Elles diffèrent uniquement par leur prise de passe axiale et présentent le même trajet carré à chaque couche. Il en résulte des surfaces formées de même géométrie. Par contre, la stratégie 3 produit une autre géométrie de pièce que les deux autres stratégies. Ainsi, pour les stratégies 1 et 2, le défaut de forme est plus important que l'erreur au point 1, ce qui signifie que la

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

surface générée est bombée. En utilisant la stratégie 3, le plan inférieur présente une meilleure forme mais est moins bien positionné. D'un point de vue quantitatif, l'écart de profondeur des points de la trajectoire outil (comme le point 1) est trois fois plus important pour la stratégie 3 que pour les deux autres, ce qui fait de cette dernière stratégie la moins performante concernant le défaut de profondeur.

Par conséquent, une méthode d'optimisation rapide du défaut de planéité de la surface inférieure consisterait à ajouter des passes linéaires parallèles aux côtés du carré, dont l'une passant par son centre. Le point 2 appartiendrait ainsi au trajet outil et son erreur de profondeur serait moindre.

De manière plus générale, il conviendrait donc de répartir uniformément les passes d'outil sur la surface à former, l'erreur de positionnement étant plus faible pour les points placés sur le trajet de l'outil. De plus, en formage négatif, la surface réelle sera toujours positionnée au-dessus de la surface théorique, à cause du retour élastique de la tôle. Il faudra donc dans certains cas (matériau et tolérancement de la pièce) viser une profondeur de pièce plus importante que celle du modèle CAO.

Des essais de répétabilité ont enfin été menés afin de valider les résultats présentés. Pour un même jeu de paramètres, on montre que les positions des points mesurés restent dans un intervalle de 0.02 mm, valeur inférieure à la capabilité du moyen de mesure utilisé (comparateur 3D à touche).

Ainsi, en s'appuyant sur les résultats présentés dans ce paragraphe, il apparaît que la stratégie 1 offre les meilleurs résultats concernant la conformité de la pièce produite. Il est néanmoins nécessaire d'affiner ces conclusions en s'intéressant à l'intégrité des surfaces produite par des mesures d'états de surface.

Nous avons dans un second temps inspecté l'état de surface de quelques pièces formées. Les mesures effectuées permettent de relier directement le profil de surface à l'incrément axial. A titre d'exemple, la Figure 75 présente le profil obtenu pour une pyramide formée avec un incrément z de 0.5 mm. La période d'oscillation correspond aux passages de l'outil. Néanmoins, il nous paraît important de souligner l'amplitude limitée des oscillations, inférieure à 0.02 mm.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

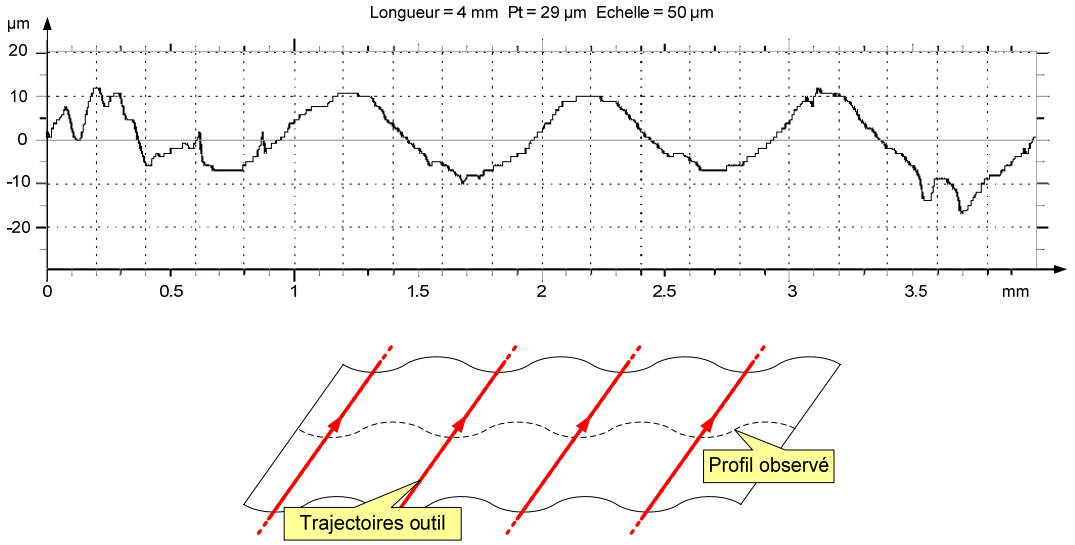


Figure 75 : Profil de surface d'une pièce formée

La valeur de l'incrément axial influe donc également sur les défauts microgéométriques. L'utilisation de passes d'outil resserrées a ainsi tendance à diminuer la période et l'amplitude des oscillations relevées, selon le même principe que pour les défauts macrogéométriques de positionnement et de défaut de forme (dans le cas des stratégies 1 et 2). A l'inverse, des trajectoires d'outil espacées (i.e. avec un incrément axial important) conduisent à conserver de plus grandes portions de tôle « intactes », dans le sens où l'état de surface initial est conservé. De manière plus générale, l'ensemble des résultats obtenus dans cette partie montrent que le choix de l'incrément axial optimal, répondant à tous les critères de conformité de la pièce, est le fruit d'un processus complexe. Nous donnons un exemple de modélisation au paragraphe suivant.

Pour chaque surface formée, trois critères de conformité peuvent être calculés : le défaut de forme Df_{max}, la rugosité maximale Ru_{max}, ainsi que le défaut de positionnement, caractérisé par l'erreur de profondeur Er_{prof}. Ceux-ci sont fonction du modèle CAO de la pièce, de sa mise en position et de la MOCN employée. L'incrément axial Δz_{opti} choisi pour programmer la surface devra donc répondre à chacun de ces critères et éventuellement en assurer une productivité maximale. Pour l'obtenir, il convient d'abord de déterminer les intervalles $[\Delta z_{min};\Delta z_{max}]$ relatifs à chaque critère. En notant s le type de stratégie de formage choisie ($s \in \mathbb{N}$) et en représentant le matériau à former par le couple (E,ν) module d'Young et coefficient de Poisson, on a la relation (11) :

$$\forall s, \forall (E,\nu), \exists f_{Df} : \begin{array}{l} \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^{+2} \\ Df_{\max}, (x,y) \mapsto (z\min_{Df}, z\max_{Df}) = f_{Df}(Df_{\max}, x, y) \end{array} \quad (11)$$

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel que pour $\Delta z \in \left[z\min_{ru}, z\max,_{ru} \right], Df(\Delta z, x, y) \le Df_{\max}$ où Df est le défaut de forme associé à l'incrément Δz et (x,y) les coordonnées du point considéré dans un plan normal à la direction de formage.

Par suite, il est possible de déterminer deux autres intervalles $\left[\Delta z\min_{prof}; \Delta z\max_{prof} \right]$ et $\left[\Delta z\min_{Df}; \Delta z\max_{Df} \right]$ relatifs aux critères d'erreur de profondeur et de défaut de forme. L'ensemble des incréments axiaux capables de remplir les critères de conformité énoncés est déterminé par l'équation (12) :

$$\Delta z_{opti} \in \left[\Delta z\min_{total}, \Delta z\max_{total} \right] \quad (12)$$

avec
$$\Delta z\min_{total} = \max(z\min_{Ru}, z\min_{Df}, z\min_{prof})$$
$$\Delta z\max_{total} = \min(z\max_{Ru}, z\max_{Df}, z\max_{prof})$$

Si cet intervalle Δz est vide, il convient de choisir une autre trajectoire de formage, qui fait appel à d'autres fonctions de détermination des couples ($zmin_i$, $zmax_i$) et permettant de trouver un espace de solutions valides. Dans le cas où cette solution n'aboutit pas, la capabilité du process à réaliser une pièce conforme doit être remise en cause, la mise en œuvre du procédé sur une autre MOCN pouvant néanmoins constituer une solution.

Par contre, s'il existe des valeurs de Δz respectant la contrainte fixée par la relation (12), la valeur de Δz_{opti} peut être déterminée soit à l'aide d'un critère de productivité ($\Delta z_{opti} = \Delta z\max_{total}$ car le trajet généré sera le plus court) soit en privilégiant un critère de conformité par rapport aux autres, comme par exemple indiqué par l'équation (13) qui traite du défaut de forme :

$$\begin{aligned} &\Delta z_{opti} \in \left[\Delta z\min_{total}, \Delta z\max_{total} \right] \\ &\forall \Delta z \in \left[\Delta z\min_{total}, \Delta z\max_{total} \right], Df(\Delta z_{opti}) \le Df(\Delta z) \end{aligned} \quad (13)$$

Il est important de préciser ici qu'il n'est pas nécessaire de redéfinir les fonctions d'optimisation f_{Df}, f_{Ru} et f_{prof} à chaque modification de la géométrie de la pièce à former. Etant donné la très bonne répétabilité du procédé, il sera possible de tirer profit d'applications précédentes employant la même MOCN et le même type de porte-pièce et le même type de trajectoire.

Seules les bases de cette méthode ont été déterminées dans le cadre de nos travaux ; en effet, l'objectif était plutôt de montrer une approche possible de détermination des paramètres en fonction de critères de conformité de la pièce. Si ce processus s'avère complexe, il peut néanmoins être résolu par une programmation adaptée des trajectoires de l'outil. Il est également important de souligner le lien fort entre le type de parcours d'outil choisi et les paramètres de programmation (comme l'incrément axial) pour la capabilité du process de formage mis en œuvre.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Enfin, bien que cela n'apparaisse pas de manière explicite dans cette partie, la MOCN employée joue également un rôle dans la capabilité générale du procédé. Outre les aspects liés à la précision de la pose de l'outil, ses capacités vont induire la possibilité de recourir à une programmation optimisée.

3.3.4 Synthèse de l'étude expérimentale

Au regard des résultats obtenus pour chaque partie de l'étude expérimentale, il apparaît que la vitesse d'avance n'a que peu d'effet sur le processus de formage incrémental. Aucune influence mesurable n'a été mise à jour concernant les efforts nécessaires et en dessous de 2 m/min, la conformité des pièces produites n'est pas affectée. A l'inverse, le type de trajectoire de formage et l'incrément axial sont des paramètres importants régissant la mise en œuvre du procédé.

Le choix de l'incrément axial entre chaque couche est prépondérant pour l'implémentation du procédé. Son influence porte en particulier sur la productivité associée et sur la conformité des pièces produites. En effet, la valeur de l'incrément axial détermine le nombre de couches nécessaires à la réalisation d'une pièce, dont dépend le temps de formage. De plus, les mesures réalisées sur les pièces formées ont montré son rôle en ce qui concerne la conformité, non seulement au niveau macrogéométrique, avec les écarts de profondeur, mais aussi au niveau microgéométrique, avec les relevés de profil.

Les différentes observations menées pour de mêmes combinaisons de vitesse d'avance et d'incrément axial soulignent également l'importance de la stratégie utilisée. Par exemple, l'erreur de profondeur peut être huit fois supérieure selon le type de trajectoire choisi. L'efficacité même de la mise en œuvre du formage incrémental dépend ainsi fortement du type de stratégie choisie, non seulement en termes de productivité mais aussi en termes de conformité. Aussi, les conclusions de l'étude expérimentale montrent que, parmi les trajectoires testées, la stratégie constituée de contournages à altitude constante (stratégie 1) est la plus performante. Pour les paramètres opératoires utilisés, les erreurs de profondeur sont assez pénalisantes dans le cas des stratégies en spirale (stratégie 3) comparativement aux trajectoires en contour parallèle (stratégies 1 et 2). De plus, les valeurs d'effort mesurées sont bien inférieures aux limites acceptables pour la mise en œuvre du procédé.

L'optimisation des trajectoires de formage répond à des critères qui sont propres à ce procédé. Il apparaît donc que les stratégies générées par un logiciel de

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

FAO, dédié aux opérations de fraisage, ne peuvent être directement employées pour une mise en œuvre efficace. Par exemple, le phénomène de retour élastique modifie la position de la surface après passage de l'outil et la profondeur finale de la pièce est inférieure à la profondeur théorique du modèle CAO. Il convient donc en formage incrémental de « déformer » la trajectoire FAO de l'outil en fonction du matériau, de l'épaisseur de la tôle et du point considéré (le retour élastique est en effet plus important au centre de la pièce, loin du bridage). Les trajectoires FAO peuvent ainsi servir de point de départ à une génération spécifique de trajectoires de formage.

Enfin, de manière générale, le procédé de formage incrémental dispose d'une très bonne répétabilité, ce qui facilite grandement sa mise en œuvre dans un contexte industriel. De plus, il est important de souligner qu'il n'y a pas de relation entre le temps de production et la conformité des pièces formées.

Nous montrerons par la suite que l'efficacité des optimisations déployées dépend également des capacités de la MOCN employée, non seulement au niveau de la programmation mais aussi au niveau des caractéristiques cinématiques.

3.4 Optimisation du procédé

Au regard de l'étude expérimentale, certaines pistes d'optimisation liées à la mise en œuvre du formage incrémental apparaissent. Nous allons en décrire quatre dans cette partie, l'emploi d'une tôle martyre, l'utilisation de trajectoires cinq axes, la programmation avancée de MOCN et finalement une méthode pour le formage positif illustrée à l'aide d'un exemple industriel.

3.4.1 Utilisation d'une tôle martyre

Cette approche vise à améliorer l'état de surface des pièces formées. Elle consiste, comme son nom l'indique, à ajouter une tôle martyre au-dessus de la tôle à former lors du montage sur le porte-pièce. Les deux tôles sont libres l'une par rapport à l'autre et cela n'induit aucune modification de la forme initiale de la tôle. Par suite, le process se déroule comme à l'accoutumée, à la différence près que l'outil effectue ses trajectoires sur la tôle martyre. Ainsi, les défauts de surface liés au procédé ne sont visibles que sur la tôle martyre et la pièce finale présente un excellent état de surface. L'épaisseur de tôle étant plus importante, le phénomène de retour élastique est atténué. Néanmoins, les rayons de raccordement entre les surfaces seront plus importants, du fait de la présence de la tôle martyre entre l'outil et la tôle à former.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

La pièce présentera ainsi des arêtes moins marquées. Il faut également s'assurer de ne pas endommager la MOCN en restant en dessous des capacités d'effort de poussée admissible. Un exemple d'utilisation de tôle martyre est donné sur la Figure 76.

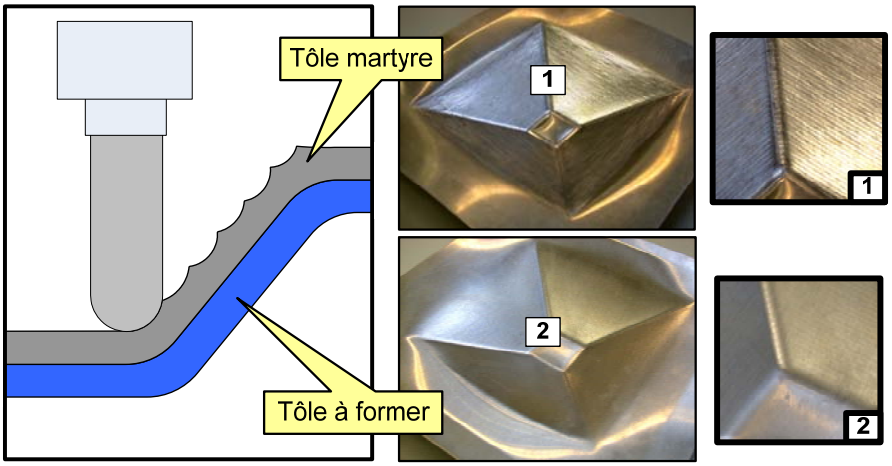


Figure 76 : Utilisation d'une tôle martyre

Cette méthode d'optimisation augmente les coûts de fabrication en doublant la surface de tôle nécessaire à la production. Néanmoins, il est tout à fait possible d'utiliser un autre matériau pour la tôle martyre que pour la pièce formée, par exemple un matériau souple, pouvant servir à plusieurs pièces. Cette piste n'a cependant pas pu être explorée dans le cadre de nos travaux, où nous nous sommes limités à une tôle martyre de même matériau.

3.4.2 Intérêts des MOCN cinq axes

En parallèle du plan d'expérience, d'autres formes de pièces tests ont été réalisées. Nous nous intéressons ici à une pyramide à double pente (30° sur la moitié côté base puis 50° jusqu'au sommet) présentée sur la Figure 77. Cette géométrie illustre en effet l'apport que peuvent avoir les MOCN cinq axes, en permettant la maîtrise de l'orientation de l'outil par rapport à la tôle.

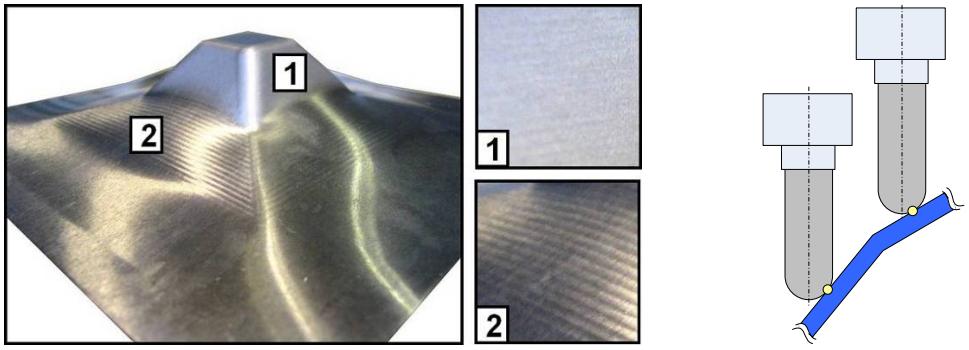


Figure 77 : Pyramide à double pente

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Cette pyramide a été formée avec une orientation d'outil constante. Mais l'état de surface de la partie ayant une pente à 50° est bien meilleur que celui de celle ayant une pente à 30°. Les paramètres de formage ont pourtant été les mêmes durant la réalisation de toute la pièce. Cette situation s'explique donc par le fait que l'angle entre l'axe de l'outil et la surface de la pièce est inférieur pour la pente à 50° que pour la pente à 30°. L'outil travaille donc plutôt sur sa périphérie. Comme il est de plus animé d'un mouvement de rotation autour de son axe, le déplacement local de l'outil par rapport à la pièce est dirigé selon la direction globale d'avance. A l'inverse, lorsque l'on travaille avec le bout de l'outil, la vitesse tangentielle du point de contact est plus faible et la friction est plus importante.

Par conséquent, il est judicieux d'utiliser des trajectoires de formage cinq axes pour optimiser la mise en œuvre du procédé de formage incrémental. Celles-ci permettent en effet d'obtenir la meilleure orientation d'outil possible et donc de travailler avec la partie de l'outil la plus adaptée. Cependant, la mise en œuvre d'une telle optimisation est par essence conditionnée par les capacités de la MOCN employée. Celle-ci doit en particulier assurer un suivi rigoureux du déplacement relatif de l'outil par rapport à la tôle lors des mouvements de repositionnement, lorsque les axes rotatifs arrivent en bout de course. En effet, contrairement à l'usinage, il ne faut surtout pas retirer l'outil lors de ces déplacements : du fait du retour élastique de la tôle, la position de la surface est modifiée par un retrait de l'outil, ce qui peut provoquer des défauts graves lors de son retour en position.

Ce type d'optimisation nécessite également un travail de programmation spécifique, dans la mesure où la gestion de l'orientation de l'outil ajoute une contrainte supplémentaire dans la définition des trajectoires.

3.4.3 Programmation avancée par trajectoires ICAM

Ce type d'optimisation se base sur le concept de trajectoires ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) que nous développons dans le chapitre suivant. Il ne sera donc pas détaillé ici.

Toutefois, son principe général est de s'appuyer sur certaines données propres au procédé pour programmer la MOCN et affiner les trajectoires de formage en temps réel. Dans le cas du formage incrémental, en particulier pour le formage positif, cela consiste par exemple à induire un mouvement de retrait à l'outil de formage pour protéger la tôle d'un défaut généré par son écrasement entre la matrice et celui-ci.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

3.4.4 Formage Positif : cas d'étude industriel

Afin de montrer l'intérêt réel du secteur industriel pour les applications de formage incrémental, nous décrirons dans ce paragraphe une étude de mise en œuvre de formage positif réalisée sur la MOCN parallèle de l'IRCCyN dans le cadre d'un contrat de recherche. Pour des raisons de confidentialité, nous ne donnerons pas les détails liés à la géométrie et aux dimensions des pièces produites, ainsi que ceux liés à la méthodologie de génération des trajectoires de formage. Il nous est néanmoins apparu pertinent d'indiquer les principes généraux utilisés car ils constituent une voie intéressante d'optimisation de la mise en œuvre du formage incrémental.

L'étude a pour objet la fabrication de pièces aéronautiques en alliage d'aluminium. Celles-ci sont jusqu'à présent réalisées par martelage. Obtenue à partir d'un flan plat, la pièce est d'une forme proche de celle d'un hémisphère. Comme indiqué sur la Figure 78, la tôle est fixée sur le sommet d'une contre forme spécifique ; il s'agit ensuite de la déformer à l'aide de trajectoires d'outil adaptées pour qu'elle épouse les contours de la contre-forme. Une contrainte importante à respecter est d'assurer une déformation sans diminution d'épaisseur, c'est-à-dire sans entrer dans le domaine de striction, pour des raisons de tenue en service de la pièce. Un simple parcours d'outil en spirale ou en contour parallèle ne peut donc pas être utilisé, car il produit une déformation de la tôle en expansion. Il faut donc employer des trajectoires plus élaborées permettant de canaliser les flux de matière pour réaliser une déformation en retreint.

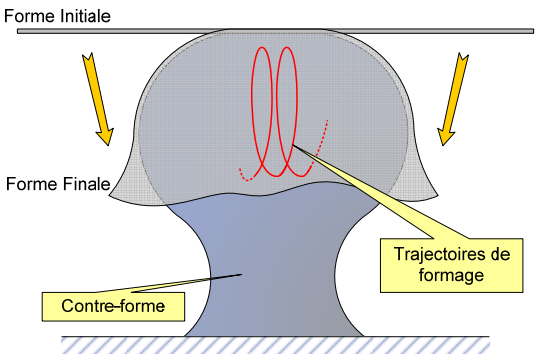


Figure 78 : Montage de formage pour l'étude industrielle

La génération de ce type trajectoires suit un processus complexe car il faut en plus tenir compte du retour élastique de la tôle entre deux passes d'outil. Nous avons donc dû nous appuyer sur un logiciel de FAO pour construire les trajets de l'outil, non pas en utilisant des stratégies prédéfinies (étant donné les inconvénients que nous avons évoqués) mais pour bénéficier de la géométrie du modèle CAO de la pièce pour

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

construire les parcours. De plus, comme le taux de déformation était assez important, nous avons décidé de procéder par étapes en employant des formes intermédiaires pour reprogrammer de nouvelles trajectoires au fur et à mesure de la mise en forme. L'algorithme employé est alors similaire à celui présenté par la Figure 79.

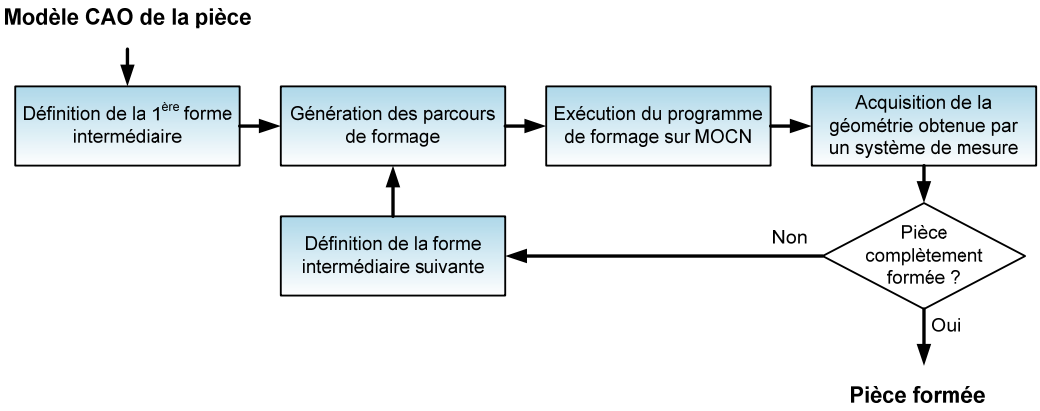


Figure 79 : Démarche employée pour l'étude industrielle

Au final, si la démarche déployée s'est avérée empirique, elle montre d'une part la possibilité de réaliser des pièces en retreint à l'aide de formage incrémental positif, et, d'autre part, l'intérêt de pouvoir adapter les trajectoires d'outil en fonction du comportement réel de la tôle lors de sa mise en forme. Si ce dernier s'est concrétisé ici par l'emploi de formes intermédiaires, l'emploi d'une méthode de programmation telle que celle proposée par l'approche ICAM peut être grandement profitable.

3.5 Conclusions

Les travaux présentés dans ce chapitre ont porté sur la mise en œuvre d'un procédé de fabrication émergent sur MOCN, le formage incrémental. L'objectif majeur était d'évaluer et de valider la capabilité des MOCN d'usinage à produire des pièces par formage incrémental. L'accent a été mis sur les problématiques liées à la programmation de la MOCN, en essayant de tirer parti du savoir-faire, beaucoup plus large, relatif aux opérations de fraisage.

Dans une première partie, nous nous sommes concentrés sur le procédé en lui-même et avons synthétisé les principales thématiques étudiées depuis le développement du formage incrémental. Les comparaisons en termes de flexibilité et de taux de déformation atteignables effectuées avec l'emboutissage, procédé de référence actuel pour la mise en forme de tôles, ont abouti à des résultats très encourageants et ouvert de nombreuses perspectives d'application pour le formage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

incrémental. Les principales difficultés sont apparues lors des travaux portant sur la capacité du procédé à réaliser des pièces conformes au modèle CAO. Contrairement à ce qui était suggéré au départ, l'utilisation de trajectoires de formage directement obtenues par logiciel de FAO ne constitue pas une solution viable. Ainsi, les développements actuels portent sur la mise en place de méthodes et de techniques permettant d'optimiser la capabilité du formage incrémental, en particulier les paramètres de programmation de la MOCN utilisée.

Dans un second temps, une étude par simulations éléments finis nous a permis de mieux appréhender la nature des déformations générées par les passages de l'outil en formage incrémental. Le mode de mise en œuvre, formage positif ou formage négatif, impacte fortement sur la localisation et l'amplitude des déformations. Ainsi, le formage positif demande une gestion stricte du parcours de l'outil afin de ne pas écraser la tôle contre le support, ce qui pourrait endommager le produit final et les outillages. En formage négatif, cette contrainte est moins sévère, les déformations importantes étant essentiellement localisées sur les zones de serrage des flancs. La tôle subit néanmoins une déformation au droit du point de passage de l'outil. Par conséquent, quel que soit le type de mise en œuvre du formage incrémental, les parcours d'outil et les paramètres de programmation influent sur l'intégrité des tôles formées. Leur maîtrise est donc une étape indispensable pour la performance de ce procédé. Cette étude préliminaire nous a également permis de nous assurer de la capabilité de la MOCN VERNE pour la fabrication de pièces par formage incrémental. En mettant en relation la déformation de la tôle, son épaisseur et les efforts mis en jeu, elle constitue également un point de départ pour définir le cahier des charges d'une MOCN dédiée à des opérations de formage incrémental.

Dans une troisième partie, nous avons exposé les résultats d'une campagne expérimentale menée sur la MOCN VERNE. Nous avons fait le choix de ne travailler que sur les principaux paramètres liés à la programmation de la MOCN. En mesurant les réponses en termes de productivité, efforts de formage et conformité macro- et microgéométrique, nous avons pu disposer d'une vision globale des effets de ces paramètres sur le déroulement du process. Cette action a mis en lumière la dépendance forte de la capabilité du procédé vis-à-vis des paramètres opératoires observés. Nous avons ainsi pu montrer que pour les gammes de vitesses habituellement utilisées en formage incrémental (inférieures à 2 m/min), la valeur de la vitesse d'avance choisie n'influe pas sur la conformité des pièces formées. De plus, ces vitesses d'avance étant faibles au regard des capacités d'une MOCN moderne, les erreurs de suivi de trajectoire et autres perturbations liées au comportement

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

cinématique de la structure de machine ne sont pas significatives. La trajectoire la plus courte sera la plus productive, si la MOCN dispose de caractéristiques cinématiques bien supérieures aux vitesses employées. Par contre, le type de trajectoire choisi influe directement sur la géométrie des pièces formées dans le sens où une modification de la forme du parcours peut par exemple corriger certains défauts (positionnement de la surface, défaut de forme, ...) et en accentuer d'autres. Nous avons en outre montré le fort couplage existant entre la valeur de l'incrément axial et la géométrie du trajet outil pour la réalisation de pièces conformes aux spécifications. Par conséquent, les trajectoires générées par logiciel de FAO, dédiées à de l'enlèvement de matière, ne constituent pas une solution suffisante pour une implémentation efficace du formage incrémental. Elles peuvent néanmoins servir de point de départ à des optimisations de la programmation spécifiques à ce procédé qui aboutiront à une combinaison de paramètres opératoires adaptée aux contraintes. La capabilité de la MOCN utilisée dépendra donc de la capacité de son DCN à mettre ces optimisations en application. En quelques mots, si la réalisation de pièces par formage incrémental sur MOCN peut être effectuée sans difficulté majeure, l'obtention de pièces conformes au modèle CAO souhaité est une problématique complexe. Des approches d'optimisation aboutissant à une programmation adaptée de la MOCN peuvent toutefois répondre aux contraintes fixées.

Nous exposons enfin certaines voies d'optimisation, dont nous avons pu valider l'efficacité sur des pièces réelles. Celles-ci montrent que l'utilisation d'un moyen de fabrication performant, disposant notamment d'un DCN de dernière génération et de cinq axes de déplacement augmente de manière significative la capabilité du procédé de formage incrémental et élargit son champ d'application. Les MOCN à structure parallèle peuvent donc trouver dans le formage incrémental un domaine d'application privilégié. En effet, une étude industrielle de formage positif menée sur machine parallèle est venue confirmer la capabilité de ce type de MOCN pour la réalisation de pièces à l'aide de ce procédé. En outre, cette action a montré non seulement l'intérêt du secteur industriel pour ce nouveau procédé au-delà de simples applications de prototypage, mais elle définit aussi les bases d'une méthode d'optimisation du process basée sur la programmation des parcours d'outil.

Enfin, l'une des optimisations proposées, la programmation avancée par trajectoires ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing), nous a paru particulièrement pertinente. Par rapport à la programmation actuelle, elle propose une meilleure exploitation des nouvelles fonctionnalités offertes par les DCN récents, elle possède surtout un caractère générique, en s'appliquant aussi bien au formage

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

incrémental qu'à l'usinage ou d'autres procédés. La mise en œuvre de programmation avancée de MOCN par l'approche ICAM fera ainsi l'objet du chapitre suivant. Nous en proposerons ainsi l'implémentation pour des applications de formage incrémental.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Chapitre 4. Programmation avancée de MOCN : concept de trajectoires ICAM

En termes de programmation de MOCN, les chapitres précédents ont essentiellement porté sur la géométrie des parcours d'outil. Le but était de choisir la trajectoire la plus adaptée au besoin. L'objet du présent chapitre aborde une phase plus en aval et concerne non plus la forme des trajets outil mais leur mode de programmation sur MOCN. Nous allons en effet présenter et définir la mise en œuvre d'une nouvelle approche de programmation avancée, la méthode Intelligent Computer Aided Manufacturing (ICAM). En plus de la position des axes de la MOCN, celle-ci se base sur une estimation de données relatives au process pour optimiser la programmation des trajectoires exécutées.

Pour ce faire, nous exposerons, dans un premier temps, les limites associées à la programmation actuelle des MOCN ; puis, nous décrirons les principales méthodes développées pour pallier les manques constatés avant d'en réaliser l'analyse critique. Nous introduirons ensuite la méthode de programmation ICAM, ses objectifs, ses avantages et sa mise en œuvre. Une validation expérimentale des notions et méthodes employées sera faite et deux exemples de procédés de fabrication pouvant bénéficier d'une programmation avancée par trajectoires ICAM seront étudiés.

4.1 Limitations de la programmation actuelle des MOCN

4.1.1 Limitations liées au format ISO-6983 (codes-G)

L'augmentation des performances des moyens informatiques s'est illustrée en production mécanique par le développement de nouveaux types de DCN. Ceux-ci sont maintenant capables de gérer simultanément un grand nombre de données et peuvent évaluer des variables du process, en plus de l'exécution du programme d'usinage. Parmi les paramètres relevés, on trouve notamment les couples des servomoteurs des

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

axes de déplacement de la MOCN, le couple et la température au niveau de la broche ou la puissance électrique consommée…

La programmation des MOCN n'a néanmoins que très peu bénéficié des avancées technologiques. Tous les DCN récents utilisent l'ISO 6983 pour programmer les trajectoires de l'outil. Ce format bien connu, aussi appelé codes-G, se limite à une description des positions successives prises par l'outil en indiquant une vitesse de déplacement programmée entre chaque point de passage. Par conséquent, le processus de coupe n'est piloté qu'à l'aide de critères géométriques, bien que de nombreux paramètres régissent son déroulement. Par exemple, selon la MOCN utilisée, des vibrations peuvent apparaître et endommager la pièce. Une MOCN à faibles capacités cinématiques peut conduire à l'emploi d'une vitesse d'avance inappropriée et à des variations de conditions de coupe. Si les efforts de coupe sont trop importants, l'outil ou la pièce peuvent fléchir, ce qui provoque un mauvais positionnement et une mauvaise orientation de la surface usinée [Seo1998]. Au final, une mauvaise combinaison des paramètres de programmation de la MOCN peut être employée, ce qui affecte la conformité de la pièce finale et le temps de fabrication (Figure 80).

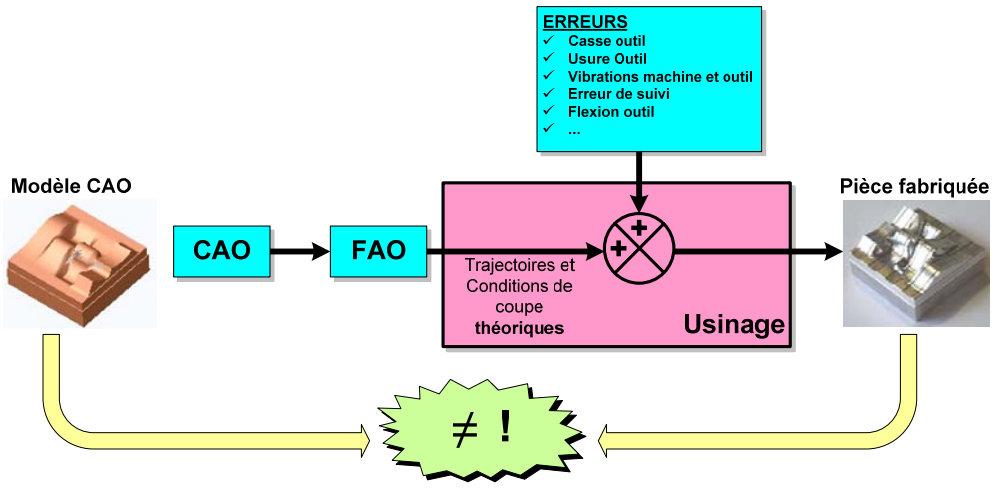


Figure 80 : Du modèle CAO à la pièce réelle avec la programmation actuelle des MOCN

Néanmoins, afin de combler certains manques du format ISO 6983, les concepteurs de DCN ont l'enrichi de nouvelles fonctionnalités [Siemens2006]. Celles-ci sont uniquement compatibles avec leurs produits car non normalisées. Les fonctions développées concernent principalement le comportement dynamique de la MOCN en permettant au programmeur de l'adapter aux contraintes de fabrications (ex : fonctions COMPCAD, COMPCURV, G64, …etc chez Siemens). On peut ainsi choisir de privilégier le temps d'usinage, en programmant des profils d'accélération en

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

échelon (ex : fonctions BRISK chez Siemens) et en autorisant des erreurs de suivi de l'ordre de 0.1 mm. Ce type de réglage est bien adapté à l'usinage d'ébauche. De la même manière, on peut privilégier un contrôle plus précis des déplacements en diminuant les sollicitations mécaniques de la MOCN par une programmation des profils d'accélération en trapèzes (ex : fonctions SOFT chez Siemens) et en assurant un meilleur suivi de trajectoire.

Ces optimisations permettent d'enrichir le format de description des parcours d'outil en comblant certains manques de la norme ISO 6983. Elles ne résolvent pourtant qu'une partie des problématiques de programmation des MOCN. En effet, si performant que soit la description des trajets, l'efficacité de leur mise en œuvre est soumise aux capacités de la machine outil employée et de son DCN.

4.1.2 Limitations liées à la MOCN et à son DCN

Les modes de programmation actuels considèrent toutes les MOCN comme idéales, en particulier au niveau dynamique. En effet, que cela soit au niveau de la FAO ou de la programmation en code G au pied de la machine, les caractéristiques cinématiques du moyen de fabrication utilisé ne sont pas prises en compte. De même, il existe des différences entre les trajectoires exécutées par le contrôleur CN et celle qui ont été programmées. Cet écart n'est que peu pris en compte à l'heure actuelle.

Par exemple, avec la manière usuelle de programmer les MOCN, les efforts de coupe ne peuvent être contrôlés qu'à l'aide de la combinaison de vitesse de coupe et de vitesse d'avance programmées. La MOCN est ainsi considérée comme parfaite, dans le sens où le respect des conditions de coupe programmées n'est effectif que si la trajectoire est exécutée à vitesse programmée, sans ralentissements. Toutefois, la comparaison des vitesses d'avance réelles et programmées, telle que présentée sur la Figure 81 montre que les axes de la machine réduisent leur vitesse à chaque variation géométrique de la pièce. L'ampleur de ces variations dépend des capacités cinématiques de la MOCN utilisée : vitesse, accélération et jerk.

Les conditions de coupe programmées ne sont de fait que peu utilisées en pratique, notamment dans le cas d'une pièce complexe, et les valeurs réelles dépendent des performances cinématiques de la MOCN utilisée. Ces variations de conditions de coupe peuvent affecter la mise en œuvre du process de fabrication. L'outil peut voir sa durée de vie réduite, les états de surfaces des pièces produites peuvent en être affectés et les temps de fabrication peuvent être augmentés de manière importante.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

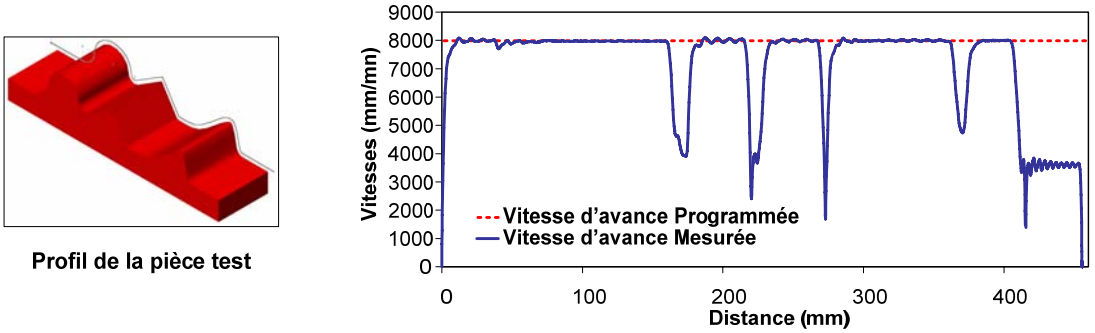


Figure 81 : Comparaison des vitesses d'avances programmées et mesurées [Dugas2002]

De la même manière, le DCN génère des différences entre la trajectoire programmée et la trajectoire effectivement suivie par l'outil. Les principales limitations et les conséquences associées ont été détaillées par Dugas [Dugas2002]. Par exemple, l'erreur de poursuite résultant de la commande des axes de la MOCN peut conduire à une dégradation des surfaces de la pièce fabriquée. Une illustration de cette situation est proposée par la Figure 82. L'usinage de deux profils identiques est implémenté dans le simulateur de comportement réel de MOCN développé à l'IRCCyN ; le profil de gauche ne tient pas compte de l'erreur de poursuite due aux asservissements des axes machines, la quasi-totalité de la pièce se retrouve donc dans la tolérance d'usinage imposée (couleur grise) et l'état de surface est acceptable. Par contre, le profil de droite, qui tient compte de cette erreur inhérente à tout comportement réel de MOCN, montre une plus grande proportion de la pièce en dehors des tolérances ; l'aspect de surface est assez limité, mais plus proche de la réalité.

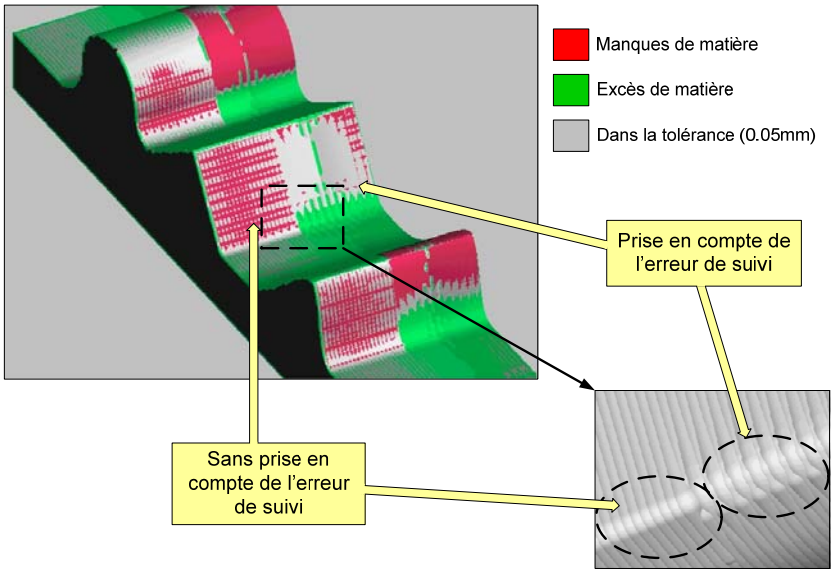


Figure 82 : Influence de l'erreur de poursuite

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

4.2 Méthodes existantes pour améliorer la programmation des MOCN

L'optimisation de la programmation des MOCN a fait l'objet de nombreux travaux de recherche ([Kim1996; Seo1997; Li2004c; Liu2007]). Les auteurs ont en effet senti la nécessité de combler les manques de la programmation des MOCN par ISO 6983. Leur travaux peuvent être répartis selon deux catégories : les méthodes expérimentales, basées sur des relevés d'efforts de coupe par dynamomètres 3D, et les méthodes prédictives, basées sur des simulations numériques.

Nous limiterons notre étude bibliographique à la programmation de MOCN et aux problématiques associées. Tous les aspects de surveillance d'usinage avec une instrumentation de la MOCN, analyse des signaux de broche, mise en place de critères de surveillance du process, du type de ceux présentés dans les travaux de Ritou [Ritou2006], par exemple, ne seront volontairement pas étudiés ici. En effet, les optimisations du process proposées par ces thématiques n'entrent pas dans le champ de la programmation des MOCN.

4.2.1 Méthodes prédictives

Ce type d'approche se base sur des modèles de prédiction des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe programmées. A partir des calculs des modèles, les paramètres opératoires sont modifiés pour éviter l'apparition de défauts (Figure 83).

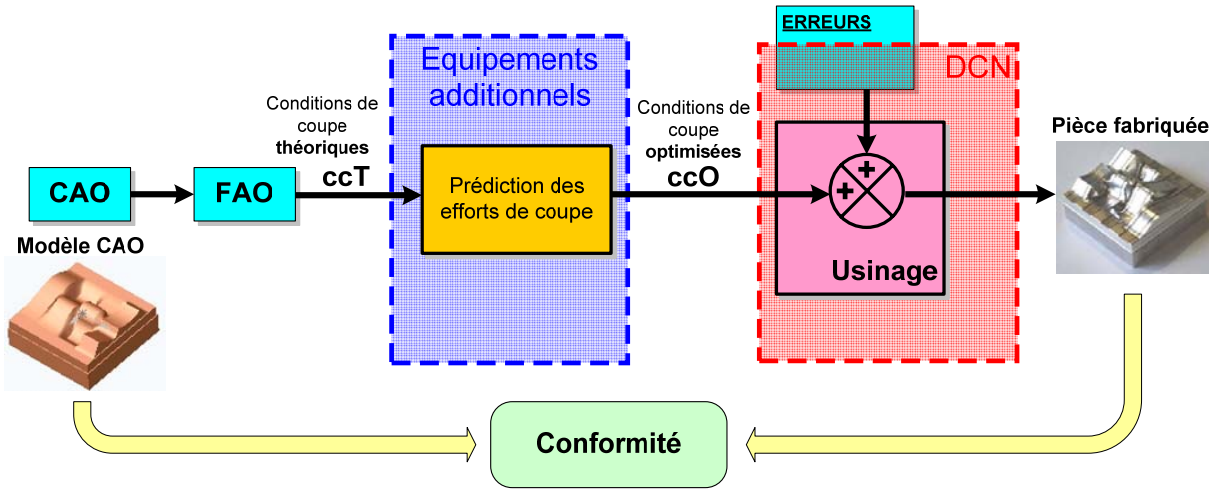


Figure 83 : Programmation optimisée de MOCN par méthode prédictive

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Ainsi, Seo [Seo1998] propose une méthode de génération de trajectoires permettant de corriger les défauts dus à la flexion de l'outil lors d'usinages en flanc. Celle-ci se base sur un modèle prédictif et introduit la notion de compensation de trajectoire. A partir des conditions opératoires programmées, des caractéristiques de l'outil employé et du matériau à usiner, le modèle développé détermine les efforts de coupe puis la flexion résultante de l'outil. De nouvelles trajectoires compensées sont ensuite définies et mises en œuvre sur la MOCN. La compensation peut porter sur deux aspects en fonction de l'application choisie et de la nature du défaut constaté. Pour le premier d'entre eux, la valeur de la vitesse d'avance est réduite de manière à limiter les efforts sur l'outil, et donc, sa déflexion.

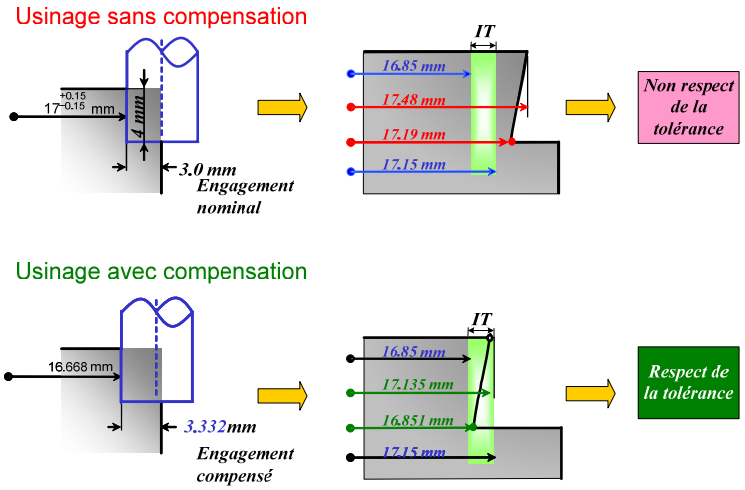


Figure 84 : Compensation de trajectoires par modification de l'engagement de l'outil [Seo1998]

Pour le second, la géométrie de la trajectoire est modifiée de manière à produire un engagement radial tel que les surfaces usinées soient conformes au dessin de définition de la pièce. La Figure 84 présente un exemple de compensation de trajectoire d'usinage à l'aide de la méthodologie développée. La démarche proposée dans ce chapitre s'inscrira dans la lignée de ces travaux, en particulier au niveau des compensations de la programmation. Néanmoins, contrairement à l'approche développée par Seo qui s'appuie sur des résultats issus de simulation, nous nous baserons sur des estimations faites par le DCN en cours d'usinage pour proposer des adaptations de la programmation.

Sur la même thématique, Lopez de Lacalle et al. [Lopez de Lacalle2007] ont développé un module d'estimation de l'effort de déflexion destiné à être intégré au logiciel de FAO. Grâce aux résultats fournis, le programmeur peut sélectionner ou modifier les trajectoires d'usinage afin de minimiser la déflexion de l'outil.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

De leur côté, Li et al. [Li2004c] proposent une approche de prédiction des efforts de coupe en s'appuyant sur une division des trajectoires en segments sur lesquels la vitesse d'avance peut être adaptée. Les valeurs de correction sont obtenues à l'aide d'un algorithme heuristique. A la fin du processus d'optimisation, les variations d'avance sont intégrées dans le programme d'usinage complet de la pièce et celui-ci est envoyé vers le DCN.

Cette méthode est très proche de celle développée par Hascoët et Dugas [Hascoet2000; Dugas2003], qui proposent d'optimiser la vitesse d'avance programmée en tenant compte du comportement de la MOCN. Ils se basent pour cela sur les résultats fournis par un simulateur de comportement réel de MOCN. Une simulation à consigne de vitesse constante (avance programmée « FAO ») permet de déterminer la vitesse d'usinage réelle de la MOCN, en tenant compte des asservissements du mécanisme. Puis, ils déterminent une vitesse d'avance programmée optimisée dont la valeur et les variations sont adaptées aux capacités de la MOCN. Les paramètres opératoires sont ainsi optimisés sans augmentation du temps d'usinage. La Figure 85 propose le type d'optimisation effectué.

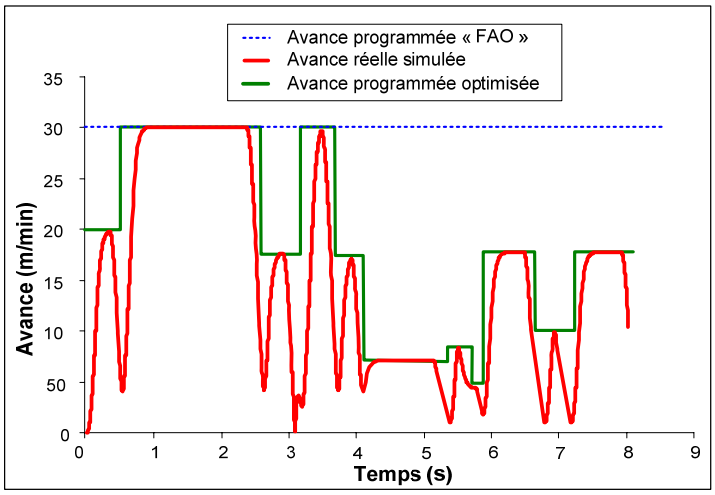


Figure 85 : Optimisation de l'avance programmée après simulation de l'avance réelle

Dans le cas de vidage de poches en ébauche, Pateloup [Pateloup2005] propose une approche de déformation des trajectoires d'usinage en fonction du comportement cinématique de la MOCN employée. Par rapport à des trajectoires issues directement de logiciel de FAO, les parcours générés sont adaptés aux performances cinématiques de la MOCN et permettent une diminution des temps d'usinage.

Un modèle de simulation pour le fraisage en flanc a été développé par Larue et Altintas [Larue2005]. Il permet de prédire les efforts de coupe, ce qui autorise un pilotage de la vitesse d'avance le long des trajectoires d'usinage.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Kim et al. ont proposé dès 1996 [Kim1996] de mesurer de manière indirecte les efforts d'usinage à partir des servomoteurs d'axes. Chaque axe de déplacement est alors modélisé par un système linéaire. Cette approche nécessite néanmoins un équipement externe au DCN pour réaliser le contrôle adaptatif des efforts. Dans la même lignée, Li et al. [Li2000] montrent que les courants des moteurs sont un moyen efficace et peu coûteux d'estimer les efforts de coupe.

Enfin, la validation par simulation des choix faits en programmation des MOCN a également suscité l'intérêt d'éditeurs de logiciels. Ils ont ainsi développé des applications de vérification des programmes d'usinage et d'optimisation de trajectoires (NC SIMUL®, VERICUT®, ...). Ceux-ci ont pour objectif de détecter la présence de collisions durant l'exécution virtuelle du programme d'usinage à l'aide d'une simulation réaliste des géométries de l'outil, de la MOCN et du brut de la pièce. En outre, un module dédié du logiciel VERICUT®, appelé OPTIPATH®, recalcule les vitesses d'avance et les modifie en fonction de la quantité de matière retirée par chaque segment de la trajectoire [CGTech2007]. On retrouve les principes utilisés par Hascoët [Hascoet2000], Dugas [Dugas2003] et Li [Li2004c]. Positionné entre la FAO et le DCN, ce type de logiciel assure ainsi une optimisation potentielle du mode de programmation des MOCN.

4.2.2 Méthodes correctives

La seconde famille de méthodes d'optimisation de la programmation des MOCN se base sur les relevés de paramètres d'usinage effectués lors du déroulement de l'exécution du programme (Figure 86).

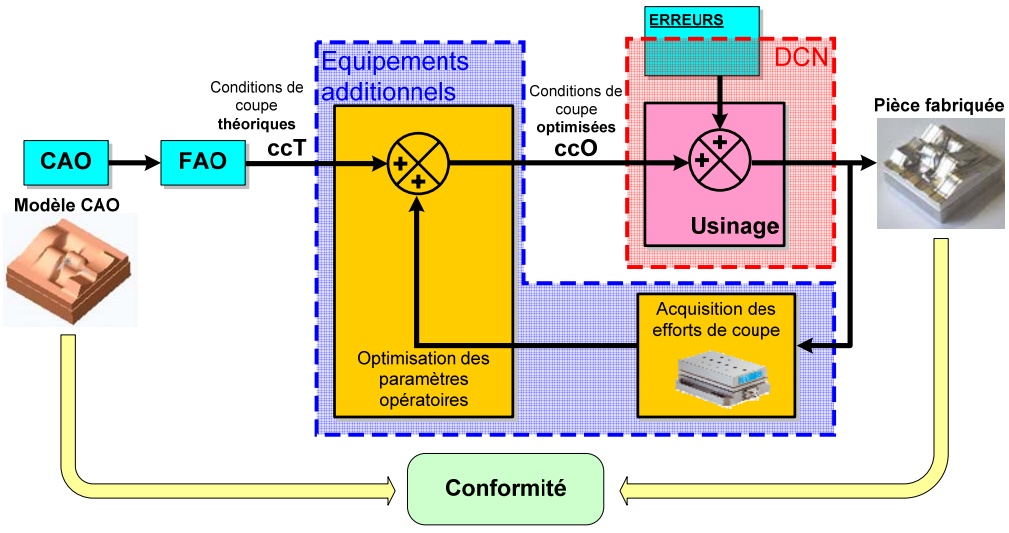


Figure 86 : Programmation optimisée de MOCN par méthode corrective

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Paradoxalement, le nombre de publications sur ce sujet est assez faible : en effet, la majorité des ouvrages portant sur l'acquisition de données process en temps réel utilise ces données à des fins de diagnostic, sans corriger en temps réel les parcours suivis par l'outil.

Ces approches sont basées sur deux étapes : acquérir les données process (en pratique, souvent les efforts sur l'outil) puis corriger les paramètres opératoires en fonction des résultats de mesure. L'équipement le plus utilisé pour la première étape est la platine d'acquisition dynamométrique à trois composantes (de type Kistler). Elle possède en effet de nombreux avantages, comme l'acquisition des efforts selon les coordonnées cartésiennes. De plus, les hautes fréquences d'acquisition rendent possible un suivi de l'outil dent par dent et facilitent le post-traitement (Figure 87).

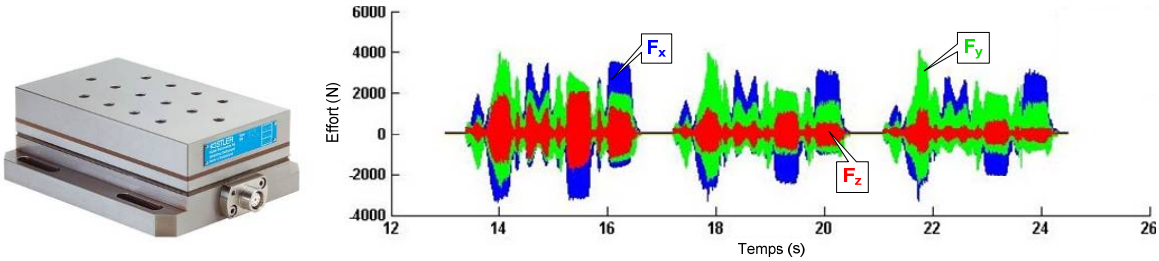


Figure 87 : Table dynamométrique Kistler avec un exemple de relevé d'effort de coupe

Dans ce contexte, Luo et al. ont développé une méthodologie basée sur des réseaux de neurones pour maîtriser à la fois des efforts de coupe et les erreurs de contour [Luo1998]. Les relevés de platine dynamométrique sont moyennés sur un tour de broche et une nouvelle vitesse d'avance est calculée afin de répondre aux deux critères énoncés. Dans [Zuperl2005], Zuperl et al. utilisent des algorithmes de logique floue pour leurs optimisations. Les données fournies par une platine Kistler sont traitées par une application dédiée à la maîtrise des efforts d'usinage qui retourne une vitesse d'avance adaptée. Leurs résultats sont validés expérimentalement.

Les mêmes auteurs ont également travaillé à l'optimisation du fraisage par outil à tête hémisphérique [Milfelner2005; Cus2006]. Lors de l'usinage, les relevés d'efforts par dynamomètre sont injectés dans un algorithme génétique qui retourne des paramètres de coupe optimisés. Par contre, il n'est pas précisé si cette approche permet d'intervenir en temps réel sur les conditions de coupe ou s'il faut attendre d'usiner une nouvelle pièce pour mettre en œuvre les modifications opératoires préconisées.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Du reste, le principal inconvénient des méthodes proposées est qu'elles nécessitent d'usiner une première pièce pour initialiser le processus d'optimisation. De plus, ces approches sont basées sur l'emploi de platines d'acquisition dynamométriques. Nous verrons par la suite que ces équipements possèdent certains inconvénients pour une implantation efficace des méthodes proposées dans les ateliers de fabrication.

4.2.3 Limites des méthodes actuelles

Dans ce paragraphe, nous détaillerons les principaux inconvénients des méthodes d'optimisation proposées, qui freinent leur implantation dans un contexte industriel.

Ainsi, l'inconvénient majeur des méthodes correctives est l'emploi d'équipements additionnels au DCN. L'utilisation de platines d'acquisition à trois composantes présente en effet certains freins. Tout d'abord, une reconception du porte-pièce est nécessaire. Au lieu d'un étau ou d'un système « standard » de brides, l'emploi d'un dynamomètre demande l'ajout d'une interface spécifique entre le brut à usiner et celui-ci. En effet, les efforts de coupe sont transmis via un nombre défini de vis qui pourraient se trouver dans la zone usinée. A cela s'ajoute le fait qu'un ordinateur additionnel est requis pour la récupération des données de la table dynamométrique.

En outre, un inconvénient majeur des platines d'acquisition réside dans leurs conditions de fonctionnement. Ainsi, le volume de travail, à l'intérieur duquel les mesures sont fiables, est relativement restreint. Par exemple, il s'agit d'un parallélépipède dont les dimensions sont environ 180 x 120 x 60 mm pour un dynamomètre de 170 x 100 x 60 mm. Certes, certains modèles de platine disposent de volumes plus importants, mais elles restent destinées à des productions de pièces de dimensions assez retreintes. De plus, les cellules piézoélectriques des jauges de contraintes sont très sensibles aux poussières, comme celles produites lors de l'usinage de matériaux composites. La microlubrification est également proscrite. Enfin, selon les paramètres opératoires, des vibrations de la platine peuvent être induites. Leurs fréquences de résonance peuvent perturber les mesures d'effort et en diminuer la qualité. Il est même possible que des conditions de coupe générant un processus de coupe stable provoquent des vibrations lors de l'emploi d'une platine d'acquisition.

En conséquence, les dynamomètres à trois composantes souffrent de nombreux inconvénients pour pouvoir être utilisés à une large échelle dans un contexte de

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

production industrielle. Ce qui limite le champ d'action des méthodes faisant appel à ce type de matériel.

Parallèlement à cela, la principale limitation des méthodes prédictives consiste en l'emploi de modèles de comportement du process de fabrication. Ces modèles, souvent destinés à évaluer les efforts sur l'outil, nécessitent de nombreuses opérations de calage et d'initialisation. Une validation expérimentale est nécessaire à chaque modification des conditions de fonctionnement (modèle CAO, MOCN, outil de coupe, ...). Elles sont donc peu flexibles et plutôt adaptées à de la production en grande série.

De plus, la mise en application de ces optimisations demande des compromis entre la précision des estimations effectuées et le temps de calcul. Par exemple, le modèle de calcul de la déflexion de l'outil proposé par Seo [Seo1998] s'appuie sur deux approches. La première requiert des temps de calcul faibles mais fait l'hypothèse que la flexion de l'outil n'influe pas sur l'engagement radial ; elle ne peut s'appliquer que dans les situations où la valeur de la déflexion est faible et les résultats fournis ne peuvent être représentatifs du comportement réel. La seconde se base sur un modèle quasi-statique qui détermine l'engagement radial à partir de la flexion évaluée au tour d'outil précédent. Le trajet doit donc être fortement discrétisé et les temps de calculs sont beaucoup plus longs. A cela s'ajoute le fait que ce modèle se restreint aux problématiques de déflexion, il ne peut donc rendre compte d'autres comportements pénalisant la conformité des pièces produites, comme les vibrations.

De plus, les optimisations de la programmation proposées par les deux familles de méthodes sont presque toutes limitées à une adaptation de la vitesse d'avance, sans modification de la forme des trajectoires d'outil. Cette solution s'avère efficace pour les applications d'usinage mais reste limitée à ce seul processus de fabrication.

Enfin, les méthodes d'optimisation de la programmation existantes font toutes appel à un équipement externe au DCN. Ces matériels sont généralement coûteux et demandent un niveau d'expertise élevé pour être mise en œuvre de manière performante. De plus, leur utilisation s'accompagne de limitations concernant le process de fabrication. Elles ne peuvent donc pas être implémentées de manière efficace dans un atelier de production industrielle et sont jusqu'à présent restées d'un emploi assez limité.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

4.3 Programmation avancée par trajectoires ICAM

Dans cette partie, nous proposons une nouvelle méthode de programmation avancée des MOCN. Appelée ICAM, pour « Intelligent Computer Aided Manufacturing », cette approche vise à dépasser les limites associées aux méthodes d'optimisation exposées plus haut en étant générique et simple d'emploi, tout en restant performante [Hascoet2006c].

Après avoir défini les objectifs et les concepts généraux de la méthode de programmation par trajectoires ICAM, nous en expliciterons chacune des étapes.

4.3.1 Objectifs et bases de la méthode ICAM

Tout comme les méthodes d'optimisation par approches prédictive ou corrective présentées dans la partie précédente, l'objet de la méthode ICAM est de combler les déficiences de la programmation actuelle des MOCN. Un pilotage performant du parcours d'outil demande en effet de disposer d'autres données liées au process que les positions successives de l'outil.

Nous avons pour cela adopté une approche corrective, c'est-à-dire basée sur l'estimation en temps réel de données process lors de l'exécution du programme. Ce choix nous a permis de nous affranchir des inconvénients des modèles de prédiction : limitation du domaine de fonctionnement, nécessité de recaler les résultats, hypothèses simplificatrices, …

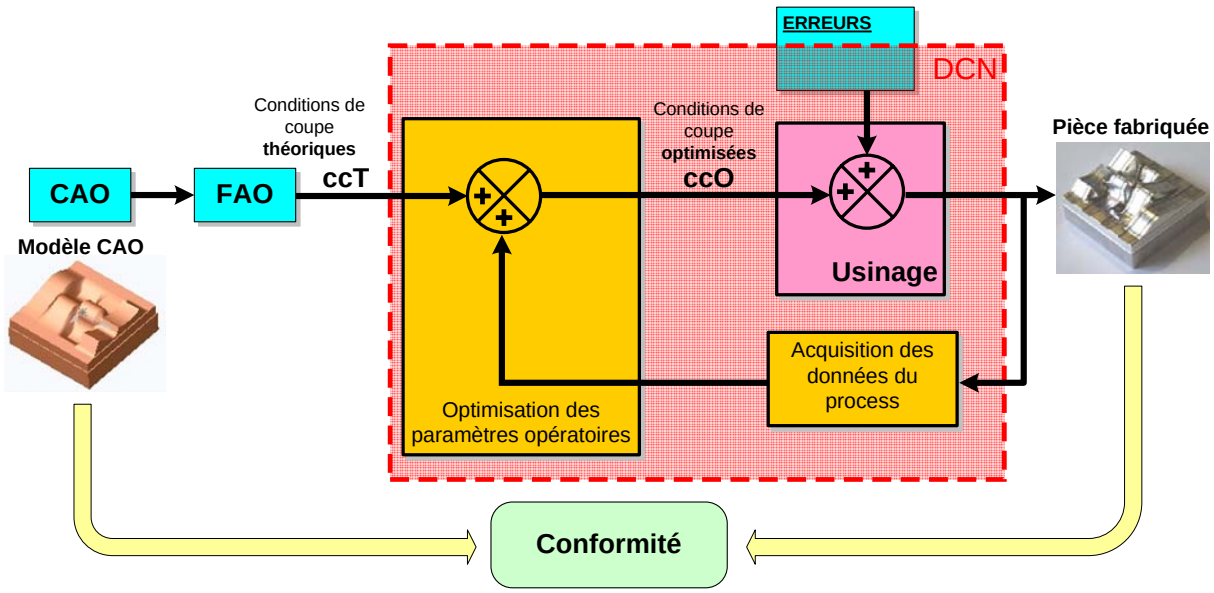


Figure 88 : Principe de la méthode de programmation par trajectoires ICAM

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Par conséquent, comme présenté sur la Figure 88, la méthode ICAM se divise en deux étapes effectuées en cours de fabrication : la première consiste à récupérer les données du process, la seconde à adapter la programmation de la MOCN (trajectoires, paramètres opératoires) en fonction des estimations effectuées.

En outre, nous avons également voulu développer une méthode qui soit la plus générique et la plus facile à mettre en œuvre possible. Il s'agit en particulier de pouvoir l'utiliser sur des MOCN d'ateliers de production industrielle, ceci quelles que soient leur architecture (3-5 axes, parallèles ou sérielle, ...) ou les pièces produites (géométrie, matériau, taille de lots, ...). Dans ce but, nous n'avons pas voulu faire appel à un équipement additionnel pour recueillir les informations utiles ou pour effectuer les modifications de trajectoires. Lors de la mise en œuvre de la méthode ICAM, ces opérations seront effectuées par le DCN de la machine outil utilisée. En effet, les DCN récents, comme le Sinumerik 840D de Siemens®, offrent toutes les fonctionnalités nécessaires à cette approche.

De même que les MOCN actuelles ne sont pas uniquement destinées à des opérations de fraisage, notre intention est de ne pas cantonner la méthode de programmation par trajectoires ICAM à ce seul procédé de fabrication. Ainsi, les données seront collectées au niveau des servomoteurs des axes de la MOCN et non au niveau de la broche ou du porte-pièce. Par exemple, les applications de formage incrémental pourront également bénéficier d'une approche ICAM (comme nous le verrons au paragraphe 4.4.2).

D'un point de vue pratique, nous avons utilisé les efforts sur l'outil comme donnée du process mesurée lors de la première étape de la méthode ICAM. Comme nous l'avons vu dans les chapitres 2 et 3, il s'agit d'un bon indicateur du déroulement d'un process sur MOCN.

A la suite des estimations d'effort, plusieurs solutions peuvent être utilisées pour optimiser les paramètres opératoires. En fonction du procédé choisi et du type de pièce à fabriquer, nous proposons plusieurs solutions agissant sur la forme de la trajectoire ou sur les paramètres de coupe, comme la vitesse d'avance.

4.3.2 Estimation des efforts sur l'outil

Cette première étape de la méthode ICAM vise à estimer les données du process que l'on a choisies comme indicateur de bon déroulement de celui-ci. Comme nous l'avons indiqué plus haut, le paramètre adopté est la valeur de l'effort sur l'outil. Contrairement aux autres approches qui nécessitent un équipement

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

additionnel pour mesurer les efforts de coupe, la méthode que nous proposons consiste à les évaluer directement à partir de données du DCN. Notre objectif est de s'affranchir des contraintes de mise en œuvre liées à l'ajout de matériel de mesure, comme la taille et le poids du brut ou l'apparition de vibrations. L'estimation peut ainsi être effectuée par des opérations adaptées de la programmation.

A partir de ces données et de la connaissance de la géométrie de la MOCN, il est possible d'estimer les efforts de l'outil sur la pièce, grâce aux fonctionnalités du DCN.

Le principe d'estimation des efforts sur l'outil que nous avons retenu et qui est présenté ici est le suivant : les couples d'usinage sont relevés à l'aide des paramètres du DCN concernant les servomoteurs des axes de déplacement de la MOCN. Ensuite, le lien entre les couples relevés et les efforts sur l'outil est établi par calcul à l'intérieur du DCN en intégrant la cinématique de la MOCN.

4.3.2.1 Calcul des couples d'usinage par les données du DCN

Ce paragraphe explique la démarche employée pour estimer les efforts sur l'outil à partir des couples dans les moteurs d'axes. Comme indiqué sur la Figure 89, elle se divise en deux phases.

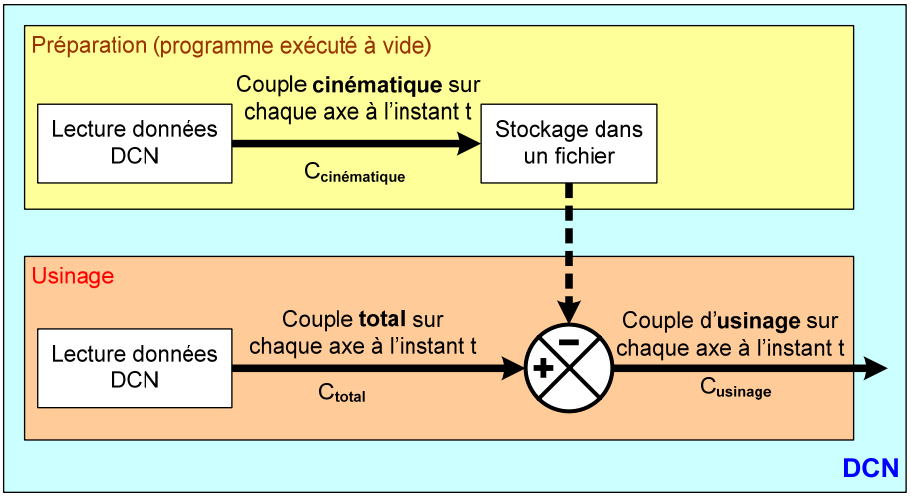


Figure 89 : Principe d'estimation du couple d'usinage par méthode ICAM

Dans un premier temps, lors de la phase de préparation, le programme d'usinage est exécuté à vide, sans brut à l'intérieur du porte-pièce. Le but est de relever les couples cinématiques créés par les déplacements de l'outil. Il est très important que les positions prises par l'outil soient les mêmes que celles prises lors de l'usinage, afin que chaque moteur de la MOCN supporte le même couple cinématique que lors de l'usinage. Les valeurs relevées sont ensuite stockées dans un fichier

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

associant le couple cinématique à chaque position de l'outil (valeur relevée sur le DCN). En conséquence, si la méthode ICAM nécessite une étape préliminaire avant d'être opérationnelle, l'impact de cette étape de préparation sur les coûts de production reste assez limité comparativement aux méthodes d'optimisation existantes, car il n'y a pas besoin d'un usinage en réel, comme pour les méthodes par apprentissage. De plus, cette situation permet d'appliquer la méthode ICAM à des pièces unitaires ou à forte valeur ajoutée.

La seconde phase se déroule lors de l'usinage d'une pièce. Les couples totaux au niveau de chaque axe de la MOCN sont lus dans les paramètres du DCN. Ces valeurs tiennent compte à la fois des couples cinématiques et des couples d'usinage. Il faut faire la part de chacune des contributions. Ainsi, pour chaque valeur de couple total relevée, la correspondance avec le couple cinématique mesuré en phase un permet d'isoler le couple d'usinage (équation (14.)) :

$$C_{\text{usinage}}(s) = C_{total}(s) - C_{cinématique}(s) \quad \text{avec s l'abscisse curviligne de la trajectoire} \qquad (14.)$$

On dispose finalement du couple créé par l'effort d'usinage au niveau de chaque moteur de la MOCN. Celui-ci est estimé en temps réel lors de l'usinage de la pièce fabriquée. Afin de clarifier le mode de calcul du couple d'usinage, la Figure 90 présente un exemple d'estimation du couple d'usinage à partir des mesures de couple lors de la phase de préparation, effectuée à vide, et des couples totaux, lors de la phase d'usinage.

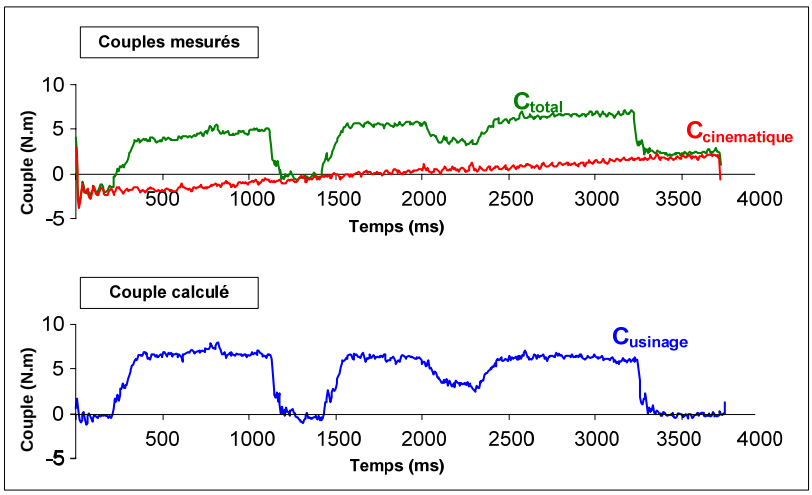


Figure 90 : Exemple d'estimation du couple d'usinage sur un axe

Enfin, si le DCN ne permet pas de récupérer le couple de chaque axe de la MOCN, il est tout à fait possible de baser cette étude sur l'étude des courants dans les moteurs, en connaissant les caractéristiques technologiques de chacun d'eux. En

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

effet, la relation liant couple et intensité dans un moteur de vis à bille s'écrit souvent comme indiqué par l'équation (15.) :

$C = K_c.I$ où K_c est la constante de couple du moteur (15.)

4.3.2.2 Calcul des efforts sur l'outil à l'aide de la géométrie de la MOCN

A partir des couples d'usinage estimés, nous explicitons dans cette partie le processus de calcul des efforts appliqués sur l'outil. Nous nous appuyons pour cela sur la géométrie de la MOCN parallèle VERNE du laboratoire. Néanmoins, les principes appliqués et la méthode proposée peuvent être étendus à tout mécanisme dont les modèles de transformation géométrique sont connus.

Il est utile de préciser ici que les calculs seront menés en faisant les hypothèses classiques de la mécanique du solide indéformable. En particulier, les déformations de la structure seront négligées : à l'équilibre, la somme des efforts externes appliqués à un ensemble considéré sera nulle. Dans la suite de cette partie, nous utiliserons les notations présentées dans le Tableau 12.

Paramètre	Définition
R_0	Référentiel absolu lié au bâti et de centre O
$B_0 = (\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{z_0})$	Base absolue, associée à R_0. $\overrightarrow{z_0}$ est colinéaire à l'axe des chariots
{X,Y,Z,B,C}	Coordonnées cartésiennes du centre outil dans le repère de programmation
$\{V_1,V_2,V_3,Bc,Cc\}$	Coordonnées articulaires
C_j	Couple d'usinage dans la glissière j, $j \in [\![1,3]\!]$
A_i	Centre de la liaison entre la jambe i et le chariot j, $i \in [\![1,6]\!]$, $j \in [\![1,3]\!]$
B_i	Centre de la liaison entre la jambe i et la plateforme mobile, $i \in [\![1,6]\!]$
L_i	Longueur de la jambe i, $i \in [\![1,6]\!]$
$\overrightarrow{z_i}$	Vecteur unitaire colinéaire à $\overrightarrow{B_iA_i}$, $i \in [\![1,6]\!]$
$F_j \overrightarrow{z_0}$	Effort calculé dans le chariot j, $j \in [\![1,3]\!]$
p_{vis}	Pas de la vis à bille d'un chariot

Tableau 12 : Notations employées pour le module parallèle

La démarche choisie s'appuie sur des relations d'équilibre de plusieurs éléments de la structure de MOCN VERNE, afin de relier pas à pas les couples d'usinage mesurés par le DCN dans les moteurs des glisseurs aux efforts supportés par l'outil.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Chaque servomoteur étant constitué d'un mécanisme de vis à bille, le calcul de la valeur de l'effort F_j appliqué au chariot j est obtenu par l'équation (16.):

$$F_j = \frac{2\pi . C_j}{p_{vis}} \qquad \text{pour} \quad j \in [\![1,3]\!] \tag{16.}$$

La relation d'équilibre du système {outil, module parallèle, chariots} est modélisée sur la Figure 91.

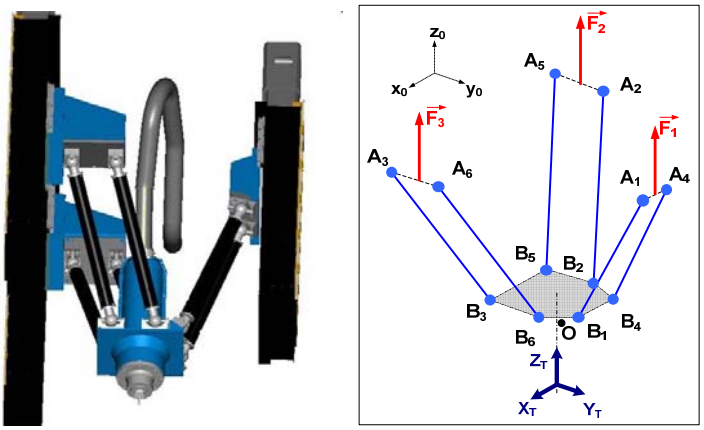


Figure 91 : Efforts appliqués au système {outil, module parallèle, chariots}

L'effort sur l'outil est déterminé par l'équation (17.).

$$\vec{F_T} = X_T \vec{x_0} + Y_T \vec{y_0} + Z_T \vec{z_0} \qquad \text{soit} \qquad \left\| \vec{F_T} \right\| = X_T{}^2 + Y_T{}^2 + Z_T{}^2 \tag{17.}$$

Les liaisons entre chaque chariot et les jambes correspondantes sont modélisées par des rotules ; les jambes peuvent être considérées comme des barres rigides. Chaque jambe i ne transmet donc qu'un effort de traction-compression dont la valeur est Ni et qui est orienté selon le vecteur $\vec{z_i}$ associé (Figure 92A).

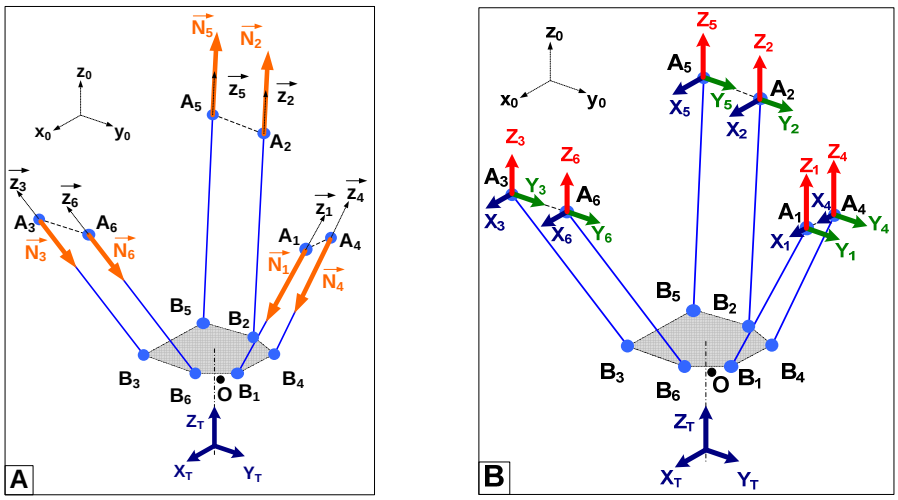


Figure 92 : Modélisations des efforts sur le module parallèle

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

La relation d'équilibre s'écrit comme défini par l'équation (18.) :

$$\sum_{i=1}^{6} N_i \overrightarrow{z_i} + \overrightarrow{F_T} = \vec{0} \qquad (18.)$$

Par suite, en écrivant l'équation de l'équilibre de la résultante des efforts au nœud i, on peut décomposer l'effort de traction-compression dans la base B_0.

$$X_i \vec{x}_0 + Y_i \vec{y}_0 + Z_i \vec{z}_0 + N_i \vec{z}_i = \vec{0} \qquad \text{pour } i \in [\![1,6]\!] \qquad (19.)$$

La modélisation de l'équilibre du module parallèle se traduit donc par la Figure 92B. Comme toutes les composantes sont exprimées dans la base B_0, la relation (19.) se traduit par le système d'équations (20.).

$$\begin{Bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^{6} X_i \\ \sum_{i=1}^{6} Y_i \\ \sum_{i=1}^{6} Z_i \end{Bmatrix} \qquad (20.)$$

La détermination des efforts de l'effort total sur l'outil consiste alors à calculer les composantes X_i, Y_i et Z_i pour chaque rotule de centre A_i.

Pour cela, nous allons faire l'hypothèse que l'effort dans un chariot j se répartit uniformément sur les deux rotules associées de centre A_i et A_{i+3}. Cette hypothèse se base sur les données de conception de la MOCN VERNE ; elle est valide pour la majorité des cas d'usinage, pour lesquels le module parallèle reste à l'intérieur du volume délimité par les chariots. On obtient donc les relations (21.), qui permettent de relier l'effort sur le chariot j à la composante selon $\overrightarrow{z_0}$ des efforts de liaison aux points A_i et A_{i+3} associés.

$$Z_1 = Z_4 = \frac{F_1}{2} \qquad Z_2 = Z_5 = \frac{F_2}{2} \qquad Z_3 = Z_6 = \frac{F_3}{2} \qquad (21.)$$

Puis, la projection sur $\overrightarrow{z_0}$ de la relation (19.) permet de calculer la valeur de N_i et ainsi de relier les valeurs de X_i et Y_i à celle de Z_i, comme indiqué dans l'équation (22.) :

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix}_{A_i} = \begin{Bmatrix} Z_i \dfrac{\cos(\vec{z}_i, \vec{x}_0)}{\cos(\vec{z}_i, \vec{z}_0)} \\ Z_i \dfrac{\cos(\vec{z}_i, \vec{y}_0)}{\cos(\vec{z}_i, \vec{z}_0)} \\ -N_i \cos(\vec{z}_i, \vec{z}_0) \end{Bmatrix}_{A_i} \qquad (22.)$$

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Il est donc nécessaire de connaître la décomposition angulaire de chaque vecteur $\vec{z_i}$ dans la base B_0 pour calculer les valeurs de composantes à chaque nœud A_i. Ces angles peuvent être déterminés à partir des coordonnées des points A_i et B_i dans le repère R_0 (Figure 93).

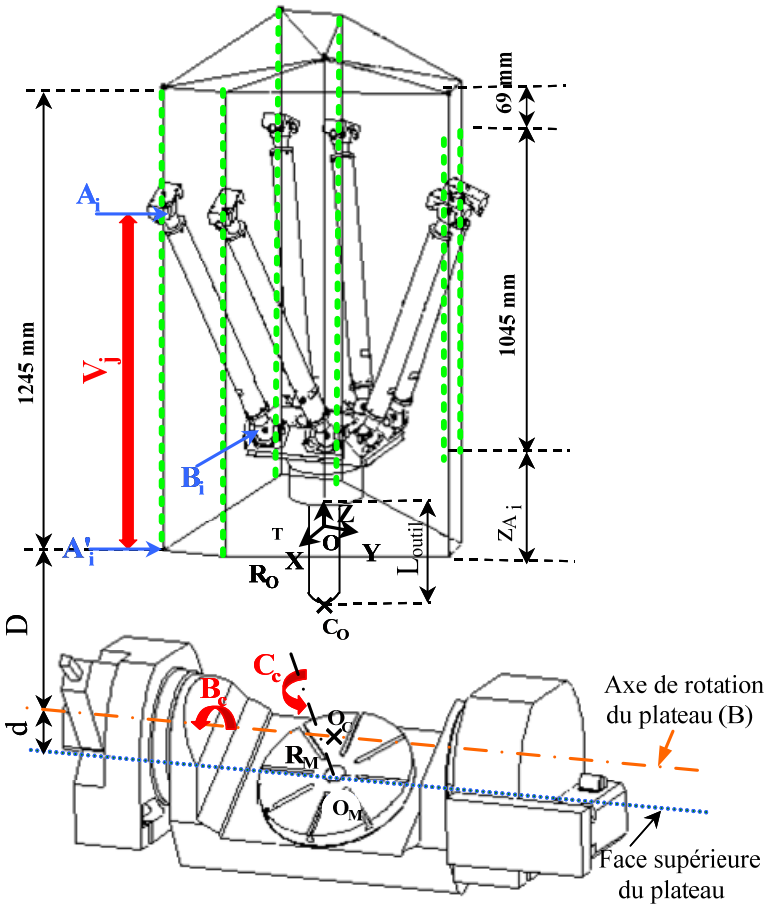


Figure 93 : Points particuliers de la structure de la MOCN VERNE

Pour chaque nœud i, les composantes de l'effort pourront ainsi être obtenues suivant l'équation (23.).

$$\begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{Fj}{2} \times \frac{X_{B_i} - X_{A_i}}{Z_{B_i} - Z_{A_i}} \\ \frac{Fj}{2} \times \frac{Y_{B_i} - Y_{A_i}}{Z_{B_i} - Z_{A_i}} \\ \frac{Fj}{2} \end{vmatrix} \qquad \text{pour } i \in [\![1,6]\!] \text{ et } j \in [\![1,3]\!] \qquad (23.)$$

La détermination des coordonnées des rotules A_i et B_i est donc nécessaire. Pour cela, nous allons nous baser sur les travaux de Terrier [Terrier2005a], qui exposent le calcul du modèle géométrique inverse de la MOCN VERNE.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Celui-ci est basé sur le calcul de la longueur du vecteur $\overrightarrow{A_iB_i}$, donné par l'équation (24.) :

$$L_i^2 = \left\| \overrightarrow{A_iB_i} \right\| = (X_{B_i} - X_{A_i})^2 + (Y_{B_i} - Y_{A_i})^2 + (Z_{B_i} - Z_{A_i})^2 \qquad \text{pour } i \in [\![1,6]\!] \tag{24.}$$

Les expressions des positions des points A_i et B_i dans l'espace cartésien sont ensuite obtenues par décomposition des vecteurs $\overrightarrow{OA_i}$ et $\overrightarrow{OB_i}$:

$$\begin{vmatrix} X_{A_i} \\ Y_{A_i} \\ Z_{A_i} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_{A_i} \\ y_{A_i} \\ z_{A_i} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ V_j \end{vmatrix} \tag{25.}$$

$$\begin{vmatrix} X_{B_i} \\ Y_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{vmatrix} = R. \begin{vmatrix} x_{B_i} \\ y_{B_i} \\ z_{B_i} + L_{outil} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -D \end{vmatrix} + R_1. \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z - d \end{vmatrix} \tag{26.}$$

où R et R_1 sont des matrices de rotation définies par les équations (27.) et (28.).

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos(Bc) & 0 & \sin(Bc) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(Bc) & 0 & \cos(Bc) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(Cc) & -\sin(Cc) & 0 \\ \sin(Cc) & \cos(Cc) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{27.}$$

$$R = R_1 \times R_2 \text{ avec } R_2 = \begin{bmatrix} \cos(C) & -\sin(C) & 0 \\ \sin(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(B) & 0 & \sin(B) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(B) & 0 & \cos(B) \end{bmatrix} \tag{28.}$$

Les vecteurs $\{x_A,y_A,z_A\}_i$ et $\{x_B,y_B,z_B\}_i$ ainsi que les valeurs des paramètres D, d sont des données de conception de la MOCN VERNE. Elles font partie des paramètres à modifier lors d'une calibration de la machine. L_{outil} correspond à la jauge de longueur de l'outil utilisé.

Les équations présentées ici permettent également de calculer le modèle géométrique inverse de la structure de la MOCN, c'est-à-dire de déterminer les coordonnées articulaires $\{V_1,V_2,V_3,Bc,Cc\}$ à partir des coordonnées cartésiennes programmées {X,Y,Z,B,C}. On s'appuie pour cela sur la méthode de Newton-Raphson, telle que présentée par Terrier dans [Terrier2005a].

Il est important de préciser ici que, lors de la mise en œuvre sur MOCN de cette méthode, les coordonnées cartésiennes programmées et les coordonnées articulaires sont connues du DCN tout au long de la trajectoire.

Ainsi, la connaissance des coordonnées des points A_i et B_i à chaque instant (équations (25.) et (26.)) nous permet de calculer les efforts dans chaque liaison grâce à l'équation (23.), puis de relier les efforts sur l'outil aux efforts dans les glissières grâce à l'équation (20.). Le principe de la démarche est proposé par la Figure 94.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

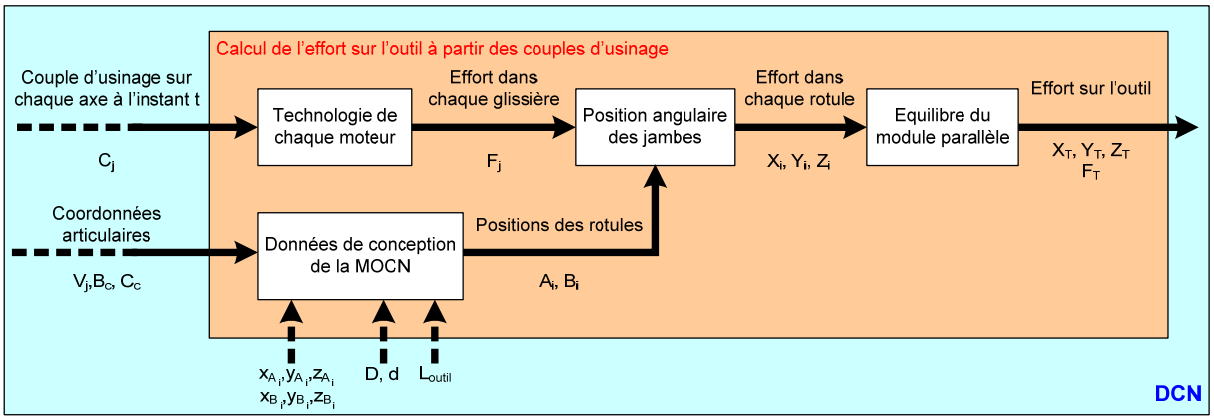


Figure 94 : Estimation des efforts sur l'outil à partir des couples d'usinage sur la MOCN VERNE

La liaison entre les couples d'usinage estimés et la valeur de l'effort sur l'outil peut donc être établie par le DCN, en s'appuyant sur les possibilités de programmation et de traitement offertes par ces équipements. Par conséquent, en intégrant les démarches du paragraphe précédent, il nous est possible d'estimer, à chaque instant de l'exécution d'un programme d'usinage, les efforts sur l'outil à partir des données présentes dans le DCN.

De manière générale, les concepts que nous avons développés dans cette partie ne sont pas limités à la seule MOCN VERNE mais peuvent être étendus à tout mécanisme dont le modèle de transformation géométrique est connu. La Figure 95 propose la démarche générique d'estimation de l'effort sur l'outil à partir des couples relevés. De fait, l'application de cette méthodologie à une machine outil sérielle suit les mêmes principes.

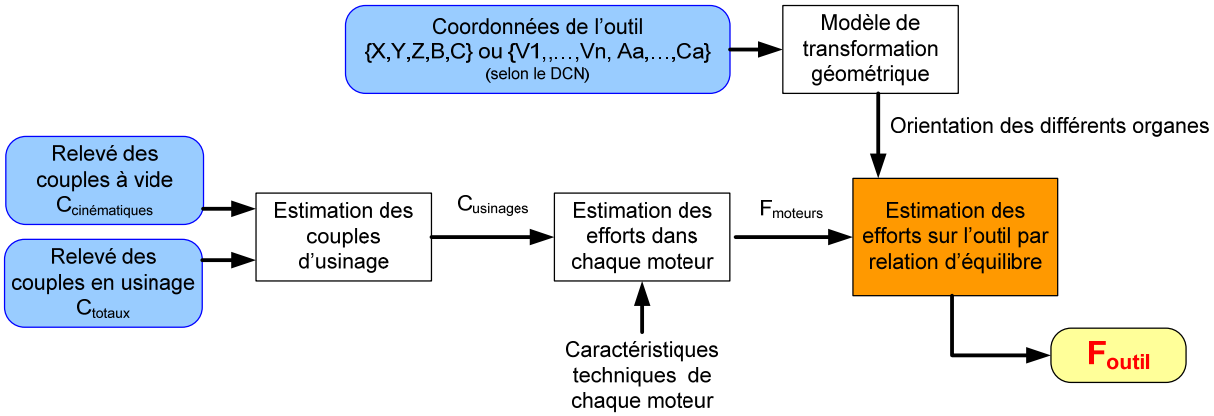


Figure 95 : Démarche générale d'estimation des efforts sur l'outil

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

4.3.3 Optimisation des paramètres opératoires

La seconde étape de la méthode ICAM a pour objet d'optimiser les paramètres opératoires de la MOCN en fonction des données process estimées au cours de la première étape. Il s'agit ici d'apporter une correction à ces paramètres au cours de l'exécution du programme d'usinage. Pour des raisons identiques que celles énoncées au paragraphe précédent, nous avons décidé de réaliser les opérations associées à cette phase à l'intérieur du DCN. Le choix du type de modification à effectuer dépendra du procédé pour lequel nous utiliserons les trajectoires ICAM, des diverses contraintes associées mais aussi de la nature des données process estimées au cours de la première étape.

Dans le cadre de nos travaux, les données évaluées sont les efforts appliqués à l'outil. Nous avons donc retenu deux manières d'adapter la programmation de la MOCN aux mesures effectuées : modifier la vitesse d'avance ou modifier la forme de la trajectoire. Une schématisation des adaptations envisagées est présentée sur la Figure 96 qui présente un cas d'usinage à engagement radial variable.

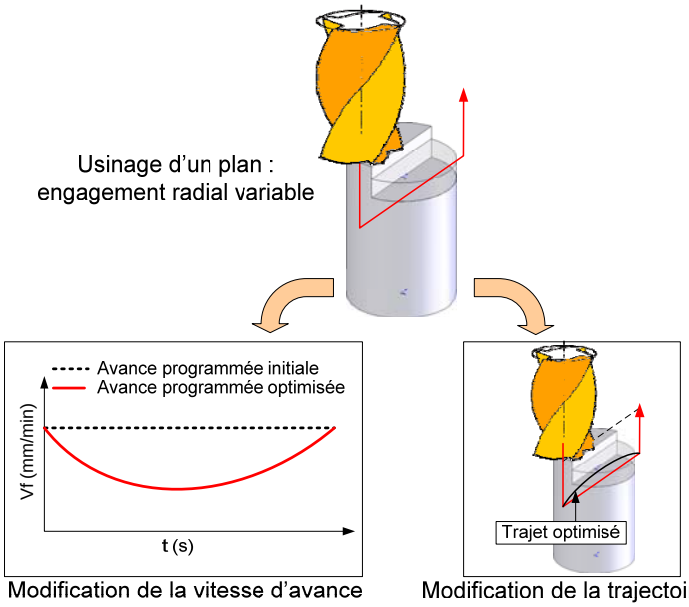


Figure 96 : Exemples d'optimisation de la programmation

Nous détaillerons ici la méthode d'optimisation par maîtrise de la vitesse d'avance. Le second type d'optimisation proposé sur la Figure 96 qui consiste à modifier la forme des trajets fera l'objet d'une présentation plus approfondie dans le paragraphe lié à la mise en œuvre de la méthode ICAM pour des applications de formage incrémental. Il est bien adapté à ce procédé de fabrication.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

L'optimisation par maîtrise de la vitesse d'avance s'accorde avec le choix fait précédemment d'estimer les efforts sur l'outil dans le cadre d'applications de fraisage. Ils dépendent en effet de l'avance par dent utilisée ainsi que de la section de copeau. Cette dernière découle de la géométrie de la trajectoire suivie par l'outil car elle est fonction des engagements axiaux et radiaux. Par contre, l'avance par dent fz résulte du rapport entre vitesse d'avance (Vf en m/min) et vitesse de coupe (Vc en m/min) ainsi que d'un coefficient dépendant uniquement de la géométrie de l'outil de coupe, comme le montre l'équation (29.) :

$$f_z = \frac{\pi D}{Z} . \frac{V_f}{V_c} \qquad (29.)$$

En conservant une vitesse de coupe constante, c'est-à-dire une fréquence de broche constante, une variation de la vitesse d'avance programmée conduit donc à une variation des efforts de coupe, ceci dans la même proportion.

D'un point de vue pratique, en comparaison des cas habituels de programmation où la valeur de la vitesse d'avance est uniquement déclarée au début d'une séquence, notre approche consiste à ajouter des lignes de commande autorisant des modifications d'avance au programme en code G. On peut par exemple s'appuyer sur une fonction spécifique au DCN Sinumerik 840D qui permet d'ajouter un pourcentage de correction défini à la vitesse d'avance programmée. Par ce biais, il est possible d'effectuer les corrections quelles que soient les valeurs nominales.

De plus, notre approche fait appel à un « effort nominal d'usinage» avec lequel l'effort réel estimé doit être comparé, afin de procéder à des éventuelles adaptations. Celui-ci est défini en fonction du couple outil/matière utilisé et des capacités des moyens de fabrication (comme par exemple la vitesse de la broche), en s'appuyant, par exemple, sur des simulations numériques.

D'un point de vue pratique, il est également important de rappeler que les adaptations de vitesse d'avance ne doivent pas conduire à une variation de l'avance à tout instant, ce qui serait très pénalisant pour le rendu final de la pièce et pour la durée de vie de l'outil et de la broche. Il s'agit à l'inverse de générer un profil de vitesse lissé. C'est pourquoi notre approche fait aussi appel à une zone de tolérance, à l'intérieur de laquelle les paramètres opératoires sont considérés comme valides. De la même manière que pour l'effort nominal, la valeur des limites de la zone d'acceptation, exprimée en pourcentage de l'effort nominal, est choisie en fonction de critères technico-économiques lors de la programmation des parcours.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Ainsi, en fonction des valeurs d'effort estimées par le DCN, trois situations peuvent survenir, comme indiqué sur la Figure 97 :

- Les efforts de coupe réels sont au-dessus de la zone de tolérance : le paramètre de correction est décrémenté pour les faire revenir à la valeur de l'effort nominal d'usinage.
- Les efforts de coupe réels sont à l'intérieur de la zone d'acceptation : le DCN conserve ses paramètres actuels
- Les efforts de coupe sont en dessous de la zone de tolérance : la vitesse d'avance est augmentée pour gagner en productivité.

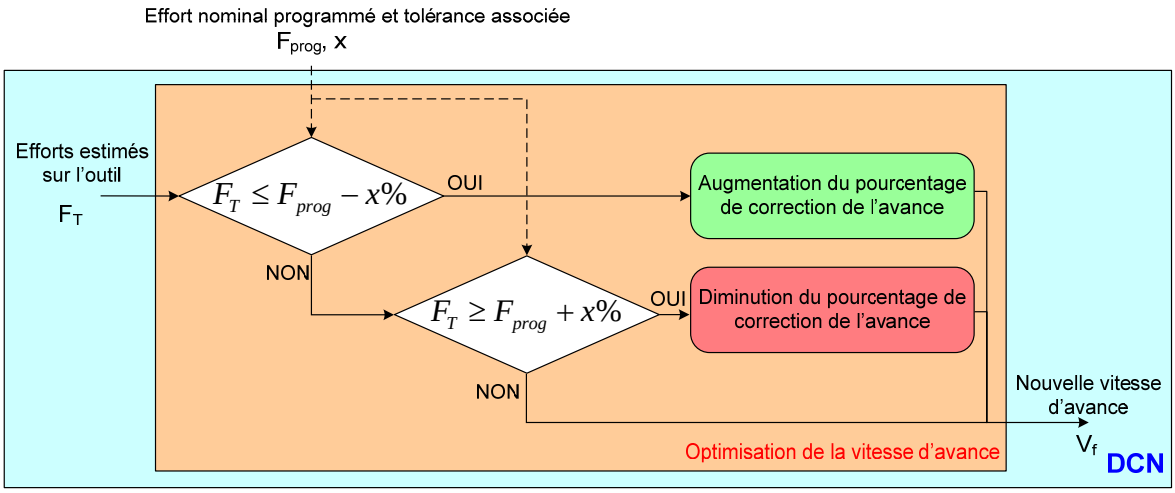


Figure 97 : Adaptation de la vitesse d'avance par méthode ICAM

Afin de clarifier notre propos, la Figure 98 présente les adaptations de vitesse d'avance en fonction d'une profondeur de passe variable le long d'un trajet d'usinage.

Au final, la méthode d'adaptation basée sur des modifications de vitesse d'avance que nous proposons ici se rapproche de celle utilisée par le module OPTIPATH, de la société VERICUT [CGTech2007], à la différence près que les modifications proposées par ce logiciel sont basées sur les simulations numériques de profondeur de passe, tandis que la méthode ICAM s'appuie sur des estimations en temps réel du comportement de la MOCN. De plus, les optimisations proposées ne sont pas limitées à la seule vitesse d'avance et peuvent, par exemple, agir sur la géométrie des trajets.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

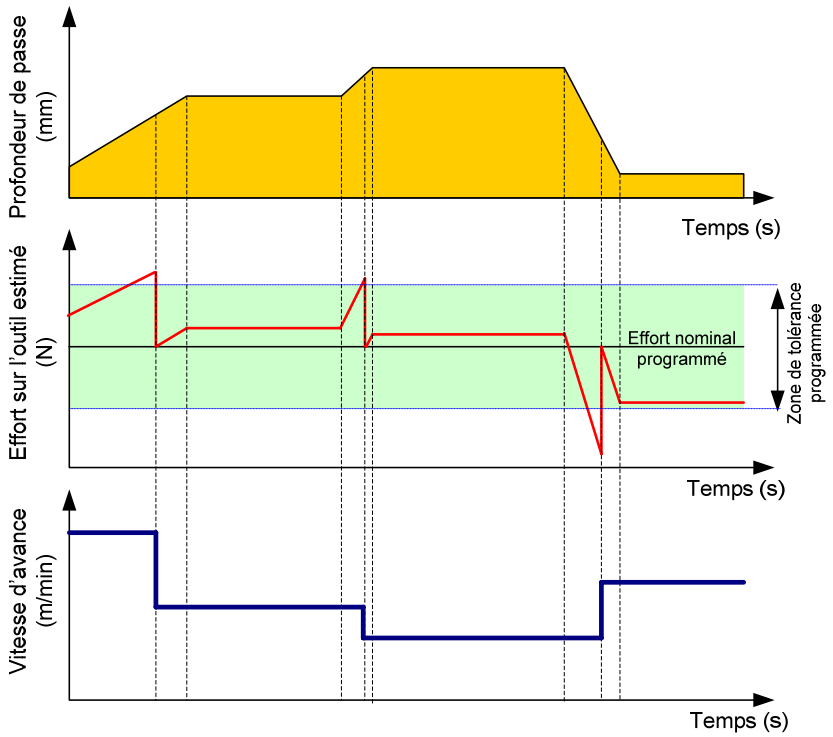


Figure 98 : Optimisation de la vitesse d'avance suite à une variation de la profondeur de passe

Un aspect important de la méthode proposée est que l'adaptation de vitesse d'avance est réalisée en temps réel. En effet, cette étape ne requiert pas de phase d'apprentissage : les corrections sont effectuées directement à partir des mesures réelles d'effort de coupe, comparées à l'effort de référence ; celui-ci est associé à l'outil et a été prédéterminé indépendamment de l'application mise en œuvre. Par exemple, deux outils de coupe différents sont utilisés pour le même programme d'usinage ; l'un, plus usé que l'autre, génère des efforts plus importants. Avec cet outil, la vitesse d'avance sera réduite en comparaison de celle utilisée avec l'autre outil.

Enfin, un intérêt important des optimisations de paramètres opératoires proposés est que les adaptations réalisées sont complètement automatiques et transparentes pour l'opérateur, que l'on modifie les trajectoires ou la vitesse d'avance, dans le sens où son intervention n'est pas requise.

Néanmoins, afin de pouvoir faire la différence entre une modification de paramètres effectuée dans le cadre de la méthode ICAM et un éventuel dysfonctionnement du DCN, chaque modification de paramètre s'accompagne d'un message au niveau du pupitre de commande pour informer l'opérateur de la MOCN d'une adaptation de la programmation.

D'un point de vue technique, les adaptations de la programmation sont réalisées par ajout au programme d'usinage initial de variables, de sous-programmes

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

et de fonctions de régulation. On utilise alors une programmation paramétrée, ce qui a tendance à alourdir son implémentation, étant donné que le format utilisé actuellement, l'ISO 6983, ne permet pas de prendre facilement en compte ces optimisations. Nous montrerons au cours du chapitre suivant, que la mise en œuvre de la méthode ICAM peut se faire de manière plus performante et moins contraignante en employant une programmation sous format Step_NC. En effet, ce standard de données, capable de gérer des informations de haut niveau, offre le cadre idéal aux optimisations proposées par l'approche ICAM, en s'affranchissant notamment d'une programmation lourde et complexe sous code G.

4.4 Mise en œuvre – Applications

Dans ce paragraphe, nous présenterons deux exemples d'implémentation de trajectoires ICAM. Le premier traite de l'usinage et consiste en une validation expérimentale des concepts énoncés précédemment. Le second présente la mise en œuvre de cette méthode d'optimisation de la programmation des MOCN pour des applications de formage incrémental [Ghemraoui2006].

4.4.1 Etude de faisabilité en Usinage

L'objectif de cette première validation expérimentale est de confirmer l'efficacité du premier niveau de la méthode ICAM, qui consiste à estimer les efforts d'usinage à l'aide du seul DCN, pour pouvoir ensuite adapter les paramètres opératoires.

Une rainure a été usinée dans un bloc d'aluminium sur la MOCN VERNE, en estimant les couples des servomoteurs à l'aide du DCN. Cette rainure test présentait la particularité d'être divisée en cinq zones, notées de A à E, comme présenté sur la Figure 99. Elle a été réalisée à l'aide d'une fraise deux tailles de 20 mm de diamètre, avec une vitesse de coupe de 630 m/min, une avance de 4 m/min et une profondeur de passe de 5 mm.

- Zones **A**, **C** et **E** : rainurage à vitesse d'avance constante et selon toute la profondeur de passe (5 mm).
- Zone **B** : zone pré-usinée de 10 mm de largeur, pas d'enlèvement de matière.
- Zone **D** : zone pré-usinée de 3 mm de profondeur, profondeur de passe 2 mm lors du passage de l'outil.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

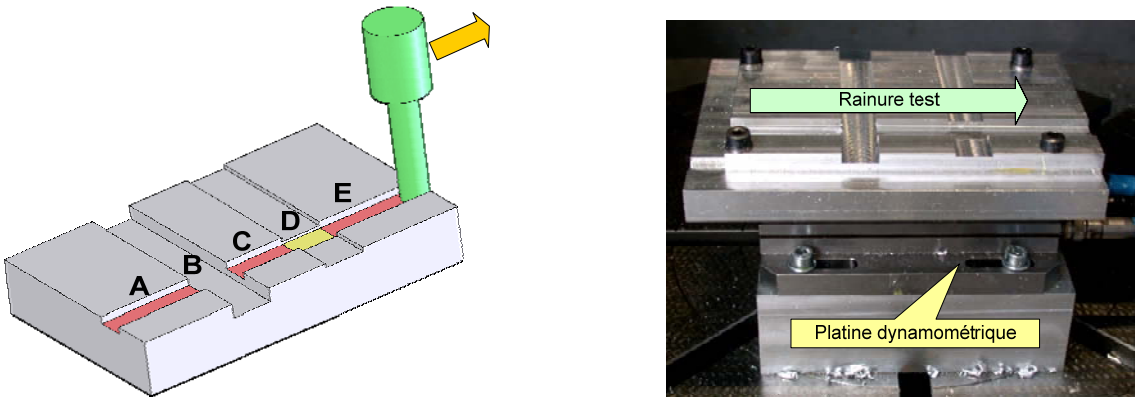


Figure 99 : Rainure test et dispositif expérimental

Au cours de l'usinage, les efforts sur l'outil ont été calculés à partir des couples mesurés dans les servomoteurs selon la méthodologie proposée. Les résultats de mesure des couples sont donnés sur la Figure 100.

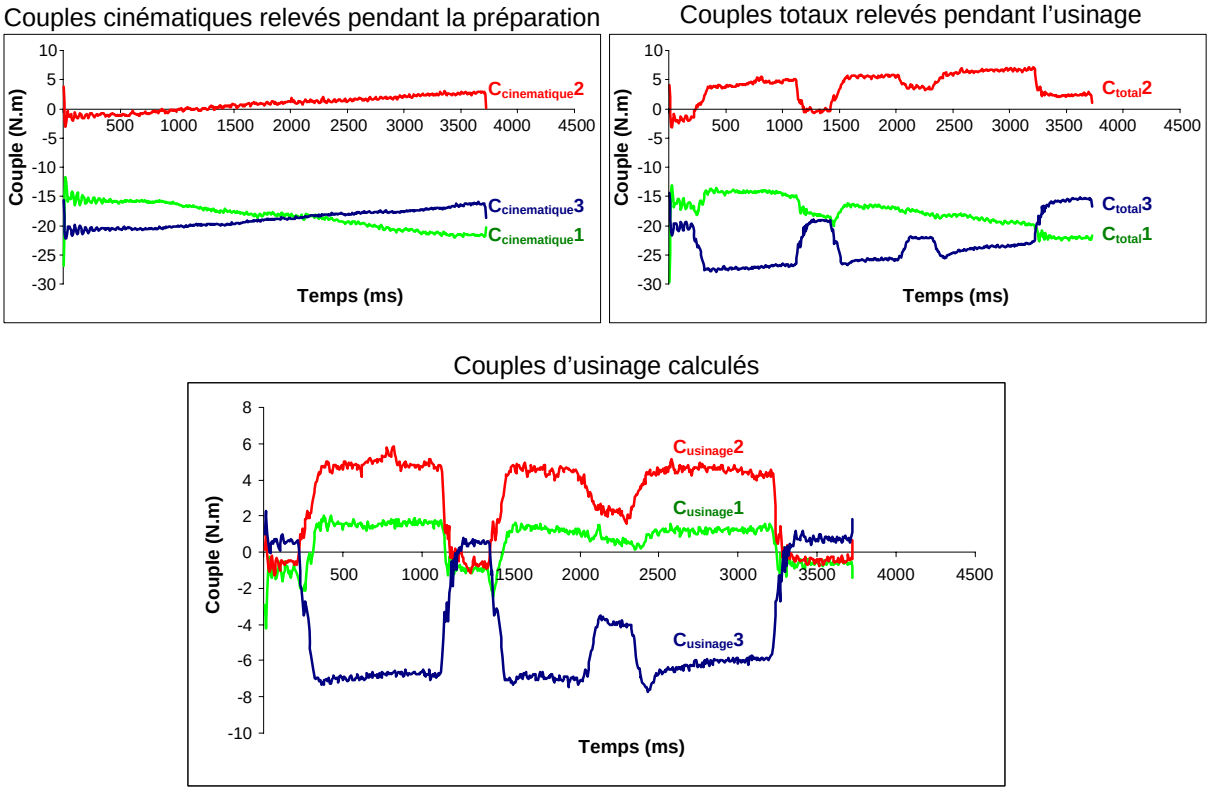


Figure 100 : Relevés de couples pour la validation expérimentale

La méthodologie développée dans le paragraphe précédent a ensuite été appliquée aux couples mesurés. L'estimation de l'effort sur l'outil obtenue a été comparée aux relevés obtenus par une platine d'acquisition dynamométrique Kistler, sur laquelle la pièce test était montée pendant l'essai. Comme l'indique la Figure 101, il y a une bonne corrélation entre les résultats retournés par les deux moyens. Les

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

cinq zones spécifiques de A à E sont bien identifiables sur la courbe des estimations du DCN et les valeurs sont voisines des relevés Kistler avec un écart inférieur à 10%.

Les résultats de cette première validation expérimentale confirment la pertinence de la méthode de programmation par trajectoires ICAM, bien que seule l'étape d'estimation des efforts de coupe ait été testée. Il s'agit en effet de la phase la plus critique, car toutes les adaptations de paramètres opératoires dépendent de la justesse de ces résultats.

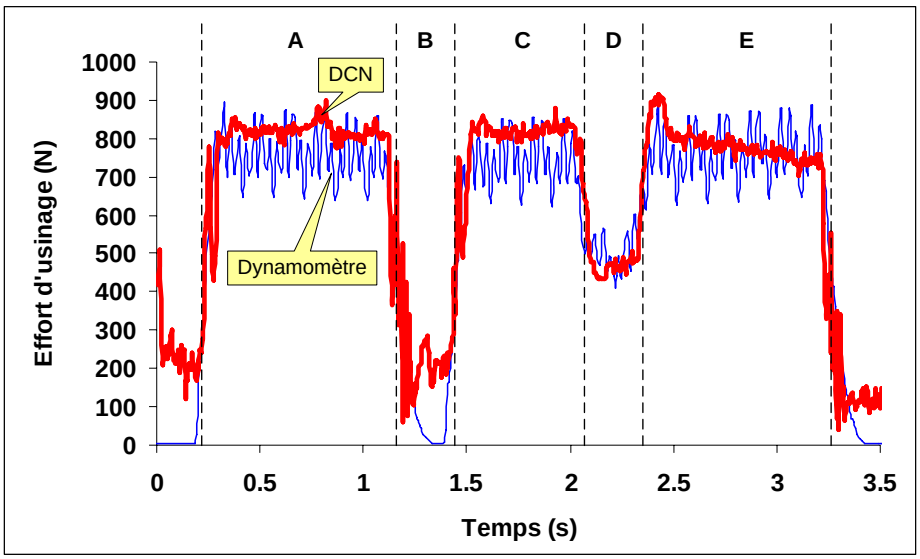


Figure 101 : Comparaison des relevés d'efforts du DCN et du dynamomètre

Ainsi, à partir des estimations d'efforts, plusieurs adaptations de paramètres sont possibles. Dans le cas d'une rainure, l'exemple traité ici, la solution la plus évidente consiste à optimiser la vitesse d'avance, en s'appuyant sur la démarche proposée précédemment et illustrée par la Figure 98. Le profil d'avance obtenu serait alors semblable à celui présenté par la Figure 102.

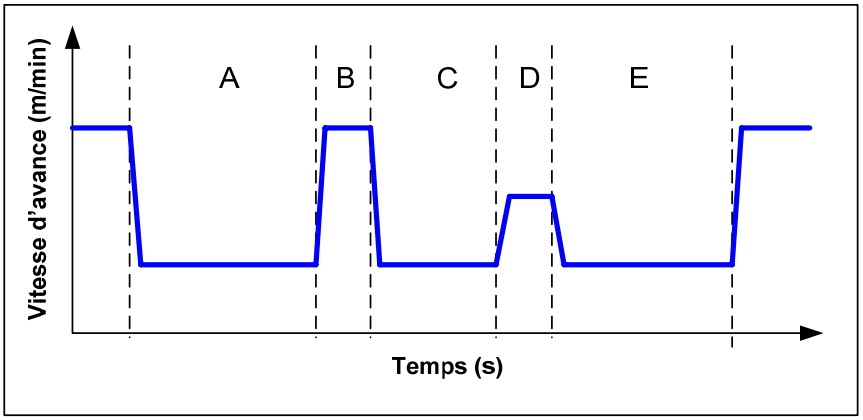


Figure 102 : Exemple de consigne d'avance par méthode ICAM pour l'exemple traité

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

D'autres types d'adaptation sont également possibles. Par exemple, dans le cas d'opérations de contournage faisant appel à des fonctions de décalage du trajet à l'aide de jauge de rayon d'outil, il est possible de mettre en place une démarche similaire à celle développée pour la vitesse d'avance, mais agissant sur la correction de rayon de l'outil utilisé. Ce type d'adaptation modifie toutefois l'engagement de l'outil. Selon l'application mise en œuvre (ébauche, finition) et l'optimisation recherchée (flexion, vibrations, ...) il sera peut-être nécessaire d'ajouter un passage d'outil supplémentaire pour aboutir à la géométrie attendue. Le déploiement de ce type d'adaptation de la programmation n'est par conséquent pas immédiat.

Le format de description des trajectoires employé peut également influer sur la nature des adaptations qu'il va être possible de mettre en œuvre, si le levier d'optimisation choisi consiste en la modification de la géométrie du trajet. En effet, selon que les parcours sont programmés par interpolation linéaire, circulaire ou spline, la modification peut avoir des effets différents sur la géométrie du parcours. Il convient alors de proposer une réponse d'optimisation qui soit fonction du mode d'interpolation activé.

Au final, le choix du vecteur d'optimisation des paramètres opératoires ne résulte pas d'un processus simple, d'autant plus qu'il influe de manière non négligeable sur l'état final de la pièce usinée. Il convient alors de déterminer quel paramètre correspond le mieux à l'application visée, en fonction des critères technico-économiques tels que le type d'opération (ébauche, finition), la géométrie de la pièce, le type de parcours d'outil ou le format d'interpolation employé. Pour cela, il est possible de se baser sur des cas type d'étude ou sur le savoir-faire d'un expert.

4.4.2 Application au Formage Incrémental

Le formage incrémental est un procédé qui pourrait grandement bénéficier de l'approche de programmation avancée que nous avons développée. Nous avons en effet montré au chapitre précédent qu'une difficulté majeure des procédés de déformation plastique réside dans le phénomène de retour élastique de la tôle. Les surfaces formées sont ainsi très flexibles et il est très difficile de prévoir la position du point de flexion ainsi que le taux de déformation. La position de la tôle après passage de l'outil n'est donc pas connue de manière précise. A cela s'ajoute le fait qu'une mauvaise gestion des trajets et des efforts de formage peut provoquer une détérioration de la pièce par striction ou déchirure. Il est par conséquent crucial de pouvoir adapter les parcours de l'outil au comportement réel de la tôle lors de la mise en œuvre du procédé.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Une autre difficulté apparaît lors de la mise en œuvre de formage positif. Si les trajectoires ne sont pas adaptées à la tôle et au support, la tôle peut se retrouver coincée entre l'outil et le support, ce qui peut non seulement affecter l'intégrité de la pièce finale mais aussi celle des moyens de fabrication.

Par conséquent, il est donc difficile de générer des trajectoires de formage en ne se basant que sur des modèles CAO, comme en usinage. Les parcours doivent être corrigés après des essais sur MOCN en tenant compte du comportement réel de la tôle. La génération de trajectoires de formage incrémental est donc un processus itératif nécessitant des essais dans chaque boucle d'optimisation. On s'éloigne ainsi de l'objectif de flexibilité et de facilité d'implémentation associés à ce procédé de mise en forme.

On trouve néanmoins dans la bibliographie quelques travaux portant sur la maîtrise et l'adaptation en ligne de trajectoires de formage incrémental. Ainsi, Filice et al [Filice2006] ont proposé une approche intéressante dédiée au formage incrémental négatif. Leurs travaux présentent l'impact de certains paramètres du procédé sur les efforts de formage. L'idée principale est d'utiliser le gradient de la force de l'outil pour surveiller le process. Un modèle de prédiction est ainsi proposé et l'évolution du gradient d'effort constitue l'indicateur de bon déroulement du formage. Cette méthode nécessite néanmoins l'emploi d'un dynamomètre trois composantes associé à un modèle prédictif. On retombe ainsi dans les travers des méthodes actuelles d'optimisation de la programmation des MOCN présentées en début de chapitre.

A l'opposé, la méthode de programmation par trajectoire ICAM peut être employée pour des applications de formage incrémental, de même qu'en usinage. Nous montrerons ici que grâce à son caractère générique, sa mise en œuvre est quasiment identique aux applications d'usinage. Il est donc possible de profiter des avantages associés que nous avons présentés dans les paragraphes précédents.

En ce qui concerne son implémentation, nous avons également fait le choix d'utiliser les efforts sur l'outil comme donnée process estimée au cours de la première phase de la méthode. Ce paramètre permet en effet de s'assurer du bon déroulement du process de formage, étant donné qu'il donne une image du taux de déformation de la tôle formée. De plus, en formage positif, il permet de s'assurer que le flanc n'est pas écrasé entre le support et l'outil, en formage négatif, d'éviter une déchirure sur la tôle.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Nous allons maintenant détailler les deux étapes de mise en œuvre de la méthode ICAM pour des applications de formage incrémental.

4.4.2.1 Estimation des efforts de formage

L'estimation des efforts sur l'outil est réalisée de même manière qu'en usinage. Comme la méthode ICAM se base sur les couples des servomoteurs d'axes et non sur les données de la broche par exemple, il n'y a en effet aucune modification à apporter à la procédure.

Nous avons néanmoins effectué une étude expérimentale, afin de valider cette approche et de conforter ainsi l'aspect générique de la méthode ICAM. Celle-ci s'est divisée en deux types d'expérimentation portant sur du formage négatif.

Une tôle d'aluminium a ainsi été montée sur un porte-pièce dédié au formage négatif, comme indiqué sur la Figure 103. La MOCN utilisée était la VERNE. Les couples dans les servomoteurs ont été acquis à l'aide du DCN tandis que l'outil de formage exerçait une pression progressive sur la tôle.

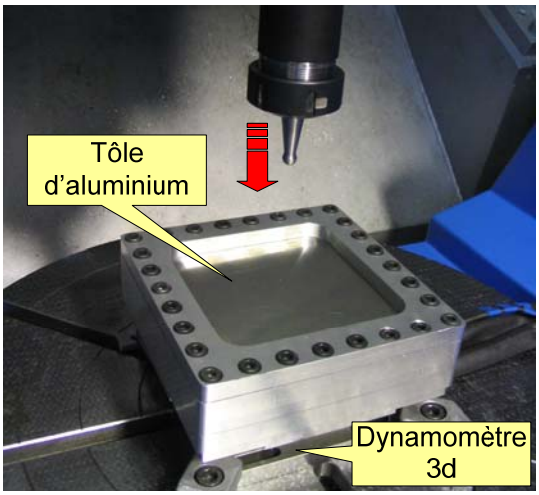


Figure 103 : Dispositif expérimental

Pour le premier essai, l'outil de formage a été animé d'un mouvement de translation selon l'axe z afin de charger progressivement le flanc d'aluminium. Les efforts résultants ont été acquis par le DCN et comparés aux mesures obtenues par un dynamomètre Kistler, réalisées dans le seul objectif de valider notre approche. Les résultats, donnés sur la Figure 104, montrent une très bonne corrélation entre les deux courbes dès que le chargement dépasse 50 N.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

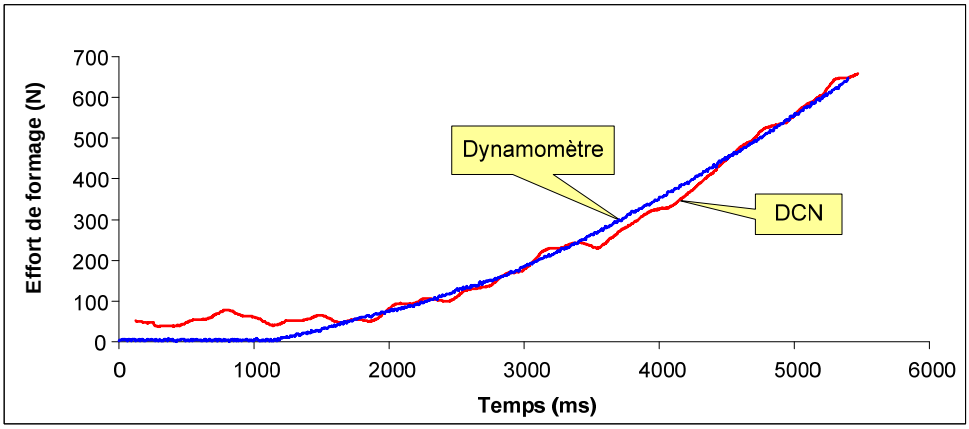


Figure 104 : Comparaison des relevés d'efforts pour l'essai d'indentation

Au cours du second test, une trajectoire circulaire de 100 mm de diamètre et d'une profondeur de 2 mm par rapport à l'altitude initiale de la tôle a été effectuée sur un flanc de 0.6 mm d'épaisseur (Figure 105).

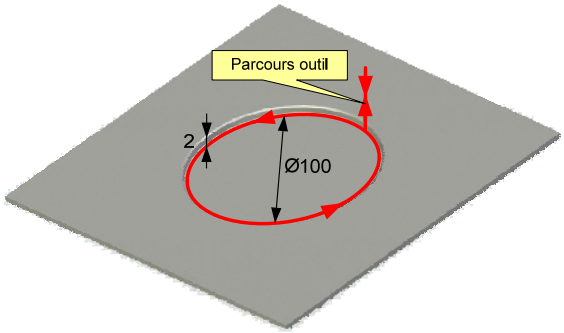


Figure 105 : Trajectoire de formage pour le second test

Les efforts de formage ont été estimés selon chacune des trois étapes proposées par notre méthodologie. De la même manière, la comparaison des résultats obtenus avec les relevés du dynamomètre Kistler, présentée sur la Figure 106, s'est avérée concluante. Pour la majorité du parcours, l'écart entre l'estimation du DCN et le relevé du dynamomètre est inférieur à 15%.

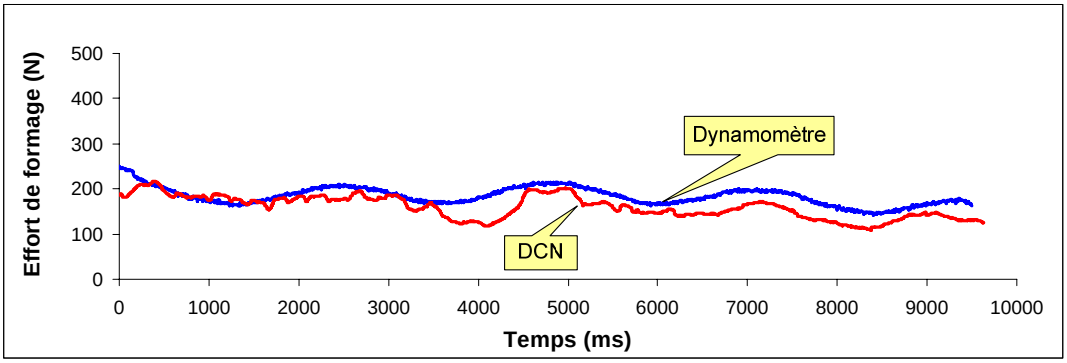


Figure 106 : Relevés d'effort pour l'essai de parcours circulaire

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

L'efficacité de notre approche est donc mise en évidence par ces deux essais. L'estimation des efforts de formage par le DCN est très proche des relevés obtenus à l'aide de moyens de mesure dédiés comme les dynamomètres à trois composantes. En effet, nous rappelons que notre objectif n'est pas de réaliser une surveillance du procédé mais de disposer d'évaluations de l'effort de formage afin d'adapter la programmation de la MOCN en conséquence. Nous présenterons donc dans la suite de cette partie les adaptations possibles de la programmation pour des applications de formage incrémental.

4.4.2.2 Optimisation des trajectoires de formage

La seconde phase de la méthode de programmation avancée ICAM consiste à adapter les trajectoires de l'outil en fonction de l'estimation des efforts de formage issue du premier niveau. Pour le formage incrémental, la principale contrainte est de respecter l'intégrité de la tôle à former en s'assurant que les efforts de formage restent sous leur valeur critique.

En outre, nous avons montré au chapitre précédent que, pour les plages de valeurs communément utilisées, la vitesse de déplacement de l'outil n'influe ni sur les efforts de formage, ni sur la conformité de la pièce produite. Contrairement à l'usinage, la vitesse d'avance ne peut donc pas être un levier d'optimisation valable dans le cadre d'une programmation par trajectoire ICAM.

Par conséquent, les adaptions de trajectoires que nous proposons ici visent à adapter le parcours de l'outil de formage lorsque les efforts dépassent un certain seuil. Contrairement à l'usinage, une modification de la géométrie du trajet a des effets importants sur la mise en œuvre du process. En effet, comme tous les procédés de déformation plastique, l'état final de la pièce ne dépend pas uniquement de la dernière passe d'outil, mais de l'ensemble des parcours nécessaires au passage de la forme initiale à la forme finale. Ainsi, une adaptation de trajectoires de formage incrémental ne peut se résoudre à un retour en position de sécurité de l'outil mais nécessite un suivi complet sur l'ensemble de la pièce.

Nous avons identifié ici deux solutions pour réaliser les adaptations de trajectoires en pratique : modifier la jauge de l'outil de formage ou appeler un sous-programme de retrait de l'outil.

Pour mettre en œuvre la première, nous tirons partie de la possibilité de modifier les jauges outil en cours d'exécution du programme d'usinage (« en temps réel »), qu'offrent les DCN récents. Afin d'être le plus générique possible, nous avons choisi de modifier la jauge de longueur de l'outil plutôt que la jauge de rayon. En

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

procédant de la sorte, l'adaptation de trajectoire est possible sans l'emploi de fonctions de correction de rayon d'outil G41 et G42.

De manière concrète, si l'estimation de l'effort de formage demande une adaptation de la trajectoire, la longueur de l'outil est incrémentée de façon régulière le long du trajet entre deux points de contrôle. La modification de longueur débute au point où un besoin d'adaptation a été détecté ; elle finit au point suivant du programme d'usinage où elle atteint sa valeur totale (Figure 107).

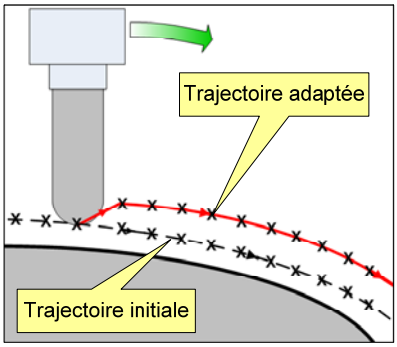


Figure 107 : Adaptation de la trajectoire par modification de la jauge outil

La principale difficulté afférente à la mise en œuvre de cette solution se situe au niveau de sa durée et de ses conséquences sur l'état final de la pièce. La forme de la pièce formée peut être très éloignée de celle qui a été programmée. Cette solution est donc préférentiellement destinée aux applications de formage positif, pour lesquelles un effort de formage trop important est souvent causé par un mauvais positionnement du support. En assurant un contrôle de l'effort de serrage entre la tôle et son support, l'adaptation proposée ici permet notamment d'assurer que la trajectoire de l'outil se conforme à la géométrie de la contre-forme utilisée.

Le second moyen d'adaptation du trajet de l'outil que nous proposons est de faire appel à une sous-routine de dégagement de l'outil. La modification de trajectoire est ainsi locale. Dans le but d'être applicable quelle que soit la forme de la trajectoire, nous avons décidé de dégager l'outil selon son axe. De cette manière, il est possible de limiter la charge de l'outil sur la tôle même pour des trajets cinq axes. Comme nous l'avons indiqué précédemment, il sera pourtant nécessaire de revoir les passes d'outil suivantes.

Dans les faits, la routine de dégagement est appelée par le programme CN de formage dès que l'estimation de l'effort sur l'outil sort de la zone d'acceptation prédéfinie (Figure 108). La valeur du retrait est déterminée avant l'exécution du programme à partir du matériau de la tôle à former et de son épaisseur.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

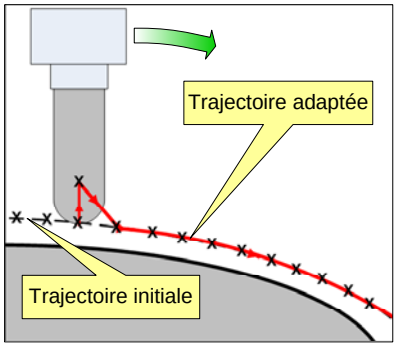


Figure 108 : Adaptation de la trajectoire par appel d'une sous-routine de dégagement

Comme la modification de trajectoire est locale, cette solution est très efficace pour les surcharges locales. Elle convient donc aux applications de formage négatif. A l'inverse, si une adaptation de trajectoire est nécessaire pour un grand nombre de points successifs (dans les cas, par exemple, où la tôle est coincée entre l'outil et le support en formage positif), la sous-routine de dégagement est appelée pour chacun de ces points, ce qui peut affecter non seulement le temps de formage mais aussi l'intégrité de la tôle.

Les deux solutions proposées ici ne sont bien sûr pas les seules viables. Le but de ce paragraphe est simplement de présenter la mise en œuvre de la méthode ICAM pour des applications de formage incrémental. Nous avons ainsi montré la performance de cette nouvelle approche de programmation avancée, en plus de souligner son caractère générique et sa facilité d'adaptation à un procédé de fabrication donné.

4.5 Conclusions

Ce chapitre a traité de la programmation avancée des MOCN. Nous avons dans un premier temps énoncé les principales limitations du mode de programmation actuel, le format ISO 6983 (ou code G). Ce standard développé dans les années soixante et normalisé en 1980 n'a pas bénéficié des évolutions technologiques du secteur informatique. Ainsi, malgré le développement de DCN équipés de calculateurs puissants capables de traiter un grand nombre de données, programmer une trajectoire sur une MOCN consiste toujours à définir la séquence de positions prises par l'outil et les paramètres opératoires théoriques associés, ceci quel que soit le procédé mis en œuvre. Ce type de programmation est insuffisant car il ne tient compte ni du comportement réel de la MOCN ni d'éléments propres au process mis en œuvre.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Dans une deuxième partie, nous avons présenté les principales méthodes existantes pour corriger les défauts associés au format 6983 et permettre une optimisation de la programmation des MOCN. Ces approches peuvent être réparties en deux catégories : les méthodes prédictives, basées sur des modèles de comportement et les méthodes correctives, basées sur des relevés de données process. Toutes les approches proposées nécessitent l'emploi d'équipement externe au DCN, ce qui restreint leur champ d'application. Les modèles de comportement utilisés par les approches prédictives donnent par essence une image approchée du comportement de la MOCN et ne peuvent tenir compte que d'un certain nombre de facteurs influents. Les approches correctives s'appuient principalement sur des données de platines d'acquisition dynamométriques, dont les conditions de fonctionnement sont relativement contraignantes. Au final, si les méthodes d'optimisation de la programmation développées s'avèrent efficaces pour des applications de recherche et développement car elles demandent un certain niveau d'expertise, leur mise en œuvre dans un contexte de production industrielle s'avère difficile.

Nous avons donc proposé dans une troisième partie une nouvelle approche de programmation avancée, appelée méthode ICAM. Son objet est d'adapter les trajectoires d'outil et les paramètres opératoires en temps réel à l'aide d'informations recueillies par le DCN lors de l'exécution du programme. Nous avons ainsi développé une approche corrective permettant de s'appuyer sur des comportements réels et non simulés. De plus, le fait de ne faire appel qu'au DCN et aux capteurs intégrés à la MOCN affirme son caractère générique. Dans la pratique, l'optimisation se déroule en deux phases. La première consiste à estimer les données process, la seconde à adapter la programmation en fonction des résultats de la première. Dans le cadre de nos travaux, nous avons fait le choix de nous appuyer sur les efforts sur l'outil comme donnée du process. Ceux-ci sont estimés à partir des mesures de couples dans les servomoteurs des axes de la MOCN et en considérant la géométrie de sa structure. Ensuite, les modifications de programmation réalisées sont fonction du procédé mis en œuvre et peuvent concerner les trajectoires en elles-mêmes (ajout d'une passe) ou les paramètres associés (vitesse d'avance).

L'efficacité de la méthodologie développée a été validée expérimentalement dans le cadre de deux procédés, l'usinage et le formage incrémental. Cela nous a également permis de montrer son caractère générique. En effet, la démarche employée est restée la même pour les deux procédés. En outre, si les efforts sur l'outil ont été la donnée process estimée pour ces deux procédés de fabrication, il est tout à fait possible de baser les optimisations sur un autre paramètre (température, puissance

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

consommée, ...). Les seules contraintes sont d'une part qu'il fasse partie des données mesurées à chaque cycle par le DCN et d'autre part qu'il soit représentatif de la bonne mise en œuvre du procédé étudié.

Enfin, nous nous sommes appuyés sur le format ISO 6983 pour réaliser les optimisations, ce qui reste assez contraignant. Nous montrerons dans le chapitre suivant que le format de standard de données STEP NC, qui vise en particulier à se substituer à la programmation en code G, est un support très performant à la mise en œuvre d'applications de programmation avancée sur MOCN. En ce sens, il permet encore d'augmenter l'efficacité de la méthodologie développée ici.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Chapitre 5. Evolutions pour la programmation des MOCN

Les axes d'optimisation que nous avons proposés au cours des chapitres précédents visent à tirer un profit maximal des moyens de fabrication actuels. Les approches développées peuvent ainsi être implémentées rapidement dans les ateliers de fabrication mécanique. Néanmoins, les progrès constants du secteur informatique ouvrent de nouveaux horizons et il est très probable que la fonction fabrication des entreprises connaisse d'ici une dizaine d'années une révolution semblable à l'introduction des premières MOCN. Nous tâcherons dans ce chapitre de présenter deux perspectives d'évolution qui permettent d'entrevoir quelle sera la programmation des MOCN du XXIe siècle.

La première piste que nous étudierons traite de l'e-manufacturing. Si Internet est devenu un outil incontournable du secteur industriel avec, par exemple, la mise en réseau des applications de gestion ou le développement de plateformes de travail collaboratif, la notion d'entreprise étendue ne concerne la mise en œuvre des moyens de fabrication que de façon limitée. Les moyens de production sont ainsi tous rassemblés dans un même atelier et les transferts d'information se font par réseau interne dans le meilleur des cas. A l'inverse, l'e-manufacturing bouleverse cette organisation et conduit à un rapprochement virtuel d'acteurs éloignés géographiquement (à l'aide d'interfaces de télécommunication). La manière d'utiliser les MOCN s'en voit ainsi changée, la notion d'Atelier Virtuel prend forme. Afin de mieux comprendre ces mutations, nous avons développé à l'IRCCyN une plateforme de pilotage à distance de MOCN. Ses objectifs et son contenu seront détaillés dans la première partie de ce chapitre.

La seconde évolution que nous présenterons traite de la mise en place d'un nouveau standard de programmation des MOCN, le format Step_NC. Son objectif ambitieux est de remplacer la programmation par code G, omniprésente à l'heure actuelle, en proposant des informations de haut niveau plus adaptées aux

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

problématiques industrielles modernes. Pour cela, les travaux autour de ce format, normalisé sous le label ISO 14649, fédèrent des laboratoires et des industriels internationaux. Nous avons pu dans le cadre de nos travaux collaborer aux travaux du comité de normalisation ISO et proposer une nouvelle programmation des stratégies d'usinage dans le cas de parcours complexes, les trajectoires à motifs. Celles-ci feront l'objet de la seconde partie du chapitre.

5.1 Emergence d'applications orientées e-manufacturing

Dès ses débuts, le réseau Internet a été considéré par les industriels, les scientifiques et les hommes d'affaires comme un puissant outil dédié à l'échange instantané d'informations. Toutes les sphères économiques l'ont rapidement adopté : bourse, finances, conception, ressources humaines, production... Les applications orientées réseau ont connu un essor important au cours des années 2000 et ceci dans tous les secteurs. Les industriels ont ainsi pu introduire la notion d'e-manufacturing.

Si le partage de données entre services via les réseaux intranet est déjà largement utilisé dans les entreprises, avec notamment les logiciels ERP, l'e-manufacturing permet de franchir un cap supplémentaire. En effet, son principe de base est d'intégrer les protocoles Internet aux outils de gestion et de commande des moyens de production. Ces protocoles, standards et bien reconnus, facilitent les échanges entre applications et proposent des interfaces accessibles à tous. Il s'agit donc d'un cadre favorable à la mise en place de projets de travail collaboratif et de contrôle à distance de moyens de production.

5.1.1 Contexte de l'e-manufacturing

5.1.1.1 Précédentes opérations de contrôle à distance et dédiées e-manufacturing

Une idée première du concept d'e-manufacturing est de faire voyager les données au lieu des personnes et du matériel, en s'appuyant sur le réseau Internet. Son champ d'application a été à l'origine principalement restreint aux problématiques de management : récupération de données et suivis de production, développement d'outils de prévision et d'optimisation, synchronisation de la production entre différents sites. L'intégration d'applications de co-conception et de rétro-conception (reverse engineering) a été assez rapide, dans la mesure où la manipulation à distance de maquettes numériques de produits est une opération qui peut aisément être mise en œuvre dans un bureau d'études [Lee2003b].

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Par la suite, avec les avancées en termes de bande passante et de fiabilité, de nombreuses PME ont pu être créées dans ce secteur d'activité. Ces petites structures, souvent constituées d'experts, proposent leurs compétences à des entreprises plus grandes, qui ne souhaitent pas se donner les moyens de conduire des campagnes d'essais ou d'optimiser l'utilisation de leurs moyens de production [Sofotec2001; Sofotec2004]. Dans le même esprit, les logiciels de CFAO sont désormais pourvus de modules de collaboration Internet conçus pour des environnements distribués, permettant ainsi à plusieurs utilisateurs de travailler sur des fichiers uniques et de communiquer par visioconférence [Gunasekaran1999; Kwong2003; Li2004a; Li2004b; Li2004c].

Nous présenterons dans la suite de ce paragraphe quelques applications notables de supervision et de pilotage à distance des moyens de production dans un contexte d'e-manufacturing.

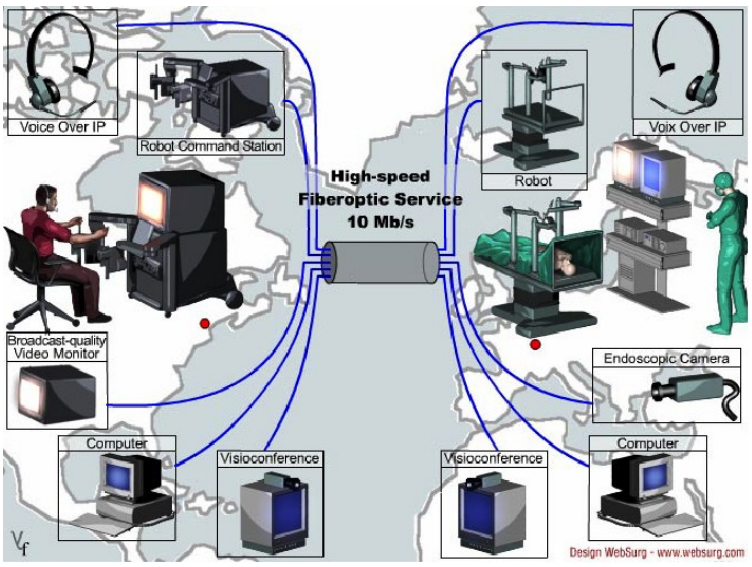


Figure 109 : L'opération Lindbergh [IRCAD2001]

Jusqu'à la fin des années 1990, les applications de contrôle à distance sont restées cantonnées au domaine militaire avec comme exemples notables la manipulation de matériaux radioactifs ou la commande d'engins spatiaux [Le Parc2004]. C'est pour cela que la première opération chirurgicale pilotée à distance marqua un réel tournant tant en médecine qu'en science des réseaux (Figure 109). Elle se déroula dans le cadre du projet « Lindbergh » en septembre 2001 et a consisté en une ablation de la vésicule biliaire [IRCAD2001; Marescaux2002]. L'opération a été effectuée à l'hôpital de Strasbourg (France) par un robot chirurgien, piloté en temps réel par le praticien depuis un immeuble de Manhattan (Etat de New York,

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Etats-Unis d'Amérique). Pour mener à bien ce projet, un réseau transatlantique dédié a été posé afin d'offrir une bande passante (10 Mbits/s) et un temps de réponse (110 ms) suffisants.

Dans le même esprit, le pilotage à distance des moyens de production confère de nombreux avantages en éliminant les temps et coûts de transport des produits. Des experts internationaux peuvent également être à la disposition des entreprises industrielles [Rahman1999].

Au début des années 2000, le point bloquant la mise en œuvre de ce type de projet est la quantité de données transmissibles par le réseau. Les chercheurs ont donc dû trouver des solutions pour pallier les limitations en termes de taux de transfert. Parmi eux, Le Parc et al. [Le Parc2004; Le Parc2005] ont développé une architecture logicielle capable d'une supervision dynamique de la qualité du réseau.

Pour éviter d'être limité par la vitesse de la connexion lors du pilotage à distance d'une machine outil 3 axes, Wang et al. ont trouvé une solution originale : l'utilisateur télécharge sur son ordinateur un environnement Java 3D représentant la machine à piloter. Seules les données des capteurs de position et les commandes sont envoyées vers le poste distant. Le volume des fichiers échangés est ainsi beaucoup plus faible [Wang2004]. Ces travaux ont ensuite été étendus à de la supervision d'usinage et à de la gestion des moyens de production [Hao2005]. Plus récemment, cet environnement a servi de cadre au développement d'une série de modules de conception, analyse, optimisation et contrôle à distance de prototypes de machines outils à structure parallèle [Zhang2006]. Les modèles de transformation géométriques ont ainsi été intégrés à l'environnement Java 3D. L'objectif de cette étude est de définir et d'optimiser la meilleure structure parallèle en fonction des besoins.

Depuis 2004, l'augmentation des performances des connexions au réseau Internet a conduit au déploiement de nouvelles applications de pilotage à distance de MOCN. Celles-ci sont souvent associées à des opérations de maintenance et de supervision des moyens de production.

De ce fait, Kimura et al. [Kimura2005] proposent une manière intéressante d'assurer la maintenance de la production : alerté d'un incident par message sur son téléphone cellulaire, l'expert peut se rendre compte de la gravité de la situation et effectuer un premier niveau de maintenance à l'aide d'une interface de supervision installée sur son poste distant. Calvo et al. [Calvo2006] proposent avec la même visée une architecture de type Serveur d'Application destinée à plusieurs applications basées sur Internet (supervision, gestion des alarmes, maintenance, commandes…). Le

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

but visé est de pouvoir accomplir les actions précitées tout en garantissant un niveau de sécurité compatible avec un contexte de production industrielle.

Enfin, Alvares et al. ont défini une interface de supervision et de contrôle à distance [Alvares2006] qui se rapproche fortement de celle développée dans le cadre de l'Atelier Virtuel que nous présentons plus loin. Elle porte pour l'instant sur des opérations réalisées sur un tour à commande numérique mais les auteurs restent néanmoins assez flous sur la nature exacte des actions de pilotage réalisées.

Au final, l'e-manufacturing est un secteur en plein essor du fait des progrès constants des équipements associés (réseau, matériel multimédia, ...) et des solutions « commerciales » viendront certainement supplanter les maquettes développées dans les laboratoires. A terme, le fonctionnement des entreprises industrielles sera donc modifié [Rahman1999; Lee2003a; Lal2007].

5.1.1.2 Projet IRCCyN : réalisation d'un Atelier Virtuel

Développé dès 2004, le projet de plateforme de contrôle à distance de MOCN s'intègre au concept d'Atelier Virtuel initié à l'IRCCyN avec le développement du simulateur UGV [Hascoet2000]. Dans un Atelier Virtuel, le spectre de la simulation, usuellement confiné à des applications bien spécifiques, est élargi avec notamment la possibilité de retours immédiats vers la conception du produit lui-même. De même, les entités machines-outils, robots, systèmes de transfert, de contrôle, y sont à l'image de l'atelier réel. L'Atelier Virtuel d'Ingénierie de Production correspond alors donc à un clone de l'atelier réel. Le fait de disposer de cet atelier virtuel permet alors de tester et d'élaborer toute la mise en place du développement d'un produit avec toutes les souplesses du virtuel, tout en prenant en compte l'ensemble des limitations et contraintes du site réel. Un véritable outil permettant d'effectuer un développement de produit est alors mis en place : le scénario effectué dans l'Atelier Virtuel peut être conservé pour être mis en application dans sa version finalisée dans l'atelier réel.

Dans ce cadre, le simulateur UGV de l'IRCCyN a pour objet d'optimiser hors-ligne les programmes d'usinage, c'est à dire sans passer par des tests réels sur MOCN. Le projet de contrôle à distance de MOCN en est le complémentaire car il autorise une optimisation par compétences déportées [Hascoet2005]. Il s'agit en effet d'optimiser la programmation de la MOCN en faisant appel, par exemple, à un expert distant. Celui-ci interagit avec les personnes au pied de la machine et fonde son expertise sur les données multimédia qu'il reçoit chez lui « en temps réel » via le réseau Internet (Figure 110).

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

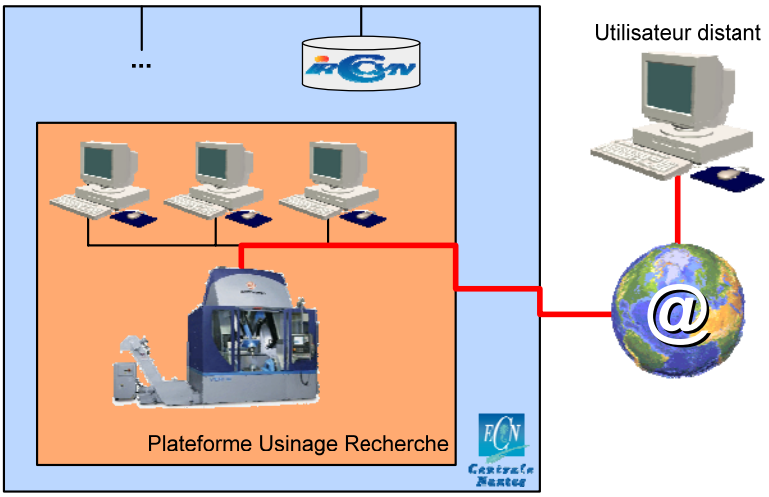


Figure 110 : Principe du projet de contrôle à distance de MOCN

En outre, la MOCN servant de support au projet est la MOCN VERNE, à structure parallèle. Ce type d'architecture n'est pas encore très répandu dans les ateliers de production industrielle. Grâce aux outils installés dans le cadre de cette plateforme, la communication autour de ce nouveau type de MOCN s'en voit facilitée, en plus d'être en accord avec l'esprit de modernité véhiculé.

Enfin, le pilotage à distance d'une MOCN autorise de manière générale le développement d'applications dans les domaines suivants :

- e-marketing : l'interaction en temps réel entre l'utilisateur et la machine permet d'effectuer des démonstrations convaincantes sans transport du matériel ou le déplacement des intéressés.
- e-expertise : en utilisant l'interface multimédia, un expert peut suivre les opérations d'usinage et proposer des optimisations.
- e-maintenance : le concepteur de la machine peut effectuer des opérations de maintenance depuis un site distant.
- e-learning : un utilisateur distant peut se former à l'utilisation de nouvelles fonctionnalités d'un DCN, au contrôle d'un nouveau manipulateur, … Des travaux pratiques via Internet peuvent également être exécutés.

5.1.2 Pilotage à distance de la MOCN VERNE

5.1.2.1 Interface multimédia mise en place

Nous décrirons dans ce paragraphe les principaux équipements déployés dans le cadre du projet de pilotage à distance de MOCN [Hascoet2005; Rauch2005]. Notre

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

choix s'est porté sur du matériel standard, dans le sens où aucun développement interne n'a été souhaité. Il est utile de rappeler que notre objectif n'est pas ici de développer notre propre plateforme, avec ses protocoles dédiés, mais plutôt de montrer l'intérêt des applications qui lui sont associées, en particulier les approches par compétence déportée.

Afin de présenter une interface utilisateur qui soit à la fois ergonomique et rapide à mettre en œuvre, la plateforme doit être composée d'un équipement multimédia capable de transmettre des données visuelles et des données sonores ainsi que les instructions de commande à distance. L'utilisateur distant pourra ainsi bénéficier d'un maximum d'informations sur le déroulement du processus de fabrication.

En pratique, la transmission des données vidéo est assurée par une caméra réseau utilisant le protocole TCP/IP. Connectée directement au réseau, elle offre les performances nécessaires à notre application et permet de répondre aux objectifs fixés. En effet, grâce à un support motorisé, il est possible d'employer la caméra pour disposer d'une vue d'ensemble de la MOCN, pour appréhender son architecture et son fonctionnement, ou alors de se focaliser sur une zone particulière de l'espace de travail, pour observer les détails d'une opération d'usinage par exemple. Deux exemples de points de vue sont donnés sur la Figure 111.

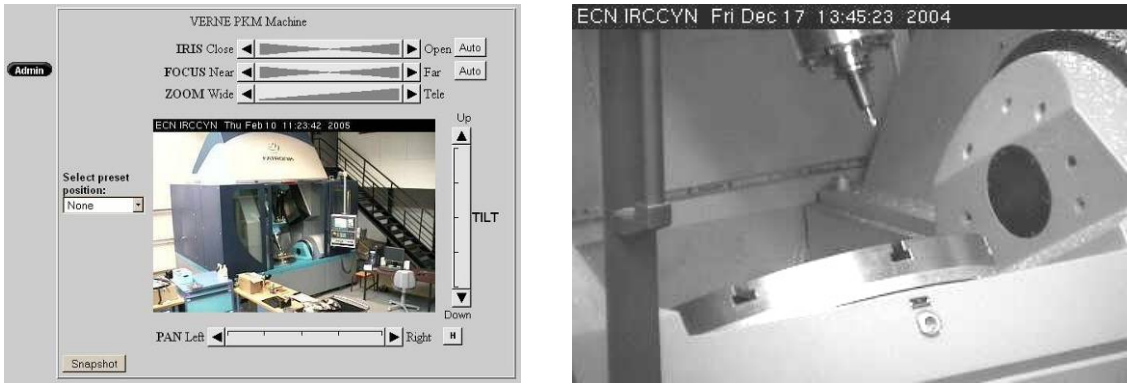


Figure 111 : Interface de commande de la caméra et exemple de capture

De même que les données visuelles, il est important de pouvoir transmettre des données sonores entre l'atelier local et le site distant. D'une part, la transmission de voix facilite la communication entre les différents acteurs et d'autre part, le son produit par la MOCN et l'outil lors de l'exécution d'un programme de fabrication peut révéler de précieuses informations sur le bon déroulement du process. L'analyse des données sonores permet par exemple de détecter la présence de vibrations, l'emploi de vitesses inadaptées ou la présence de passes inutiles de l'outil. Dans le

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

cadre d'une application d'e-expertise, ce type d'information est donc capital. En pratique, nous avons équipé la MOCN VERNE d'un micro d'ambiance placé au plus près de la zone usinée, en plus d'un système de micro-casque destiné à l'opérateur de la MOCN.

En conséquence, les caractéristiques des équipements utilisés rendent la supervision d'opérations d'usinage générique et facile à mettre en œuvre : un ordinateur disposant d'une connexion à haut débit est suffisant.

Pour permettre la prise en main du DCN par l'utilisateur distant, nous avons fait appel au logiciel de télé-diagnostique ReachOut®, développé par Siemens. Son fonctionnement est basé sur un protocole client-serveur, de type VNC. Le logiciel serveur est installé sur le DCN de la MOCN VERNE qui partage ainsi son écran. Le logiciel client est installé sur le poste informatique de l'utilisateur hors site. Comme proposé par la Figure 112, l'interface fournie reproduit exactement la console de commande du DCN, ce qui facilite la prise en main à distance. De plus, toutes les fonctionnalités du DCN sont accessibles sauf la fonction « Départ Cycle » : pour des raisons évidentes de sécurité, il n'est pas possible de démarrer un usinage à distance. A cela s'ajoute le fait que cette partie spécifique de l'interface est soumise à des règles et des protocoles d'accès stricts, afin de garantir la sécurité des données et du matériel.

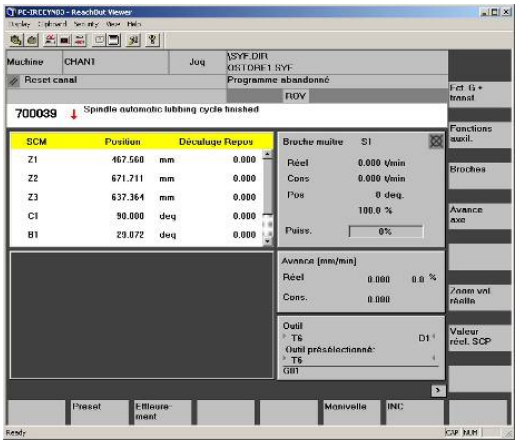


Figure 112 : Interface ReachOut® sur le poste client

La plateforme se compose donc des éléments schématisés sur la Figure 113. L'interface de supervision constituée de la caméra réseau et du système micro-casque est accessible à tout moment depuis n'importe quel ordinateur, moyennant une authentification par mot de passe. Pour des raisons de sécurité, la commande à distance du DCN, assurée par le logiciel ReachOut, demande quant à elle une fenêtre

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

temporelle définie et une identification plus stricte de l'utilisateur distant. Le paragraphe suivant détaillera le contexte d'utilisation de cette interface.

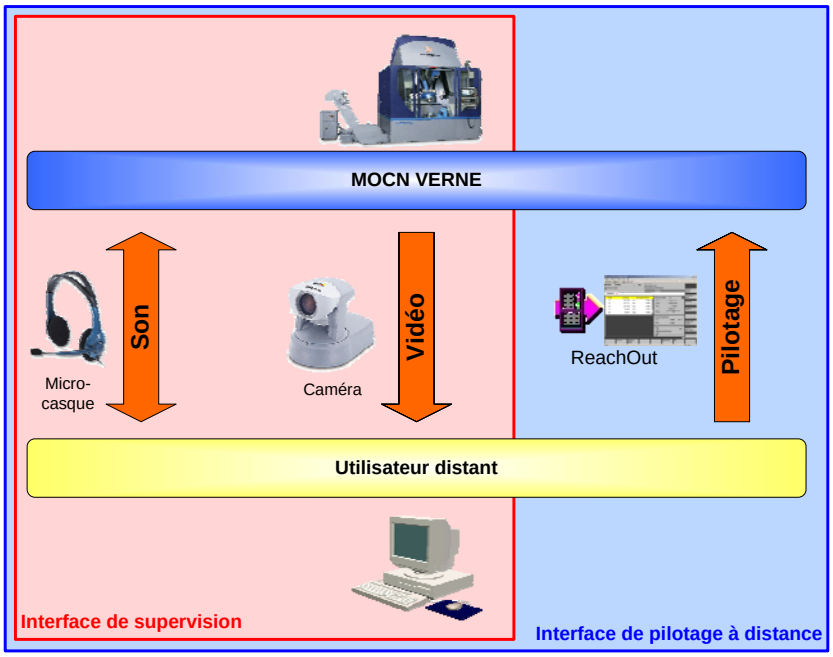


Figure 113 : Interface de pilotage à distance mise en place

5.1.2.2 Scénarii et Réalisations

Plusieurs scenarii-types peuvent être réalisés selon le contexte d'utilisation de la plateforme de pilotage à distance : e-marketing, e-learning ou e-expertise. Tous n'ont pas été testés dans le cadre de nos travaux et nous nous sommes focalisés sur des applications d'e-expertise et d'e-learning. Nous décrirons dans cette partie les principaux types de scénarii inscrits dans ces deux contextes avec selon le cas, la présentation d'une action concrète menée avec un partenaire étranger.

Ainsi, nous avons défini deux scenarii-types liés à l'e-expertise, en fonction de la possibilité offerte à l'utilisateur distant d'apporter des modifications au programme ISO. Pour le premier d'entre eux, l'expert distant se limite à la correction de paramètres opératoires tels que les jauges d'outil, le mode d'interpolation ou certains paramètres cinématiques de la MOCN, comme le Jerk. Les détails de ce scénario sont donnés en s'appuyant sur l'une des deux réalisations notables effectuée à ce sujet et menée en partenariat avec la société Fatronik lors de la 23e Biennale Internationale de la Machine Outil de Bilbao en 2004. Le déroulement de cette action est présenté sur la Figure 114 et peut être décrit de la manière suivante :

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

- Première opération de fraisage exécutée à Nantes en utilisant un programme et des paramètres opératoires définis localement. En s'appuyant sur l'interface multimédia mise en place, les utilisateurs distants supervisent son bon déroulement.
- Prise de contrôle du DCN depuis Bilbao afin de modifier certains paramètres opératoires dont la jauge de longueur d'outil. Le suivi de ces modifications est réalisé par les utilisateurs au pied de la MOCN.
- Usinage d'une seconde pièce en utilisant les nouvelles valeurs des paramètres. Les utilisateurs distants vérifient que les modifications effectuées ont bien été prises en compte par le DCN.
- Contrôle de la pièce à Nantes afin de mesurer l'impact des corrections réalisées.

Cette première opération de contrôle à distance de MOCN nous a permis de valider l'approche d'e-expertise proposée ; ce fut surtout l'occasion de faire découvrir la MOCN VERNE au public visitant la 23e Biennale Internationale de la Machine Outil de Bilbao. Le contexte général fut donc tant de l'e-marketing que de l'e-expertise.

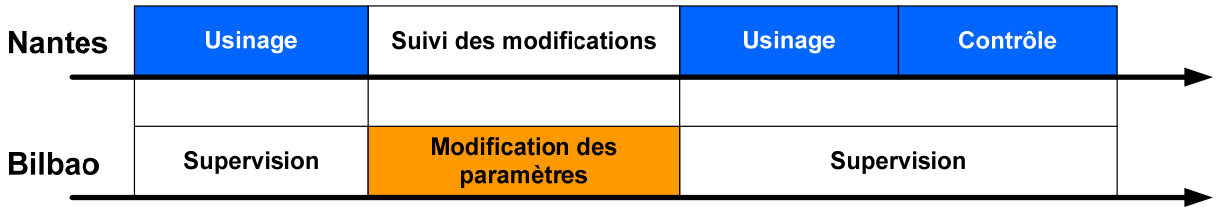
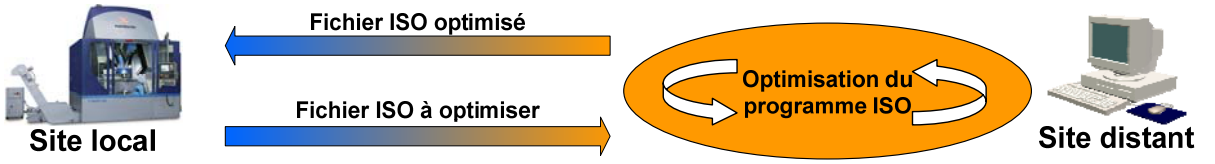


Figure 114 : Scénario utilisé lors de la 23e Biennale de la Machine Outil de Bilbao

Le second scénario type d'e-expertise voit le programme ISO optimisé par l'utilisateur distant, comme indiqué sur la Figure 115. En pratique, le fichier est envoyé à l'expert qui procède aux optimisations en s'appuyant sur ses compétences et sur les outils d'optimisation dont il dispose. Le nouveau fichier ISO est ensuite retourné au site local et l'usinage est effectué sous la supervision de l'expert distant. Celui-ci peut alors s'assurer de la validité des corrections apportées et proposer des améliorations aux utilisateurs de la MOCN. Dans ce cadre, on peut par exemple employer le simulateur UGV développé à l'IRCCyN [Dugas2002] pour valider et corriger en un laps de temps très court le programme de fabrication d'une pièce unitaire à forte valeur ajoutée.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009



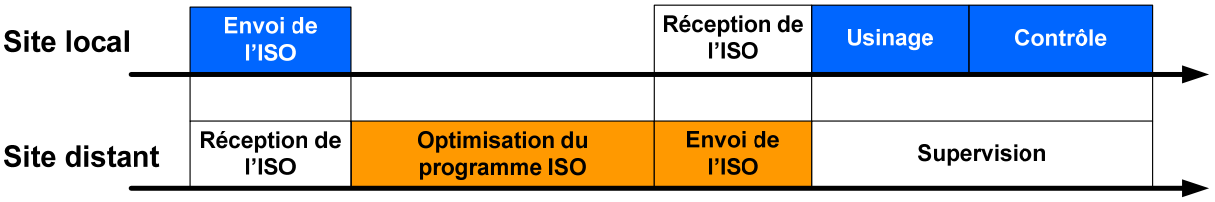


Figure 115 : Scénario type d'e-expertise avec modification du programme ISO

A l'inverse, lors d'une application d'e-learning, l'expertise se situe au pied de la MOCN. En effet, le but d'une telle application est de faire découvrir de manière concrète le fonctionnement des MOCN (à structure parallèle ou non) à des étudiants sans pour autant que ceux-ci se déplacent dans un atelier de production. Cette approche trouve son intérêt lors de premiers contacts avec le milieu industriel ou de démonstrations d'applications spécifiques (usinage cinq axes, machines à structure parallèle, décolletage, …). Elle ne peut en aucun cas se substituer à l'expérience et au vécu acquis lors de travaux pratiques de mise en œuvre sur MOCN.

Dans ce cadre, nous allons nous appuyer sur l'expérimentation menée avec succès en collaboration avec l'Université des Sciences et Techniques de Pohang (Corée du Sud). Elle a consisté en une démonstration d'usinage sur machine à structure parallèle, intégrée à un cours de PhD portant sur l'Usinage Grande Vitesse. Les détails du scénario employé sont donnés sur la Figure 116.

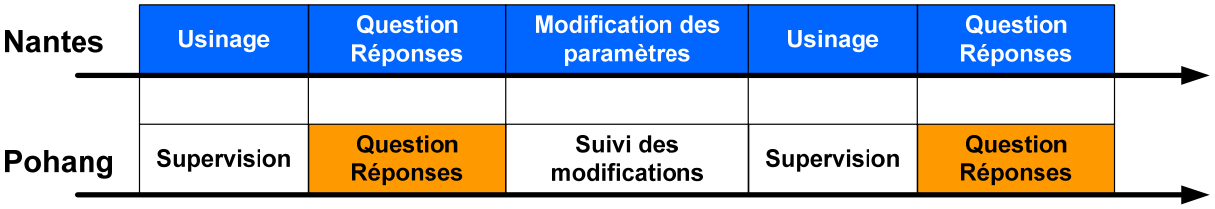


Figure 116 : Scénario utilisé lors de l'échange avec l'Université de Pohang

Parallèlement à cela, d'autres expérimentations ponctuelles de pilotage à distance ont été réalisées, en particulier avec la société Fatronik. Elles consistaient soit en des démonstrations des possibilités de la MOCN VERNE, soit en de l'assistance à distance, en particulier lors des phases de calibration de la machine.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Enfin, d'autres scénarii sont tout à fait envisageables avec l'interface de supervision et de pilotage à distance mise en place. Il convient par contre de se fixer certaines limites. Ainsi, selon notre approche, il n'est pas envisageable pour l'utilisateur distant, expert ou non, de prendre la main sur la MOCN lors d'un usinage. Nous rappelons ainsi que notre objectif n'est pas de développer une « télécommande » de MOCN, mais plutôt d'autoriser des approches par compétence déportée.

5.2 Les apports du format Step_NC pour la programmation des MOCN

La programmation actuelle des MOCN se base sur la norme ISO 6983, aussi appelée programmation code G. Ce standard ne permet plus de répondre efficacement aux besoins industriels ; il constitue également un frein au développement d'applications d'e-manufacturing car il n'autorise qu'une programmation de bas niveau.

Nous présenterons dans cette partie une nouvelle conception de l'architecture de la chaîne numérique proposée par un nouveau standard de programmation, Step_NC. Nous nous focaliserons sur les avancées en termes de programmation puis proposerons une nouvelle approche de programmation avancée de MOCN, rendue possible par l'emploi de ce nouveau format : la génération de trajectoires d'usinage à motifs.

5.2.1 Nouvelle conception de la chaîne numérique

5.2.1.1 Lacunes de l'ISO 6983

Nous avons exposé, au chapitre précédent, les principaux manques du format ISO 6983 pour la programmation des MOCN. Ceux-ci sont dus au fait que les informations transmises par ce standard sont de bas niveau : seules de simples instructions de position associées à des fonctions préparatoires (fonctions G), de commandes de vitesse (fonctions F et S) et des fonctions auxiliaires (fonctions M).

L'inconvénient majeur du code G est la nécessité d'employer un post-processeur pour générer les programmes. En effet, il s'agit d'un élément indispensable de la chaîne numérique (Figure 117). Son rôle est de traduire les fichiers APT issus des logiciels de CFAO en fichiers ISO 6983 dédiés à la MOCN utilisée. Chaque

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

combinaison DCN-architecture de machine outil fait donc appel à un post-processeur dédié, ce qui entraîne un surcoût lors de l'acquisition d'un nouvelle MOCN. De plus, en constituant un maillon supplémentaire de la chaîne numérique, les possibilités de pertes d'information et de génération d'erreurs par approximation des trajectoires d'outil sont augmentées, en particulier pour l'usinage de formes complexes. Enfin, l'opération de post-processing rompt la cohérence de la chaîne numérique : il n'est pas possible de répercuter au fichier CFAO les ajustements effectués sur le programme d'usinage au pied de la machine. Le flot d'information est unidirectionnel et ne va que de la CFAO vers la MOCN.

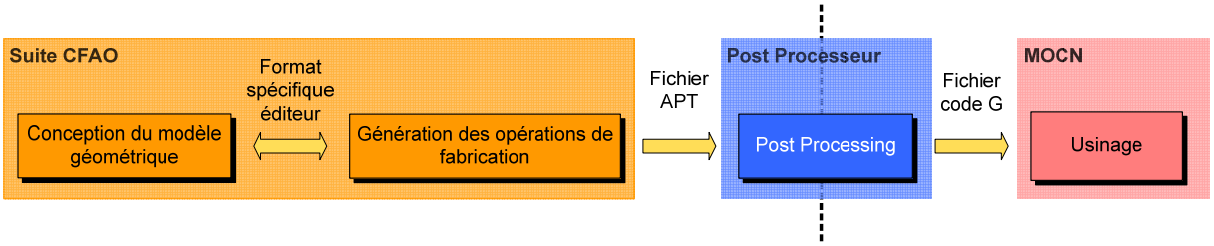


Figure 117 : Architecture de la chaîne numérique actuelle

De nombreux progrès ont ainsi été effectués à chaque extrémité de la chaîne numérique, avec d'une part le développement de suites de CFAO capables de véhiculer des informations de haut niveau et d'apporter une cohérence entre CAO et FAO, et d'autre part de DCN capables de traiter un grand nombre de données simultanées. A cause de la présence du post-processeur, celle-ci reste encore très peu flexible et ne permet pas de tirer profit des avancées observées. En fabrication mécanique, la communication entre le domaine CFAO et le domaine CN reste limitée et à sens unique.

5.2.1.2 Apports généraux du format Step_NC

Basé sur une interface STEP, le standard ISO 14649, plus connu sous le nom Step_NC, a été spécialement conçu pour améliorer la communication entre les systèmes CFAO et les DCN, allant même jusqu'à les faire utiliser des bases de données communes [Newman2003]. En permettant de tirer un meilleur profit des fonctionnalités des DCN modernes et en simplifiant la programmation par une description orienté objet [Maeder2002], il constitue une solution viable pour s'affranchir des défauts associés au format ISO 6983 [Suh2002], tels que ceux évoqués dans le paragraphe précédent.

La Figure 118 propose l'organisation générale de la norme ISO14649, relative au format Step_NC. La compatibilité avec la norme Step ISO 10303 est également

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

explicitée, dans la mesure où des éléments en sont directement issus. A l'heure actuelle, les développements du standard Step_NC s'attachent à trois procédés de fabrication par commande numérique, le fraisage [ISO_14649-11], le tournage [ISO_14649-12] et l'électroérosion (il n'existe pas encore de partie de la norme relative à ce procédé mais les travaux menés ont déjà fait l'objet de publications [Richard2004; Sokolov2006]).

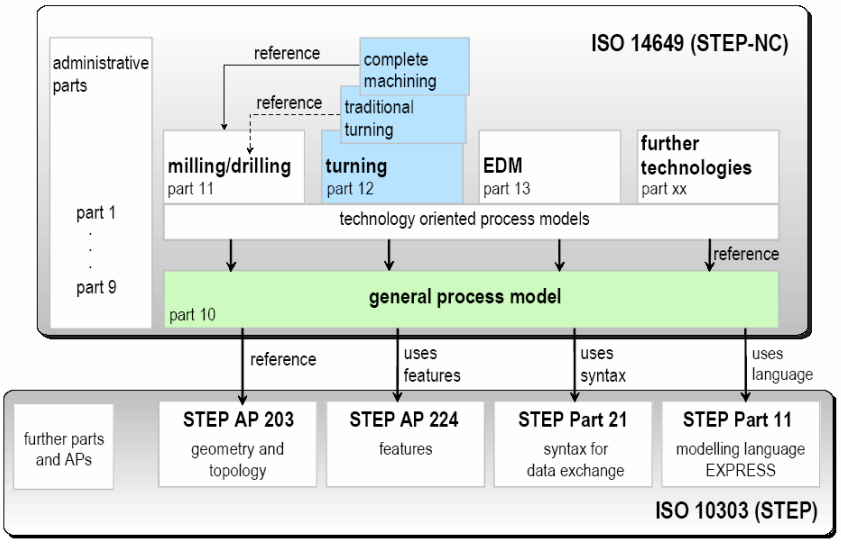


Figure 118 : Organisation de la norme ISO 14649 et relations avec l'ISO 10303

Par conséquent, la réorganisation de la chaîne numérique ne se limite pas à la seule programmation des MOCN mais s'étend à l'ensemble de ses maillons. Le même fichier informatique est ainsi utilisé depuis la CAO jusqu'à la fabrication de la pièce. D'un point de vue formel, la norme Step, référencée sous le nom ISO 10303, est mise en œuvre à l'aide de plusieurs protocoles d'application portant chacun sur un domaine spécifique. Ainsi, le fichier initial, contenant la géométrie du produit, est enrichi au fur et à mesure d'informations relatives à ces différents protocoles d'application. Les données propres à chaque protocole d'application sont obtenues à partir des modèles de référence de chaque application, par exemple le protocole d'application 238 s'appuie sur la norme ISO 14649 (Step_NC).

La Figure 119 présente les principaux protocoles mis en œuvre dans le cadre de la production mécanique : la maquette numérique initiale au format STEP est enrichie de l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation complète du produit (simulations diverses, données FAO, planification, ...), si bien qu'aucune conversion n'est nécessaire. Il n'y a donc ni perte d'information, ni erreur de traduction lors du passage d'un maillon à l'autre de la chaîne numérique [Xu2004]. A cela s'ajoute le fait

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

que les parcours de l'outil s'appuyant directement sur le modèle CAO, les modifications de celui-ci se répercutent directement au programme d'usinage.

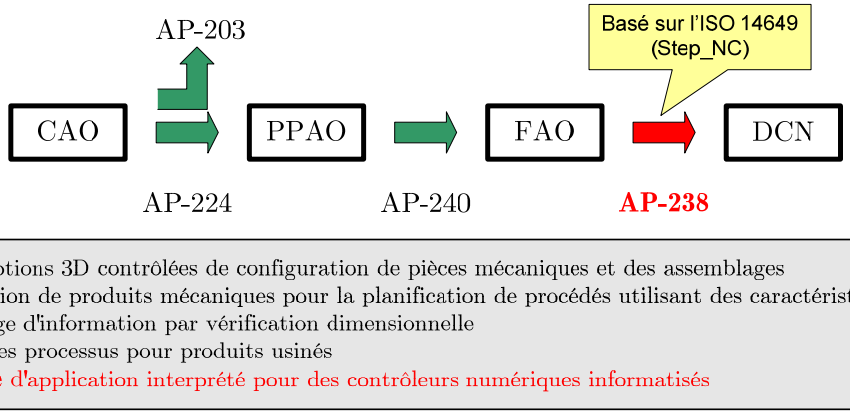


Figure 119 : Exemples de protocoles d'applications de la norme Step

De la même manière, les modifications faites au pied de la MOCN sont sauvegardées et répercutées automatiquement au modèle CAO [Suh2002] ; le flux d'information est bidirectionnel, comme le montre la Figure 120 qui compare la gestion des information pour le format actuel, l'ISO 6983, et pour le format Step_NC, l'ISO 14649.

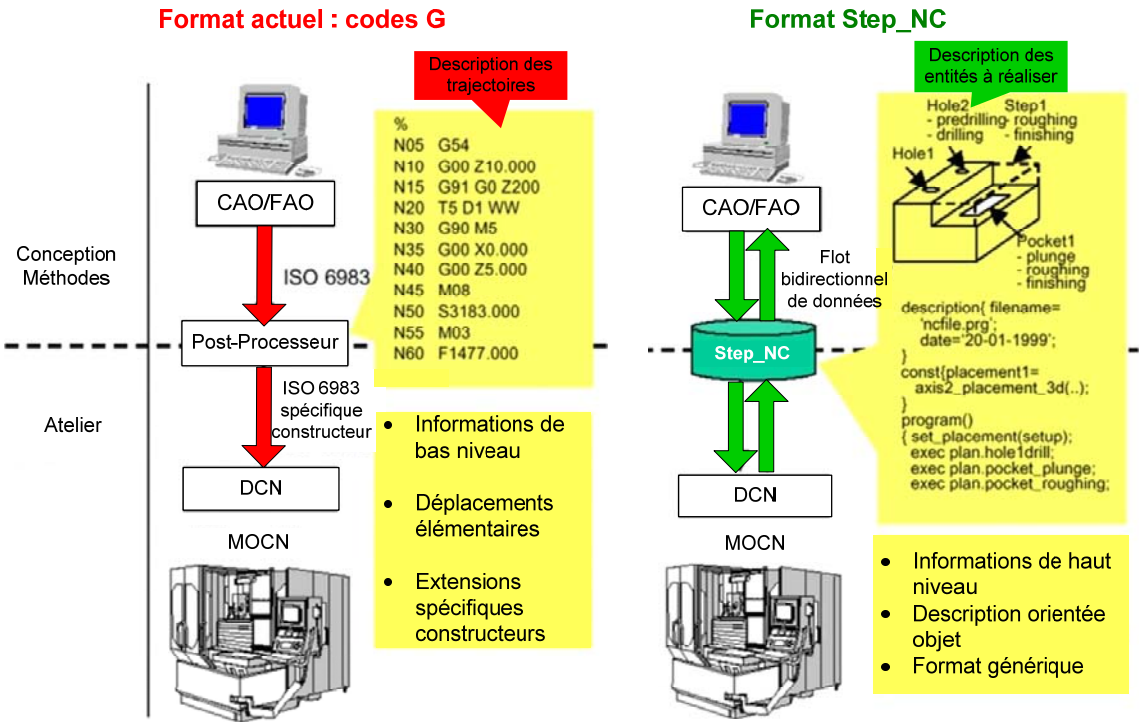


Figure 120 : Comparaison de l'ISO 6983 et de l'ISO 14649 [ESPRIT2000]

Une caractéristique importante du format Step_NC est qu'il n'y a pas besoin d'opération de post-processing : le même fichier peut être utilisé sur plusieurs MOCN

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

différentes. En effet, il est possible de transmettre des informations de haut niveau [Kramer2006; Stroud2006] car ce format décrit les entités d'usinage (« quoi faire ») plutôt que la manière de les réaliser (« comment faire »), comme le fait le format ISO 6983 en explicitant les positions successives de l'outil.

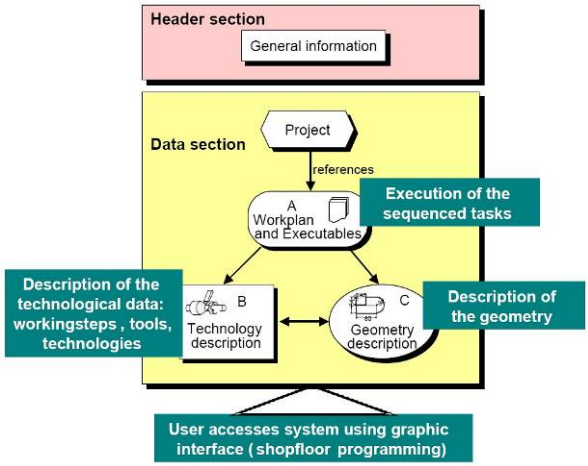


Figure 121 : Structure d'un fichier Step_NC [ESPRIT2000]

Du fait de la programmation orientée objet, l'organisation d'un fichier Step_NC est divisée selon plusieurs sections, comme décrit dans la norme Step ISO 10303. Le détail de chaque section est indiqué par la Figure 121. Les fichiers Step_NC s'écrivent sous un format texte, tout comme les fichiers d'échanges STEP. Néanmoins, afin de préciser de manière plus fine l'organisation de ce type de fichier, la Figure 122 donne un exemple de représentation de fichier ISO 14649 en langage express-G [Suh2002; Suh2003; Xu2004].

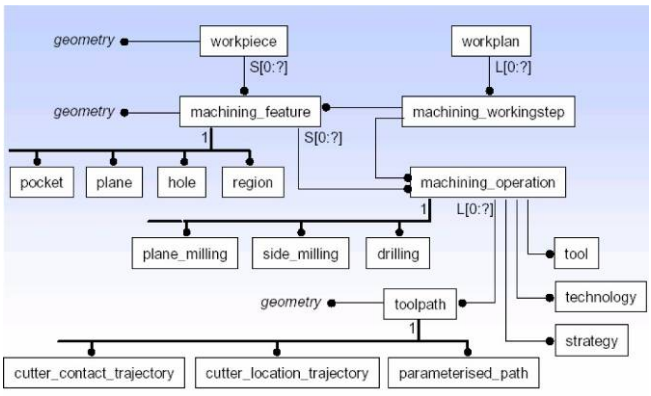


Figure 122 : Organisation d'un fichier Step_NC en express-G

La synthèse des nombreux avantages associés à l'utilisation de l'ISO 14649 pour la programmation des DCN a été effectuée par Suh [Suh2002] et Xu [Xu2006]. Parmi eux, nous pouvons souligner les points suivants :

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

- *Trajectoires exemptes d'interférences* : les parcours d'outil sont générés par le DCN lui-même, en tenant compte des indications du fichier Step_NC et des caractéristiques des moyens utilisés, comme par exemple la position des brides.
- *Disponibilité des outils* : de la même manière, l'outil de coupe est choisi par le DCN parmi les outils du magasin de la machine, au moment de la génération du parcours. La gestion des outils de coupe s'en voit donc facilitée et améliorée. De plus, si la MOCN est équipée de détecteurs de bris d'outil, le DCN est capable de choisir un autre outil et non seulement d'adapter les parcours en conséquence mais aussi de réorganiser la gamme de fabrication s'il juge que cela est nécessaire. La fiabilité du process s'en voit augmentée.
- *Planification non linéaire du process* : le fichier Step_NC ne contient que les différentes opérations de fabrication (« machining workingsteps ») ainsi que leurs relations d'antériorité éventuelles. Le DCN est libre de les organiser dans la gamme de fabrication en fonction des différentes contraintes. Cela permet d'adapter au mieux le process aux moyens d'usinage employés.
- *Mesures sur MOCN* : les tolérances géométriques associées à chaque entité sont incluses dans le fichier Step_NC. Si la MOCN est dotée d'un système de mesure adéquat, il est possible d'apporter des corrections entre deux opérations d'usinage voire même d'insérer de nouvelles opérations.

Dans le domaine de la programmation des MOCN, l'utilisation du format Step_NC présente également des avantages notables. Ceux-ci seront détaillés dans une partie spécifique de ce chapitre, traitant de la programmation avancée de MOCN sous standard Step_NC.

Nous avons, dans ce paragraphe, présenté les avancées principales initiées par le format Step_NC. L'ambition de ce projet est de faire entrer la programmation des MOCN de plain pied dans le XXI^{e} siècle et les défis à relever sont importants. A l'heure actuelle tout n'est pas encore opérationnel, mais plusieurs projets internationaux fédèrent des partenaires universitaires et industriels.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

5.2.1.3 Projets de recherche initiés et développements actuels

Initié à la fin des années 1990, le projet Step_NC a rassemblé de nombreux acteurs internationaux, privés et publics. Nous avons montré au paragraphe précédent que les objectifs associés sont ambitieux et leur réalisation nécessite non seulement un important travail de développement, mais aussi la mise en place d'actions de communication visant à aider au développement de ce nouveau standard. Dans [Xu2005], Xu et al. font un état des lieux des différents projets et travaux relatifs au format Step_NC. Nous en donnerons un bref aperçu dans ce paragraphe avant de détailler de manière plus précise les développements réalisés au laboratoire POSTECH de Corée du Sud. Ceux-ci ont en effet servi de point d'ancrage à nos travaux sur le standard Step_NC.

Le projet IMS (Intelligent Manufacturing Project) [Maeder2002] a été approuvé en 2001 et fédère un ensemble d'actions de recherche menées en Europe, aux Etats-Unis et en Corée. Son but est d'initier et de coordonner des sous-projets de recherche autour du format Step_NC de portée plus restreinte. Nous pouvons citer parmi eux :

- le projet européen Esprit Step_NC, dont l'objet a été de développer un prototype pour le fraisage dans un premier temps. Dans un second temps, l'accent a été mis sur les mécanismes de retour d'information dédiés à de la surveillance d'usinage.
- le projet américain Super Model, qui a consisté en la création de bases de données pour les informations de fabrication. Une interface XML permet de relier trajectoires, outils, géométrie à usiner et phases d'usinage.
- Le projet américain SMS (Step Manufacturing Suite), dédié à des applications commerciales et militaires.
- Le projet américano-britannique RAMP (Rapid Acquisition of Manufactured Parts) qui a abouti au standard Step ISO 10303-224, qui contient toutes les spécifications requises pour la fabrication d'un produit (entités, matériau, tolérancement,…).

D'autres travaux et projets ont été initiés en dehors du cadre d'IMS. Nous avons regroupé dans le Tableau 13 les principaux acteurs actuels ainsi que leurs thématiques de recherche.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Pays	Structure	Thématiques étudiées
Allemagne	ISW (Stuttgart)	Tournage – retours d'information DCN vers FAO
	WZL (Aachen)	DCN compatible Step_NC
Confédération Helvétique	EPFL (Lausanne)	Modèles Step_NC pour l'électroérosion
	EIG,HES-SO (Génève)	
Royaume-Uni	AMST (Loughborough)	Modèles de données pour Step_NC
Etats-Unis	NIST	DCN compatibles Step_NC Interprétation des fichiers Step_NC
	STEP Tools Inc.	Génération de fichiers Step_NC
Nouvelle Zélande	Université d'Auckland	Travail collaboratif sous Step_NC Usinage sans codes G
Corée du Sud	POSTECH (Pohang)	Système Step_NC complet Programmation Atelier
France	IRCCyN (Nantes)	Simulation – Plateforme expérimentale Génération de trajectoires Prototypage rapide

Tableau 13 : Principaux acteurs travaillant sur le standard Step_NC

Parmi tous les prototypes réalisés, la plateforme développée par l'équipe du Pr. Suh au laboratoire POSTECH est celle qui présente l'intégration la plus complète et la plus fonctionnelle du format Step_NC pour la programmation des MOCN. Pour ce faire, elle se divise en plusieurs modules chargés chacun d'une tâche bien définie :

- **PosSFP** (Shop Floor Programming) génère des fichiers ISO 14649 à partir de modèle CAO codés en Parasolid ou lit un fichier ISO 14649 pour en modifier les paramètres (par exemple, la stratégie d'usinage associée à une entité). Ce module ayant servi de support à nos développements, nous en détaillerons le fonctionnement dans la dernière partie de ce chapitre.
- **PosTPG** (Tool Path Generator) génère les parcours de l'outil en fonction de la stratégie d'usinage indiquée dans le fichier ISO 14649.
- **PosTPV** (Tool Path Viewer) affiche les trajectoires construites par PosTPG.
- **PosMMI** (Man Machine Interface) constitue l'interface homme-machine de la plateforme de démonstration.
- **PosCNC** (Computer Numerical Control) commande l'automate de la MOCN 3 axes utilisée par la plateforme.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Les liens entre chaque module du prototype sont effectués à l'aide d'une base de données commune CORBA [Suh2003]. Un unique fichier Step_NC est ainsi utilisé et les transferts d'information entre chaque module sont bidirectionnels. La Figure 123 propose le déroulement d'un scénario type de fabrication d'une pièce en utilisant la plateforme de POSTECH.

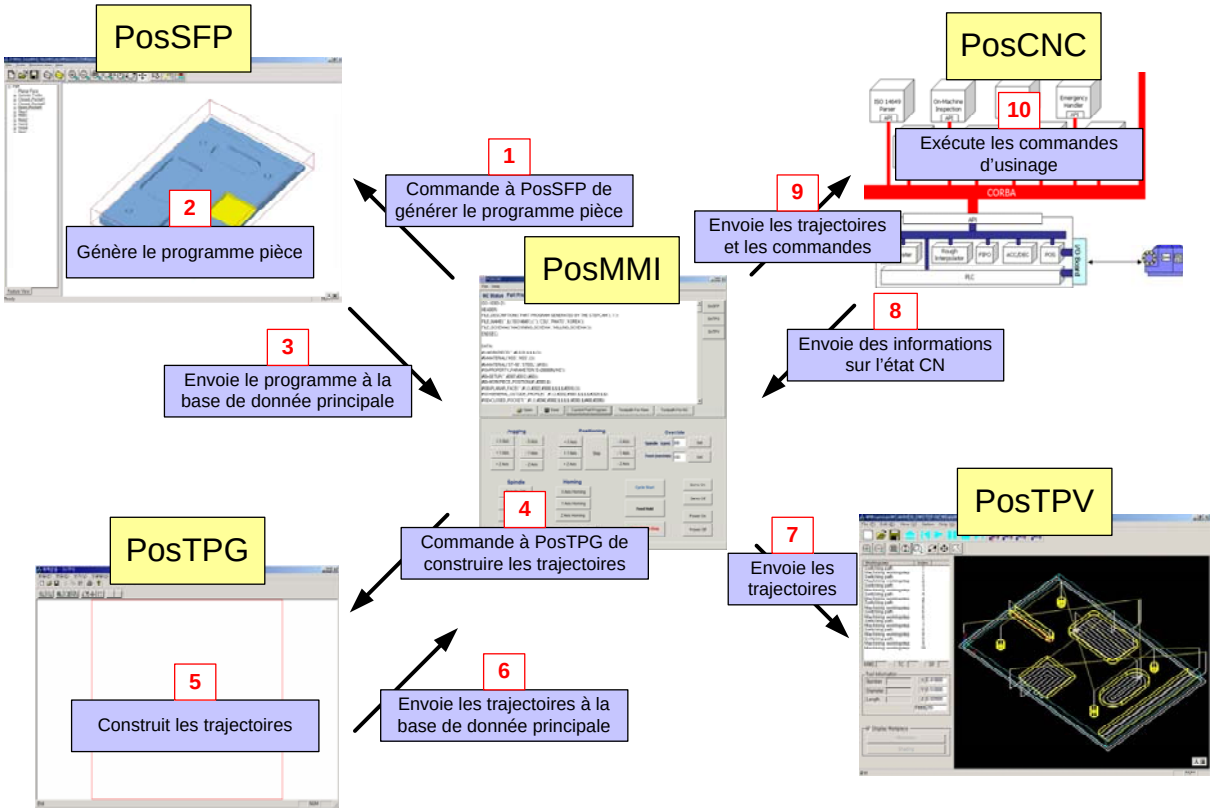


Figure 123 : Scénario type d'utilisation de la plateforme de POSTECH [POSTECH2003]

Au final, le format Step_NC bénéficie d'un élan international. Les nombreux projets mis en place réunissent des acteurs majeurs de la recherche en fabrication, qu'ils soient industriels ou universitaires. Si bien qu'à l'heure actuelle, deux comités différents travaillent en parallèle à la normalisation du format Step_NC. Le groupe ISO TC 184/SC1 travaille sur la norme ISO 14649 proprement dit, c'est le modèle ARM (Application Reference Model) ; le groupe ISO TC184/SC4 s'intéresse au format STEP-AP238, qui est un protocole d'application de la norme STEP, un AIM (Application Interpreted Model) [Feeney2003]. Une comparaison entre ces deux protocoles est faite dans le Tableau 14.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

	ISO 14649 (ARM)	**ISO 10303-238 (AIM)**
Volume de stockage moyen	10 fois moins que l'AIM	10 fois plus que l'AIM
Programmation	Facile	Complexe
Relecture par l'homme	Difficile	Quasi impossible
Compatible STEP	En partie	Totalement
Informations CAO	Abandonnées	Conservées

Tableau 14 : Comparaison des modèles d'application de Step_NC [Xu2005]

En pratique, ces deux modèles de représentation ne se destinent pas aux mêmes applications et évoluent en parallèle. L'ISO 14649 ne concerne que les données de fabrication, de la FAO au DCN. Il s'agit d'un modèle de représentation. Il n'intègre pas les autres types de données au format STEP. L'ISO 10303-238 est le protocole d'application qui intègre les spécifications de la norme ISO 14649 au standard STEP, ce qui permet de disposer d'un environnement cohérent depuis le modèle CAO jusqu'à la réalisation sur MOCN. Toutes les informations sont intégrées au format STEP [StepTools2007].

L'équipe MO2P de l'IRCCyN a été sollicitée pour collaborer aux travaux du comité ISO TC184/SC4 sur la norme ISO10303-238. Les compétences recherchées concernent principalement le développement de modèle pour les procédés de fabrication par ajout de matière, la simulation technologique de l'usinage mais aussi la programmation avancée de MOCN. Cette dernière thématique fera l'objet de la suite de ce chapitre.

5.2.2 Apports liés à la programmation des MOCN

Nous détaillerons dans cette partie les principaux avantages associés à l'emploi du format Step_NC pour la programmation avancée de MOCN. L'accent sera également mis sur les perspectives offertes concernant la mise en œuvre de la méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) en se basant sur ce format de description.

5.2.2.1 Vers la Programmation avancée de MOCN

Une avancée significative associée au format Step_NC réside dans les possibilités de programmation avancée [Suh2002]. Dans le cadre de nos travaux, nous avons identifié quatre niveaux successifs aboutissant à une programmation optimisée des MOCN en intégrant progressivement de l'intelligence dans le programme de fabrication CN [Hascoet2006a].

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Afin d'éclairer au mieux notre propos, nous détaillerons chaque étape en nous appuyant sur le cas d'études suivant : l'usinage en bout d'une pièce flexible, pour lequel il y a toujours un écart entre les positions réelles et théoriques de la surface à usiner (Figure 124).

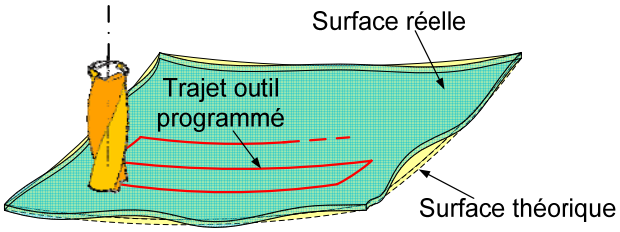


Figure 124 : Cas d'étude d'usinage d'une pièce flexible

Les trajectoires générées à l'aide d'un logiciel de FAO ne sont donc pas adaptées à la surface réelle. Il faut réaliser des adaptations au pied de la machine en fonction du montage d'usinage. Ces modifications sont spécifiques. Ce qui signifie que si plusieurs pièces sont à usiner, il est nécessaire d'adapter le programme pour chacune d'entre-elles sans pouvoir tirer facilement profit des adaptations faites pour les pièces précédentes. Dans un contexte de production industrielle, cette situation entraîne des surcoûts importants qui nuisent à la productivité associée à cette opération de fabrication. Nous détaillerons donc les quatre niveaux de programmation avancée pour remédier à cette situation en agissant sur la programmation de la MOCN employée.

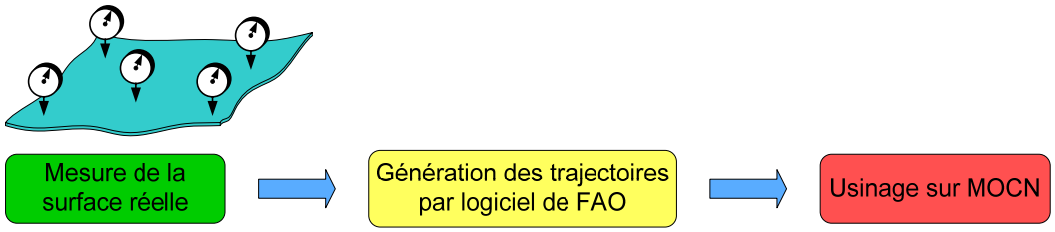


Figure 125 : Programmation avancée de niveau 1, approche conventionnelle

Le premier niveau est constitué de l'approche conventionnelle : la géométrie exacte de la surface réelle est mesurée avant de générer les trajectoires à l'aide du logiciel de FAO (Figure 125). Cette solution s'accompagne d'un inconvénient majeur : comme l'étape de génération de trajectoires est située entre la mesure de la pièce réelle et son usinage, chaque pièce nécessite un programme d'usinage dédié. De plus, le temps d'immobilisation de la pièce dans son montage d'usinage s'en voit fortement augmenté ce qui nuit à la productivité. Il est donc évident que ce type de situation est à proscrire pour la fabrication de plusieurs pièces dans un contexte industriel.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

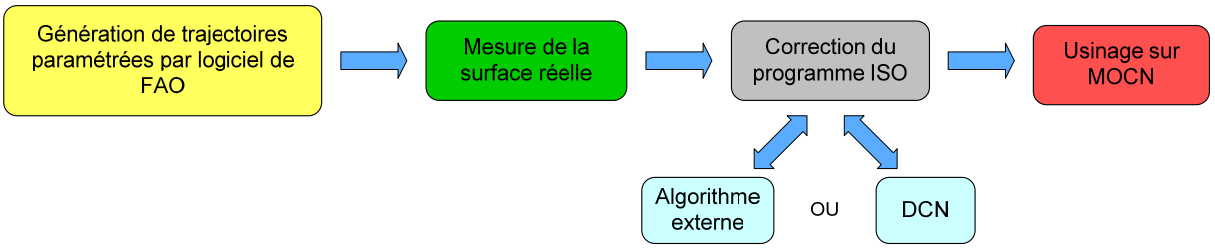


Figure 126 : Programmation avancée de niveau 2

Le second niveau fait appel à un programme ISO 6983 paramétré. Les trajets d'outil sont définis comme des fonctions dont les variables sont ajustées après mesure de la surface (Figure 126). Ce type d'approche permet d'apporter les corrections directement dans le programme d'usinage à l'aide d'un algorithme externe [Suh1996; Seo1998] ou directement à l'intérieur du DCN, comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent [Hascoet2006c]. La Figure 127 rappelle les principes de ces deux approches, ainsi que la progression en termes de programmation avancée.

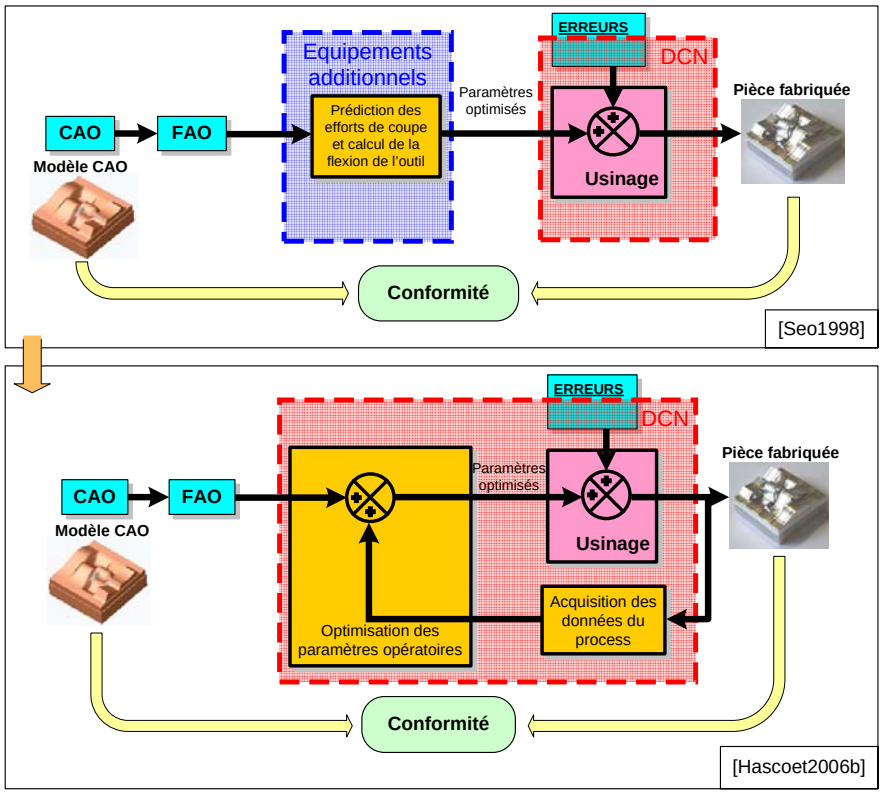


Figure 127 : Approches de programmation avancée de niveau 2

Par conséquent, le même programme d'usinage peut servir à fabriquer toutes les pièces du lot. Malheureusement, cette méthodologie est assez difficile à mettre en œuvre. La génération de programmes ISO 6983 paramétrés fait en effet appel à des fonctions spécifiques développées par les constructeurs de DCN. Le programme d'usinage sera donc spécifique à un seul type de MOCN. De plus, pour pouvoir

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

adapter de façon efficace la trajectoire à la surface réelle, il est nécessaire de discrétiser le parcours, ce qui peut pénaliser le comportement cinématique de la MOCN.

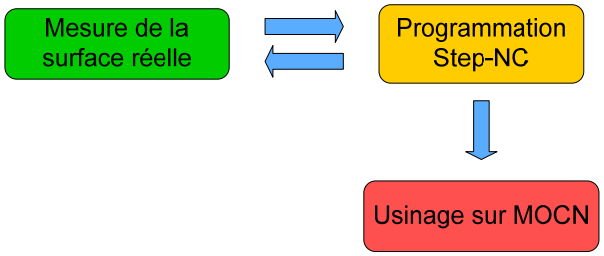


Figure 128 : Programmation avancée de niveau 3

Le troisième niveau voit l'introduction du standard Step_NC. Les résultats de mesures sont pris en compte juste avant l'exécution du programme (Figure 128). En effet, selon le protocole Step_NC, la définition explicite du trajet de l'outil est établie par le DCN en fonction de la stratégie d'usinage globale donnée par le fichier Step_NC, des moyens de fabrication disponibles (outils et capacités de la MOCN) ainsi que les caractéristiques des entités à usiner (géométrie, position, nature du brut ...). D'une façon générale, le recours à ce standard de données est tout à fait dans l'esprit d'évolution de la programmation véhiculé par les développements effectués au sein de l'équipe MO2P de l'IRCCyN de 1998 à 2007.

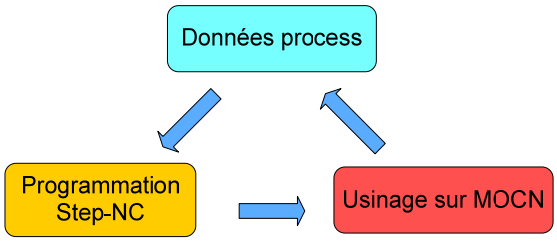


Figure 129 : Programmation avancée de niveau 4

Enfin, le quatrième niveau consiste en la mise œuvre d'une programmation avancée de MOCN avec Step_NC (Figure 129). Les données nécessaires à l'optimisation du programme (efforts sur l'outil, puissance consommée, ...) sont acquises en temps réel, il n'est pas nécessaire de mesurer la pièce avant d'usiner car l'adaptation du trajet est effectuée en ligne pendant le process (enlèvement de matière en usinage, ...).

Cette intégration progressive de fonctionnalités de programmation avancée correspond tout à fait à l'esprit véhiculé par le standard Step_NC [Suh2003; Hascoet2007] : elle doit se faire par étapes pour des raisons de performances (être

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

efficace même si tous les modules ne sont pas développés) et de « pédagogie » (ne pas tout changer du jour au lendemain).

5.2.2.2 Implantation de la méthode ICAM

Nous avons proposé au chapitre précédent une nouvelle méthode programmation avancée des MOCN, l'approche par trajectoires ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing). Pour pouvoir être mise en œuvre dans un contexte industriel et pour asseoir son caractère générique, il a fallu la déployer à l'aide de programmes en code G.

Nous avons montré que ce standard (codes G) ne constitue pas la réponse optimale aux problématiques actuelles d'Usinage à Grande Vitesse. Il en est de même pour la mise en œuvre de la méthode ICAM, pour laquelle les programmes ISO 6983 doivent être modifiés. Il faut en effet ajouter au programme d'usinage initial les instructions de commandes et les sous-programmes, destinés à récupérer les données process et à effectuer les adaptations éventuelles. Ainsi, la Figure 130 propose le synoptique de mise en œuvre de l'approche ICAM à l'aide du format ISO 6983 (codes G) ; elle montre notamment que la chaîne numérique se voit ainsi dotée d'un nouveau maillon, qui ne peut être intégré au DCN. De plus, la génération des sous-programmes ICAM est une opération complexe qui doit s'adapter à la programmation et au comportement de la MOCN employée : les routines développées sont donc dédiées à une seule et unique configuration machine outil/DCN. A cela s'ajoute le fait que l'optimisation des paramètres opératoires choisie dépend aussi de l'opération de fabrication concernée (type de pièce, ébauche ou finition, matériau du brut, …etc).

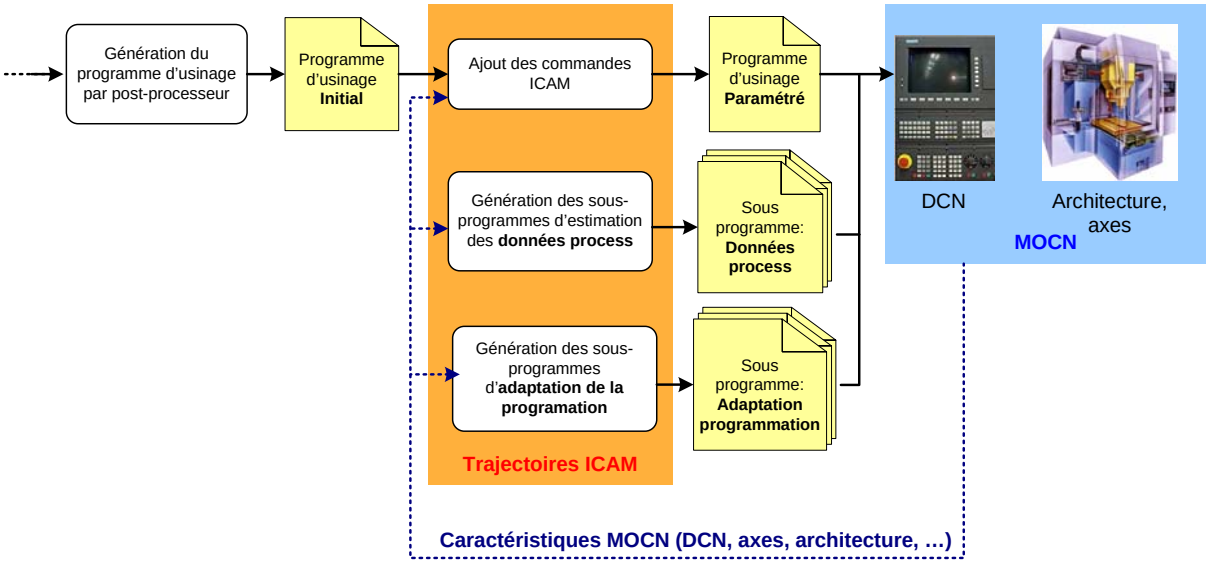


Figure 130 : Approche ICAM à l'aide du format ISO 6983

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

L'implémentation de l'approche ICAM sous format ISO 6983 s'accompagne également de certaines difficultés pratiques dans la gestion même des trajectoires d'outil. La Figure 131 illustre ainsi l'une de ces situations en traitant de l'exemple d'une trajectoire linéaire d'outil destinée à usiner une surface bombée. L'engagement de l'outil évolue donc de manière importante au cours du trajet.

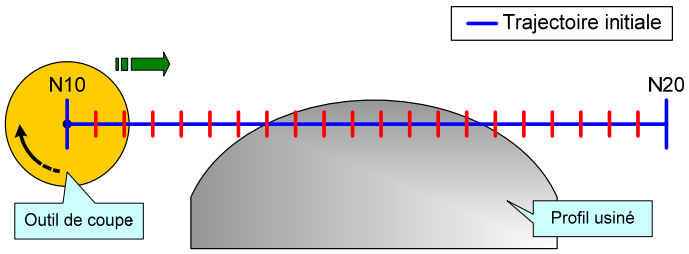


Figure 131 : Exemple de trajectoire discrétisée pour employer l'approche ICAM

Dans le cadre d'une programmation par trajectoires ICAM, il est nécessaire de disposer de données sur le déroulement du process tout au long du parcours. Or, sa programmation sous format ISO 6983 n'emploie que deux points de contrôle placés aux extrémités du segment. L'implantation d'une programmation ICAM nécessitera donc de discrétiser le trajet afin de pouvoir à la fois estimer les données process et adapter les trajectoires pendant l'usinage. Malheureusement, l'ajout de ces points de contrôle peut pénaliser le comportement de la MOCN. En effet, selon les paramètres de suivi de trajectoire sélectionnés, les axes de déplacement peuvent réduire leur vitesse au franchissement des points ajoutés [Dugas2003]. A cela s'ajoute le fait qu'il n'est pas simple de déterminer la valeur du pas de discrétisation car il faut tenir compte du type d'adaptation de programmation souhaité et de l'application mise en œuvre. Par conséquent, le caractère générique de l'approche ICAM est difficile à exprimer avec la programmation actuelle des MOCN, basée sur le format ISO 6983.

A l'inverse, le standard Step_NC a intégré dès ses débuts la possibilité de réaliser des applications de programmation avancée destinées une meilleure gestion des parcours d'outil. Ainsi, Suh et al. [Suh2003] ont introduit la notion de « Nouveau Contrôle Intelligent » pour la programmation sous format Step_NC ; celle-ci annonce clairement les objectifs visés en terme de programmation avancée de MOCN. Toutefois, seules les grandes lignes de cette thématique ont été énoncées ; aucun développement n'est venu préciser la mise en œuvre d'une telle approche.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

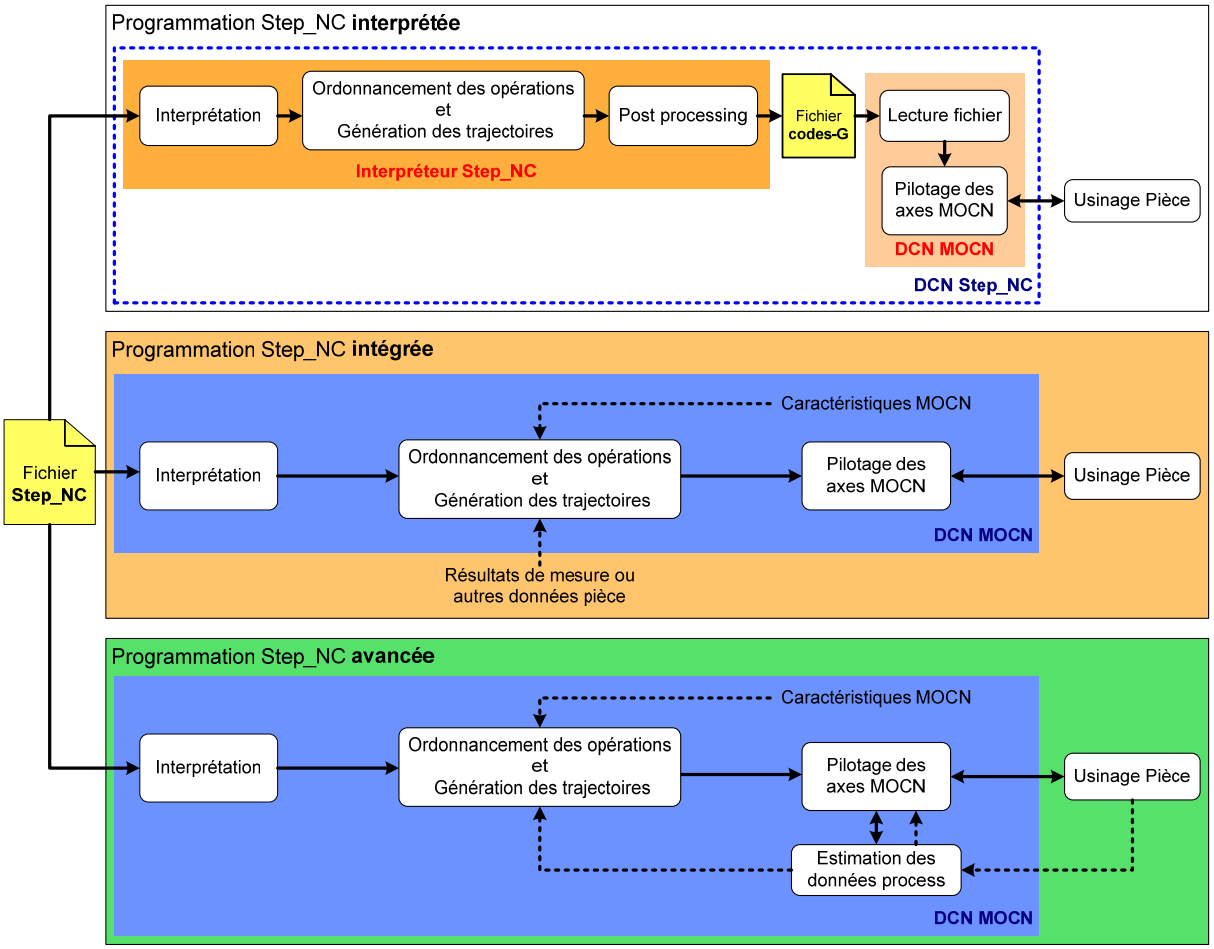


Figure 132 : Implantation progressive d'une programmation Step_NC avancée

La méthode de programmation par trajectoire ICAM que nous proposons peut donc répondre à cette problématique en proposant l'intégration progressive d'une programmation avancée au format Step_NC. Comme présenté sur la Figure 132, nous définissons trois étapes principales pour la mettre en œuvre :

- *Programmation Step_NC interprétée* : les données du programme d'usinage Step_NC sont interprétées pour la génération des trajectoires et l'ordonnancement des opérations. Il est nécessaire ensuite de post-processer les trajectoires pour obtenir un fichier ISO 6983 destiné au DCN de la MOCN. Les apports pour la programmation avancée ne sont pas significatifs mais il est possible d'employer le format Step_NC avec les DCN actuels. Il s'agit ainsi de la première étape de l'intégration de ce standard de données dans une entreprise.
- *Programmation Step_NC intégrée* : le DCN de la machine outil génère les parcours d'outil et ordonne les opérations directement à partir du format Step_NC. Il n'est donc plus nécessaire d'employer l'ISO 6983. Les caractéristiques de la MOCN sont prises en compte pour la construction

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

des trajectoires, néanmoins celles-ci ne peuvent plus être modifiées une fois l'usinage commencé. Cette étape propose toutefois la possibilité d'intégrer des données externes, comme des résultats de mesure, lors de la définition des trajets.

- *Programmation Step_NC avancée* : le DCN effectue des estimations de données process lors de l'usinage. Les résultats obtenus sont pris en compte pour l'adaptation en temps réel des paramètres de fabrication. Le DCN peut aussi décider de la modification d'une trajectoire en cours de fabrication et de l'intégration d'opérations d'optimisation additionnelles dans la gamme de fabrication.

La dernière étape proposée correspond ainsi à la mise en œuvre du niveau 4 de l'approche de programmation avancée que nous avons présentée au paragraphe précédent. Il s'inscrit également dans le cadre du « Nouveau Contrôle Intelligent » des MOCN, qui est un objectif à atteindre pour la programmation Step_NC [Suh2003].

Le format Step_NC constitue ainsi un cadre propice à la mise en place de programmation avancée par l'approche ICAM. Ainsi, les différents niveaux d'implantation de la méthode de programmation avancée proposés au paragraphe précédent peuvent être développés conjointement avec l'implantation du format Step_NC dans le cadre d'une évolution de la programmation des moyens de fabrication à commande numérique. En effet, l'étape que nous appelons « Programmation Step_NC avancée » constitue l'aboutissement commun à ces deux approches.

5.2.3 Génération de trajectoires à motifs au format Step_NC

Jusqu'à présent, peu de développements de l'ISO 14649 et de son protocole d'application ont porté sur la génération de trajectoires de fabrication. Les normes associées font uniquement référence à des trajets basiques comme le contour parallèle, l'aller-retour ou le colimaçon. Ce type de stratégie n'exploite pas pleinement la possibilité offerte par Step_NC de gérer des informations de haut niveau, en particulier au niveau de la génération et la gestion des trajectoires d'usinage. Ce standard de données dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'implémentation de trajectoires paramétrées.

Dans cette partie, nous proposons un nouveau concept de définition de trajectoires d'usinage, les trajectoires à motifs. Nous nous appuyons pour cela sur sa

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

mise en œuvre pour des stratégies de tréflage et d'usinage trochoïdal, qui s'accordent bien avec cette approche [Suh2006; Rivette2007]. La pertinence de ces travaux a été reconnue par le comité international ISO TC184/SC4 (chargé de définir et normaliser les standards Step_NC), qui a proposé à l'équipe MO2P de l'IRCCyN de participer à ses commissions et développements en Usinage (et également en Prototypage Rapide). L'objectif des développements proposés est double : il s'agit tout d'abord de mettre à profit les possibilités du format Step_NC pour définir une nouvelle approche de programmation de trajectoires complexes ; ensuite, il s'agit également de montrer la pertinence du standard Step_NC pour la gestion et la maîtrise des opérations de fabrication, lui offrant ainsi un avantage supplémentaire face au format ISO 6983.

5.2.3.1 Présentation du concept : application au tréflage et à l'usinage trochoïdal

Comme nous l'avons montré au chapitre 2, les trajectoires de tréflage et d'usinage trochoïdal résultent de la combinaison de deux mouvements principaux ; l'un d'entre eux est répété le long du trajet, quelle que soit la géométrie usinée. Fort de cette analyse, notre approche consiste à découpler la définition de la trajectoire entre une courbe motif et une courbe guide, comme illustré sur la Figure 133.

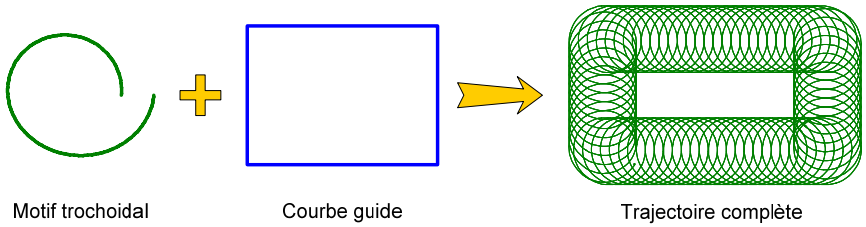


Figure 133 : Trajectoire trochoïdale à motifs

L'un des intérêts majeurs de ce choix est de rendre la géométrie du motif indépendante du profil de la poche à vider, ce qui étend la flexibilité et le champ d'application de ces stratégies. Nous détaillerons d'abord dans cette partie les divers motifs et courbes guides servant à la définition de trajectoires de tréflage et d'usinage trochoïdal à motifs. Nous donnerons ensuite les principaux avantages associés à cette approche.

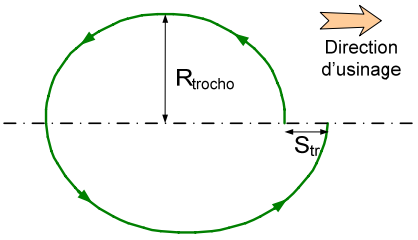


Figure 134 : Exemple de motif trochoïdal

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Pour l'usinage trochoïdal, le motif choisi est constitué d'une seule révolution trochoïdale (Figure 134), définie par son rayon R_{trocho} et son pas S_{tr}. La valeur de R_{trocho} peut être obtenue directement à partir du diamètre d'outil $Ø_{outil}$ et de la largeur de la rainure trochoïdale.

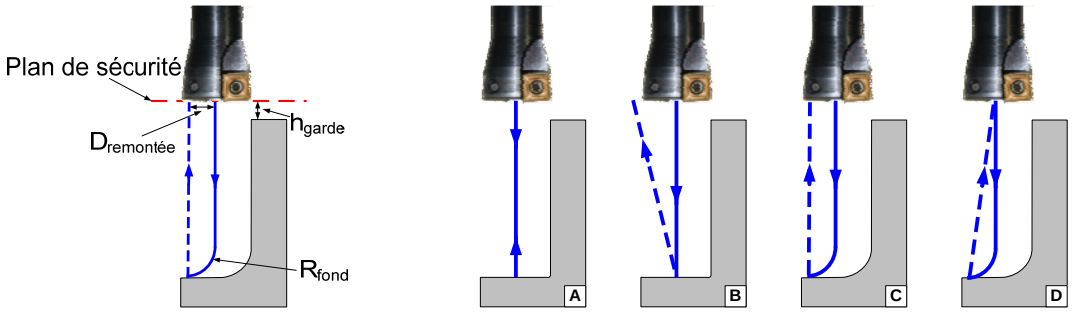


Figure 135 : Motifs de tréflage et exemples de combinaisons

Dans le cas du tréflage, il est assez facile d'extraire un motif de trajectoire dans la mesure où le principe même de cette stratégie d'usinage est d'effectuer une répétition de plongées axiales. Le motif choisi inclut donc tous les mouvements le long de l'axe de l'outil. Par rapport à l'usinage trochoïdal, la forme des motifs est de façon plus prononcée indépendante de la courbe guide. Les paramètres régissant sa définition sont les suivants : h_{garde}, hauteur du plan de sécurité par rapport à la surface supérieure de la pièce, $D_{remontée}$ valeur du décalage de l'outil à la remontée et R_{fond} le rayon en fond de plongée.

En parallèle du motif de plongée, il est également nécessaire de définir les paramètres du trajet de raccordement entre deux plongées successives. Nous avons en effet vu au chapitre 2 que la ligne droite n'est pas toujours le parcours le plus productif. Nous avons donc décidé d'intégrer un rayon de courbure $R_{liaison}$ au trajet de liaison, en plus de la valeur du pas de tréflage S_{pl}, comme indiqué sur la Figure 136. Par défaut, la valeur de ce paramètre conduit à la génération d'un trajet de raccordement en ligne droite ; néanmoins, sa valeur peut être choisie en fonction des caractéristiques du moyen de fabrication utilisé, afin d'optimiser le temps d'usinage.

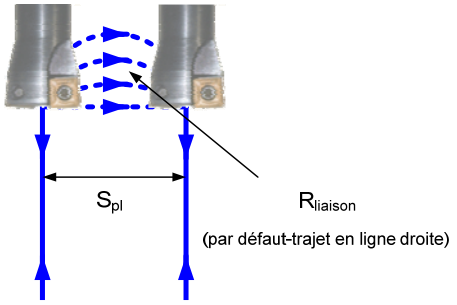


Figure 136 : Paramétrage du trajet de raccordement entre deux plongées

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Pour le tréflage et l'usinage trochoïdal, la définition de la courbe guide est la même. On s'appuie sur des trajets à portions linéaires, qui peuvent être définis à l'aide de l'entité « polyligne » au format Step, et dont la forme peut être adaptée au profil de la poche et aux conditions d'usinage choisies. Dans la majorité des cas d'usinage, il s'agit d'une courbe de trajet en aller-retour ou en spirale. Il sera ainsi possible de se baser sur les stratégies d'usinage existantes de la norme ISO 13303-AP238 [ISO_10303-238]. De plus, lors de l'application du motif à la courbe guide pour obtenir la trajectoire d'usinage complète, nous utiliserons les principes énoncés au chapitre 2. Ainsi, pour l'usinage trochoïdal, les trajectoires générées seront continues malgré les changements de direction de la courbe guide ou les changements de niveau. La Figure 137 propose deux exemples de parcours d'outil construits à l'aide de notre approche.

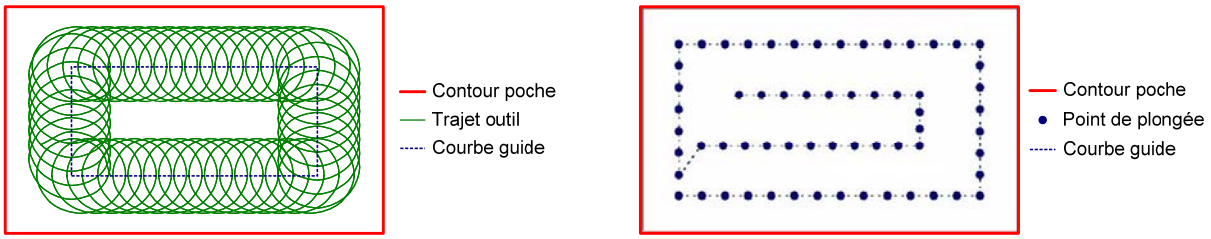


Figure 137 : Exemples de trajectoires à motifs

Nous avons ensuite proposé une intégration des trajectoires développées au protocole d'application 238 de la norme Step ISO 10303. La Figure 138 rend ainsi compte de la représentation au format express-G (format graphique normalisé utilisé pour décrire les relations entre les différentes entités d'une norme Step) des entités ajoutées ainsi que leur lien avec la structure de données existante : les stratégies à motifs développées se rapportent au « supertype » d'entité « two5D_milling_strategy » (stratégie d'usinage 2.5 axes). Les entités « supertype » sont des entités qui ne possèdent pas de caractéristiques propres mais qui sont utilisées pour regrouper les entités de même nature. Par exemple, l'appel de l'entité supertype « two5D_milling_strategy » dans le processus de génération d'un fichier Step_NC revient à choisir une stratégie d'usinage parmi celles qui lui sont directement reliées dans la représentation express-G. Le positionnement des entités « plunge milling » et « trochoïdal milling » à ce niveau de l'arborescence permet ainsi de pouvoir les choisir au même titre que les stratégies déjà existantes.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

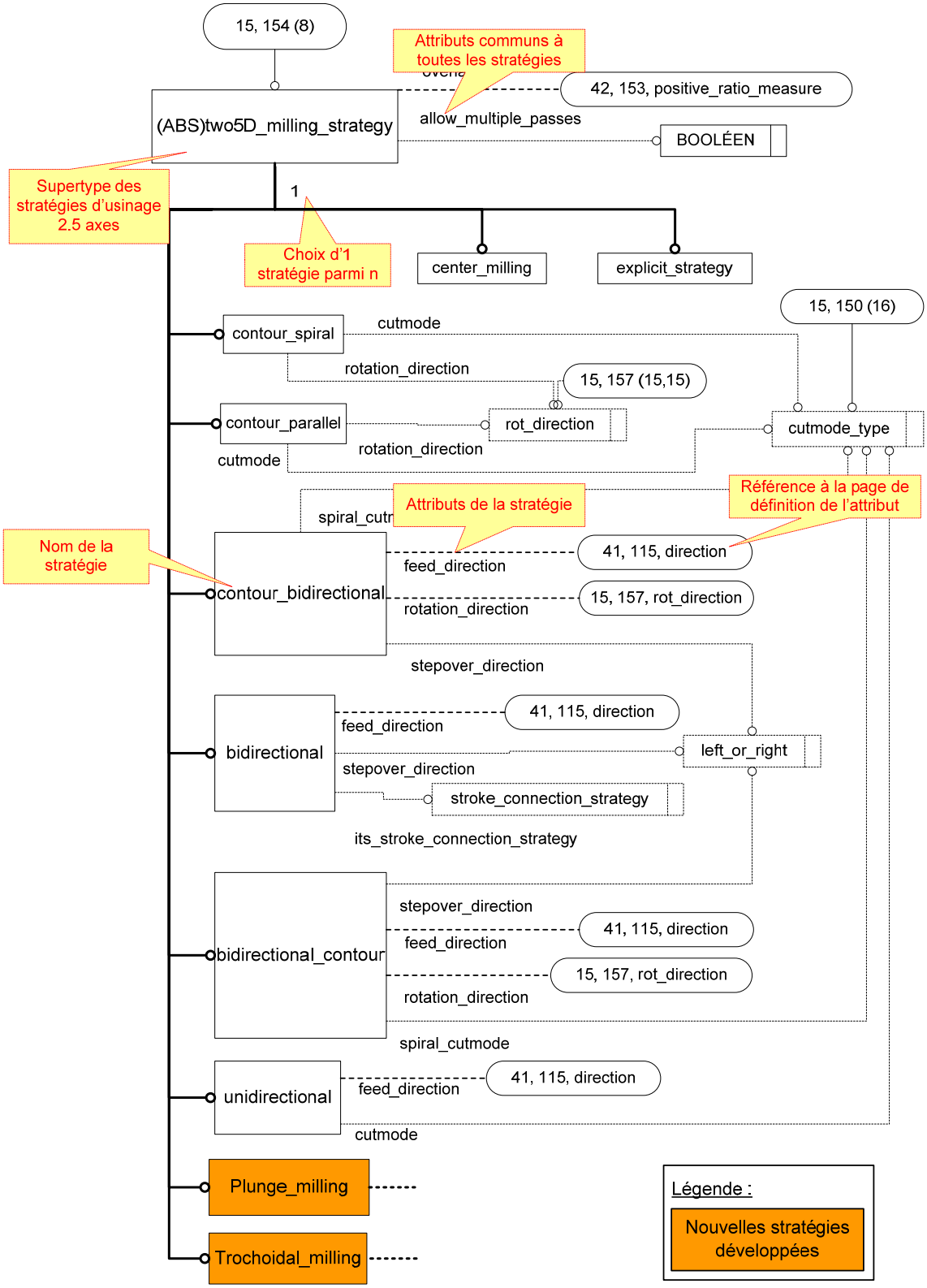


Figure 138 : Intégration des trajectoires à motifs dans l'AP-238 de la norme ISO 10303

La Figure 139 propose les détails de définition de chaque entité nécessaire à la création de trajectoires d'usinage à motifs ainsi que les relations entre chacune d'entre-elles. Elle permet aussi d'illustrer l'évolution du concept de trajectoire 2.5

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

axes proposé par les trajectoires à motifs. En effet, le découplage entre la géométrie de l'entité à usiner et les contraintes technologiques de l'usinage se matérialise dans la répartition des entités-filles d'une stratégie d'usinage à motifs (« plunge_milling » ou « trochoïdal milling »). Les paramètres du motif répondent aux critères technologiques, c'est en effet le long du motif d'usinage que l'outil enlève la matière. En parallèle, la courbe guide assure la concordance entre l'enveloppe de la trajectoire complète et la géométrie de l'entité à vide en positionnant les motifs d'usinage par rapport à celle-ci. C'est pour cela que nous avons choisi de nous appuyer sur les stratégies existantes pour définir et paramétrer les courbes guides ; elles répondent en effet parfaitement à ce besoin.

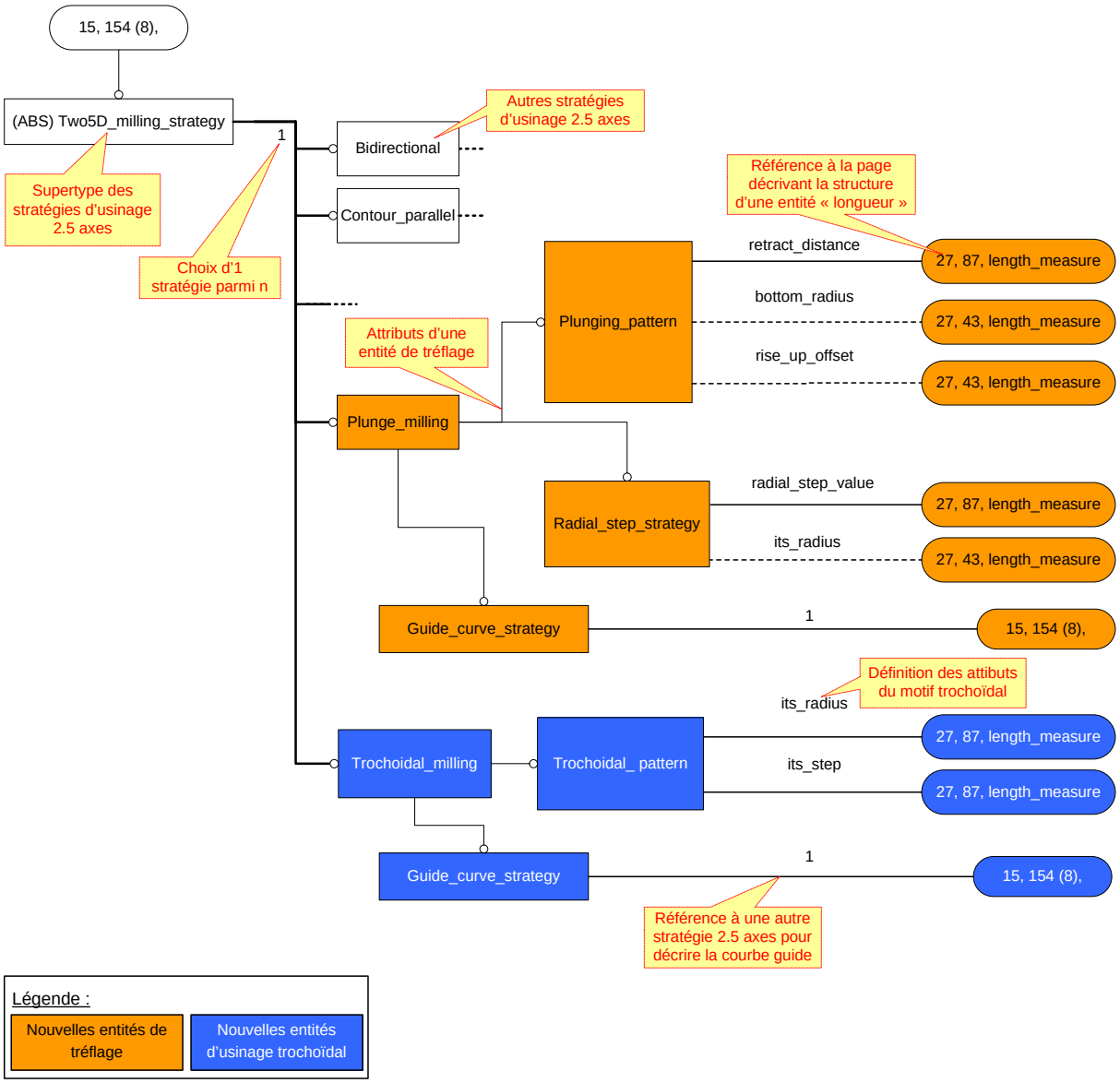


Figure 139 : Description et organisation des entités de trajectoires à motifs

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Enfin, la définition de trajectoires à motifs permet de maîtriser la flexibilité des trajectoires générées, dans le sens où une évolution de la géométrie de l'entité à usiner n'impacte que sur la courbe guide et non sur le motif. Le respect des critères technologiques est alors conservé malgré les modifications effectuées. A l'inverse, une modification de paramètres opératoires ou de spécification associée aux surfaces usinées n'affecte que le motif employé, sans modification de la forme de la courbe guide. Il est ainsi beaucoup plus facile de respecter les contraintes technologiques liées à l'application mise en œuvre.

De plus, la définition complète et cohérente des entités nécessaires à la génération de trajectoires à motifs de tréflage et d'usinage trochoïdal ainsi que de leurs relations dans le protocole d'application 238 de la norme Step ISO 10303 facilite le développement de générateurs de fichiers Step_NC intégrant ces nouvelles stratégies. La cohérence de l'approche proposée par rapport aux entités de la norme existante est aussi validée par ce biais. Afin de souligner l'intérêt du standard Step_NC pour la génération de trajectoires à motifs, nous avons comparé dans le Tableau 15 la structure d'un fichier code G et d'un fichier Step_NC permettant de définir le même parcours trochoïdal.

Fichier ISO 6983 (codes G)	**Fichier ISO 10303-AP238 (Step_NC)**
…	…
N10 X-12.000 Y0.000 Z0.000	#1000=TROCHOIDAL(#1001,#1002...);
N20 X-13.030 Y6.101 Z0.000	#1001=TROCHO_PATTERN(#100,$$,$$);
N30 X-16.430 Y11.147 Z0.000	#1002=GUIDE_CURVE(#2001, BIDIRECTIONAL,$$);
…	…
N530 X27.806 Y3.119 Z0.000	#2001=COMPOSITE_CURVE_SEGMENT(.CONTINUOUS.,.T.#2002)
N540 X-27.539 Y-3.119 Z0.000	#2002=CARTESIAN_POINT(“,(0.0000,-84.0000,0.0000));
N550 X-24.735 Y-8.814 Z0.000	#2003=CARTESIAN_POINT(“,(16.0000,-100.0000,0.0000));
...	…
Plus de 1200 lignes	**Moins de 250 lignes**

Tableau 15 : Comparaison de fichiers ISO 6983 et ISO 10303-AP238

Le format Step_NC montre alors ses performances par rapport au format ISO 6983. Il est ainsi possible de maîtriser chaque paramètre de définition du motif et de la courbe guide, contrairement au format 6983 pour lequel les paramètres sont noyés dans définition explicite des parcours. Les modifications sont donc plus faciles à répercuter sur la définition du parcours. Par exemple, une modification de la géométrie de la poche à vider est transparente pour un parcours à motifs : comme les

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

paramètres de la courbe guide sont directement extraits de la structure des données CAO au format Step, la nouvelle géométrie est répercutée automatiquement sur le parcours d'outil ; le motif trochoïdal, dont la combinaison de paramètres répond aux contraintes technologiques de l'opération visée, ne subit aucune modification. A l'inverse, dans le cas du format ISO 6983, il est indispensable de redéfinir un parcours complet d'outil qui sera post-processé pour conduire à un nouveau fichier d'usinage destiné à répondre aux nouvelles contraintes.

A cela s'ajoute le fait que notre approche permet également d'employer plusieurs motifs pour un même parcours de vidage de poche. Ceci est d'un intérêt particulier pour les trajectoires de tréflage, par sélection du motif le plus approprié en fonction du point de plongée (Figure 140). On peut par exemple utiliser un motif présentant un rayon de fond et un décalage de remontée (motif C) pour les plongées générant les flancs de la poche afin de faciliter le travail de finition, voire s'en affranchir selon les spécifications fonctionnelles. A l'inverse, les plongées au centre, dont seule la surface générée par le bout de l'outil est présente en finition, peuvent être réalisées à l'aide d'un profil plus basique mais présentant une meilleure productivité (motif A).

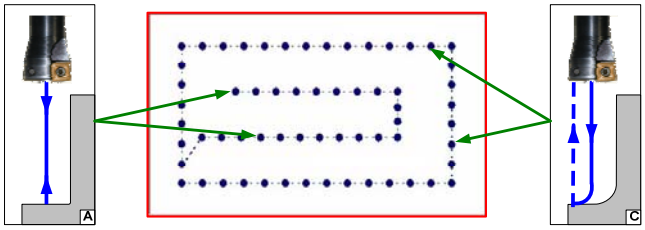


Figure 140 : Utilisation de plusieurs motifs pour une même poche

Les travaux présentés dans cette partie s'intègrent dans la réflexion actuelle menée par le comité ISO TC184/SC4 sur la norme associée au format Step_NC. Les résultats proposés ici définissent le cadre à de futures applications, qui pourra être étendu à d'autres types de trajectoires que les courbes trochoïdales et le tréflage. Toutefois, afin de montrer la faisabilité pratique de notre approche et pour disposer de résultats concrets, nous avons mis en œuvre la programmation par trajectoires à motifs au format Step_NC dans le cadre d'un processus complet de fabrication, du modèle CAO jusqu'à l'usinage. Cette étude a été effectuée en collaboration avec le laboratoire sud-coréen de POSTECH.

5.2.3.2 Intégration au logiciel de génération de fichiers Step_NC PosSFP

L'équipe de recherche du Pr. Suh, basée au laboratoire de POSTECH (Université de Pohang, Corée du Sud), est l'un des acteurs majeurs travaillant au

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

développement du standard Step_NC. Elle a notamment développé un « logiciel de programmation orientée Atelier » (Shop Floor Programming Software) [Suh2003]. Celui-ci a été conçu à partir des objets définis dans le protocole d'application AP238 de la norme Step 10303 et fait partie d'une architecture complète de CFAO sous Step_NC, depuis le modèle CAO jusqu'à la fabrication de la pièce. Nous avons donc choisi, en collaboration avec l'équipe du Pr. Suh, d'y intégrer la définition de trajectoires à motifs de tréflage et d'usinage trochoïdal, ceci afin de disposer rapidement d'une interface fonctionnelle proposant cette nouvelle approche.

Dans le but de situer notre démarche, il est utile de préciser le fonctionnement du logiciel PosSFP. Un scénario type se déroule de la manière suivante (Figure 141) :

- Extraction des entités d'usinage à partir d'un fichier CAO de pièce mécanique encodé en Parasolid ou en Step.
- Définition des opérations de fabrication correspondantes et des étapes de travail pour chaque entité reconnue.
- Génération du fichier Step_NC de la pièce.

Le fichier généré est ensuite envoyé directement au DCN, qui grâce au module PosTPG (Tool Path Generator) définira de manière explicite des mouvements de l'outil.

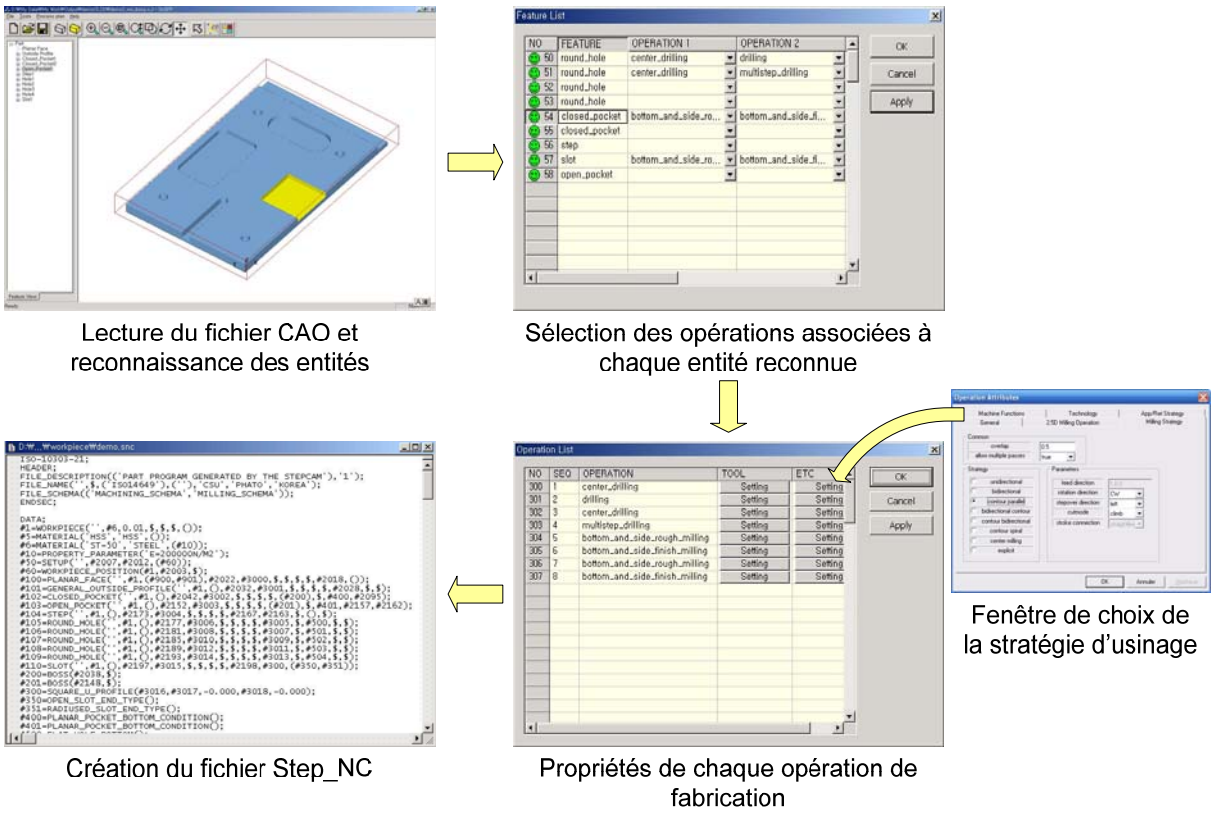


Figure 141 : Principe de fonctionnement du logiciel PosSFP [Suh2003]

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Les sources du logiciel PosSFP sont codées en langage Visual C ; intégrer des trajectoires à motifs a donc consisté à ajouter de nouveaux objets (motifs, courbes guides) aux fonctions existantes de définition des stratégies d'usinage pour définir une nouvelle version du logiciel PosSFP. Celle-ci présente une fenêtre de gestion des stratégies d'usinage modifiée, qui intègre les trajectoires à motifs (Figure 142). Ce premier travail permet ainsi de générer des fichiers Step_NC intégrant ces nouvelles définitions de stratégies d'usinage. Nous avons volontairement choisi de séparer les trajectoires à motifs des stratégies préexistantes, car le mode de programmation, intégrant un paramétrage technologique (les composants du motif), est différent.

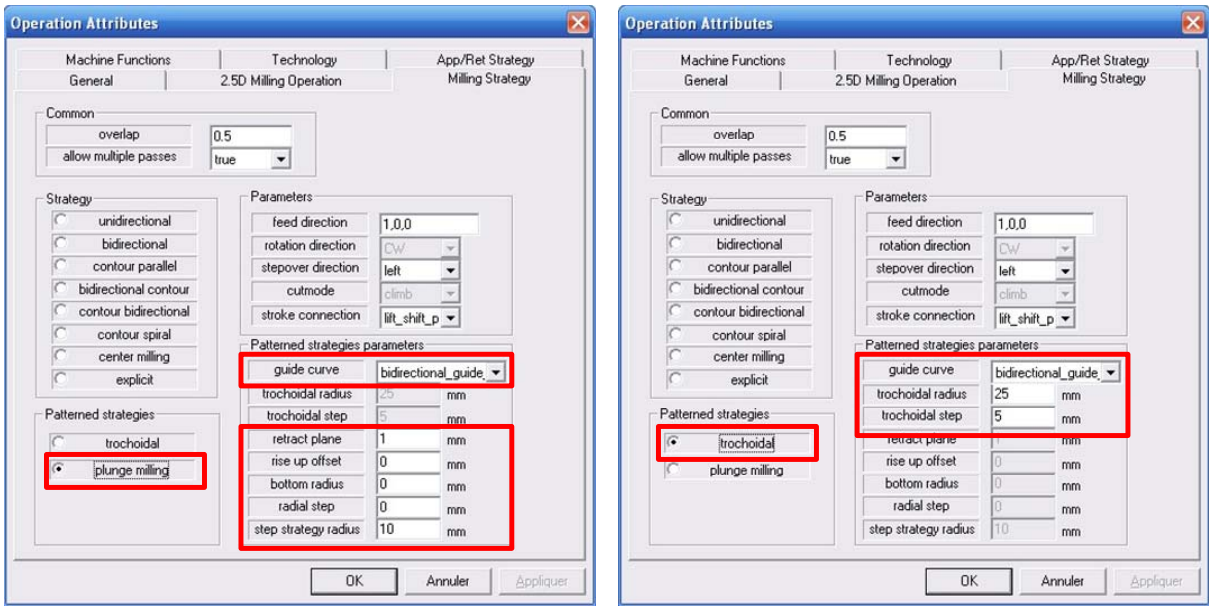


Figure 142 : Nouvelles fenêtres de choix de la stratégie d'usinage

Il est important de noter ici que le fonctionnement du logiciel PosSFP est directement basé sur la norme Step ISO 10303-238. La fenêtre de gestion des stratégies d'usinage constitue donc la réalisation concrète de la démarche proposée par l'arborescence associée aux entités « Two5D Milling Strategy » de la norme. L'implantation des trajectoires à motifs dans le logiciel PosSFP tient donc lieu de validation des développements effectués dans le cadre du protocole d'application la norme, que nous avons proposés dans la partie précédente.

Dans un second temps, il faut s'assurer que le DCN interprète de manière correcte les instructions d'un fichier Step_NC contenant une stratégie à motifs. Idéalement, il aurait fallu intégrer la génération de trajectoires à motifs de tréflage et d'usinage trochoïdal au module PosTPG (Tool Path Generator) de la plateforme Step_NC coréenne. Malheureusement, il n'a pas été possible d'accéder aux fichiers

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

sources de ce module pour des raisons techniques (interface CORBA utilisant des bases de données locales, ne pouvant donc pas être exportée).

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc développé notre propre « interpréteur de trajectoire » (à l'aide du logiciel Matlab®) afin de pouvoir poursuivre l'intégration de notre approche jusqu'à la pièce mécanique réelle. De plus, aucun DCN commercial actuel n'étant capable de lire des fichiers ISO Step_NC, notre interpréteur ne commande pas directement les axes de la MOCN, mais génère un fichier ISO 6983 qui est lu par le DCN. Le principe de fonctionnement de l'interpréteur que nous avons développé est présenté sur la Figure 143.

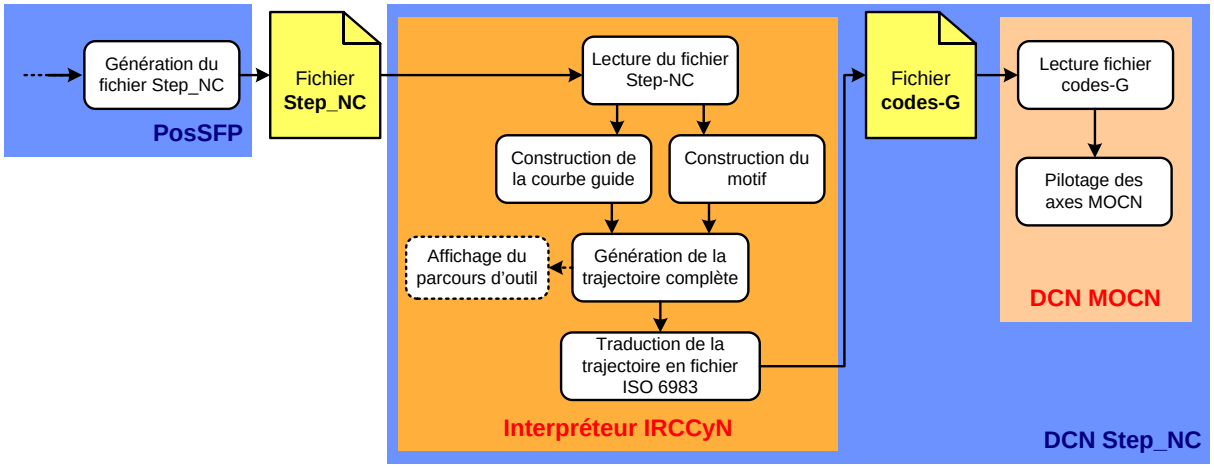


Figure 143 : Fonctionnement de l'interpréteur IRCCyN

Intégré au « DCN Step_NC », le rôle de l'interpréteur est de transcrire les données de fabrication contenues dans le fichier Step_NC en commandes de déplacement des axes de la MOCN ; pour cela, les caractéristiques géométriques des entités à usiner (dimensions, positions, …) et les valeurs des paramètres d'usinage (type de courbe guide, composants du motif, …) sont analysées et compilées pour construire le parcours d'outil. Après avoir construit les entités élémentaires du trajet que sont la courbe guide et le motif d'usinage, la trajectoire complète est générée. Nous jugeons utile de préciser ici que la génération de trajectoires de tréflage et d'usinage trochoïdal dans le cadre de cette approche bénéficie des optimisations de programmation que nous avons proposées au chapitre 2. Cette étape de l'interprétation du fichier Step_NC est matérialisée par la création d'un fichier contenant les points de contrôle de la trajectoire d'usinage complète. Il est alors possible de visualiser le parcours au moyen d'une fenêtre graphique ; la Figure 144 propose ainsi deux exemples de trajectoires générées à partir des informations contenues dans le fichier Step_NC.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

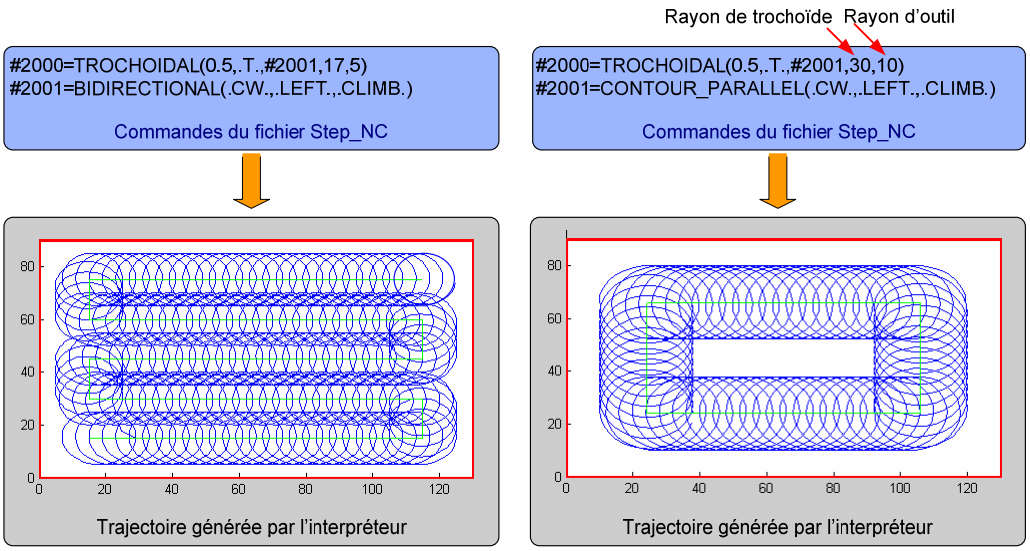


Figure 144 : Exemples de trajectoires générées par l'interpréteur

Au cours d'une dernière étape de l'interprétation du code Step_NC, le fichier de points est traduit en langage ISO 6983 pour pouvoir être implanté dans le DCN de la MOCN employée. L'usinage est réalisé par la suite.

De manière objective, il est évident que la solution de mise en œuvre adoptée ici n'aboutit pas à une intégration complète du format Step_NC, depuis la définition des paramètres de fabrication jusqu'au pilotage de la MOCN. Elle permet malgré tout de valider notre approche. En effet, les développements effectués pour interpréter le code Step_NC peuvent être transposés soit au module TPG soit à un autre DCN destiné à ce nouveau standard.

De plus, l'utilisation d'un interpréteur Step_NC, chargé de générer les parcours d'outil matérialise le concept de « DCN Step_NC », dont le rôle n'est plus restreint à la gestion des trajectoires de fabrication mais s'étend désormais à leur construction. On se rapproche alors de l'objectif d'intégration visé, à savoir la génération de parcours d'outil répondant à la fois aux exigences formulées par les données de fabrication du ficher Step_NC et aux caractéristiques technologiques (vitesses, accélération, jerk, …) de la MOCN employée.

5.2.3.3 Validation expérimentale de la démarche sur MOCN VERNE

La méthode proposée et les outils développés ont finalement été soumis à une validation expérimentale menée sur la MOCN parallèle VERNE. Elle s'est centrée sur des opérations de vidage de poche par usinage trochoïdal. La démarche employée est détaillée sur la Figure 145.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

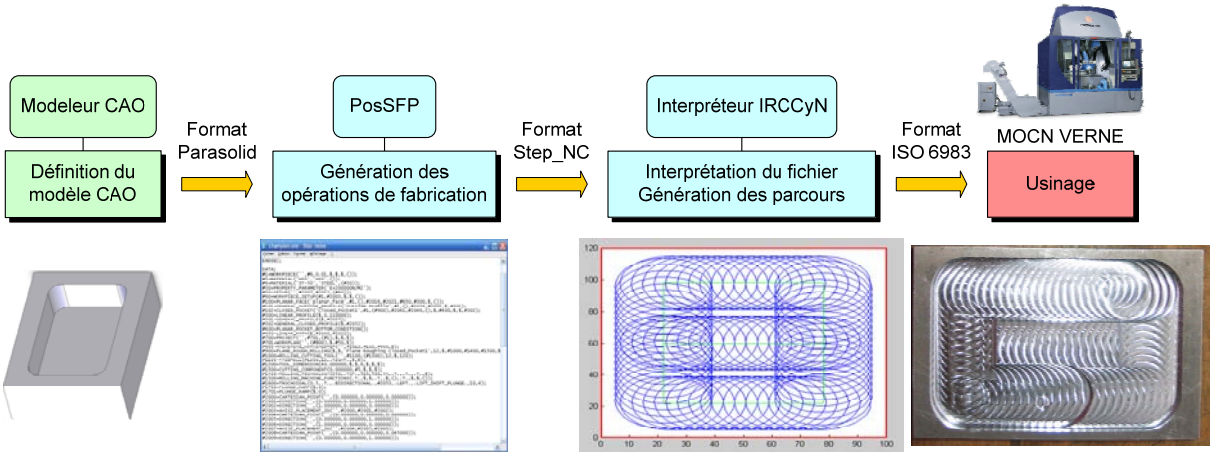


Figure 145 : Scénario de la validation expérimentale du DCN Step_NC

Notre objectif était de vérifier la faisabilité de notre approche au travers d'un cycle de fabrication complet, du modèle CAO jusqu'à la pièce usinée en maîtrisant l'intégralité de la chaîne numérique : il s'agissait de réaliser les opérations postérieures à la génération du fichier Step_NC de façon automatique, c'est-à-dire sans intervention manuelle sur les fichiers de programmation afin de se retrouver dans la situation d'un DCN Step_NC intervenant dès l'interprétation du programme d'usinage (fichier Step_NC) et la génération des parcours. Nous nous sommes ainsi placés dans le cadre d'une programmation Step_NC interprétée (voir Figure 132).

En pratique, plusieurs poches ont été usinées avec succès en testant plusieurs géométries du modèle, plusieurs rayons de trochoïdes et plusieurs types de courbe guide. Cela nous a ainsi permis de valider l'adaptabilité des outils développés en évaluant leur réponse suite à des modifications géométriques de l'entité à usiner, mais aussi à des variations de paramètres technologiques [Laguionie2007].

Au final, l'incorporation des trajectoires à motifs dans le logiciel s'est avérée concluante. Les fichiers Step_NC issus de la nouvelle version du logiciel PosSFP présentent ce nouveau type de définition des stratégies d'usinage. De plus, le développement d'un interpréteur a conduit à une validation des choix effectués. Bien que nous nous soyons limités à une programmation Step_NC interprétée (voir Figure 132), la viabilité de notre approche a été démontrée en termes de performance des trajectoires générées et de flexibilité des outils développés. Cette situation illustre également un manque actuel au niveau des contrôleurs numériques, la programmation étant ainsi en avance de phase par rapport aux capacités de ces moyens. De plus, la mise en place d'une nouvelle manière de programmer les stratégies d'usinage, à l'aide de motifs et de courbes guides, accentue les performances du format Step_NC pour la gestion d'informations de haut niveau. Il est ainsi apte à répondre aux exigences

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

actuelles et futures en termes de programmation de moyens de fabrication à grande vitesse.

Cette étude montre enfin qu'il est possible d'employer dès à présent le format Step_NC pour la programmation des moyens de fabrication, sans attendre de disposer de DCN pouvant lire directement ce format. Cette stratégie d'implantation par étapes, dont le but est d'introduire progressivement un nouveau standard de programmation, peut s'avérer payante en permettant de faire évoluer pas à pas la gestion de la chaîne numérique dans les ateliers de fabrication mécanique.

Le choix d'une machine à structure parallèle comme moyen de validation expérimentale renforce également l'intérêt de ces architectures pour la mise en œuvre des trajectoires à motifs proposées, dans la mesure où elles sont un moyen de fabrication tout à fait adapté à la mise en œuvre d'applications de programmation avancée sous Step_NC.

5.3 Conclusions

Ce chapitre a porté sur les évolutions à moyen terme que pourraient connaître la programmation des MOCN. Nous avons choisi de travailler sur deux thématiques qui préfigurent la machine outil de demain, les applications orientées e-manufacturing, qui définissent un nouveau cadre de travail, et l'utilisation du nouveau standard de programmation Step_NC, qui propose une nouvelle manière de programmer les MOCN.

Ainsi, la première partie de ce chapitre s'est intéressée à un projet de contrôle à distance de MOCN, s'inscrivant dans un contexte d'e-manufacturing. L'interface mise en place ainsi que les principaux scénarii et réalisations ont été présentés. L'objet de ce projet est de montrer non seulement l'intérêt des applications d'e-manufacturing pour l'optimisation de l'emploi des moyens de production mais aussi la facilité avec laquelle ce type d'interface peut être mis en œuvre avec les outils de communication actuels.

En outre, le fait de bénéficier de compétences déportées ouvre de nouvelles perspectives d'optimisation pour l'emploi des MOCN. Il semble que la notion d'entreprise virtuelle, avec toutes les modifications d'organisation afférentes, devienne de plus en plus concrète et tant les industriels que les scientifiques devront s'adapter à ces nouveaux enjeux. Mais les apports liés à la plateforme de pilotage à distance sont aussi d'ordre pédagogique. En choisissant une MOCN à structure parallèle, nous

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

avons pu mettre en œuvre des expérimentations d'e-learning et d'e-manufacturing, permettant à des personnes distinctes de mieux comprendre les enjeux des mécanismes parallèles et de découvrir leurs domaines d'application. A cela s'ajoute le fait que ce type d'action, axé sur des démonstrations, peut contribuer à une meilleure diffusion des performances et spécificités des machines à structure parallèle. En outre, des actions d'e-expertise menées sur des MOCN à architecture parallèle permettent, une fois un tel moyen acquis, de faire appel à des compétences distantes afin d'exploiter au mieux leurs capacités. Ces moyens de fabrication ayant globalement des comportements différents de ceux, bien connus, des mécanismes sériels, il est très profitable de pouvoir faire appel à une expertise déportée pour accéder plus rapidement à la compréhension et à la maîtrise d'actions d'optimisation spécifiques à ces structures de machine.

Dans un second temps, nous avons présenté nos apports en programmation avancée pour le standard Step_NC. Ce format de description, dont l'objectif est de remplacer le code G, bénéficie de développements de portée internationale. L'architecture de la chaîne numérique ainsi que l'emploi de modèles de données intégrant des informations de haut niveau permettent au format Step_NC d'apporter une réponse adéquate aux problématiques de fabrication actuelles par MOCN.

Sur cette thématique, nous avons d'abord proposé une méthodologie à quatre niveaux pour la mise en œuvre de programmation avancée de MOCN. Celle-ci servira de cadre à l'approche ICAM. En effet, les objectifs du format Step_NC ont été, très tôt, de tendre vers une programmation intelligente des moyens de production ; la génération des parcours de l'outil est effectuée par le DCN en fonction de critères qui peuvent être fonction des données du process. Le standard de données Step_NC est donc bien adapté à la mise en œuvre des trajectoires ICAM.

Enfin, nous avons donné les principaux résultats concernant une nouvelle approche de programmation des parcours d'usinage au format Step_NC : la définition de trajectoires à motifs. L'idée force de cette méthodologie est, dans le cas de stratégies complexes telles le tréflage ou l'usinage trochoïdal, de définir le trajet à l'aide d'un motif et d'une courbe guide. Le motif est constitué du mouvement basique de l'outil et la courbe guide donne la direction globale d'avance. Au cours de l'exécution du programme, le motif est répété tout au long de la courbe guide pour obtenir le trajet complet. Une telle définition des trajectoires d'usinage nécessite l'emploi de Step_NC, qui offre la structuration nécessaire à sa mise en place. Il en résulte une plus grande flexibilité et une meilleure adéquation du trajet aux

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

contraintes technologiques dans la mesure où la forme du motif est indépendante de la géométrie à usiner. En pratique, la viabilité de la programmation de trajectoires à motifs a été évaluée non seulement dans le cadre de la programmation Step_NC par leur implantation dans le logiciel coréen de génération de fichiers Step_NC PosSFP mais aussi dans le cadre d'une démarche complète de conception-fabrication par des essais d'usinage sur MOCN.

Ce dernier chapitre a donc présenté deux approches différentes qui ont pour but de dessiner les contours de la programmation des MOCN du XXI^{e} siècle. Les applications d'e-manufacturing montrent que l'environnement des MOCN ainsi que leur utilisation vont connaître de profondes mutations. En termes de programmation, l'émergence du format Step_NC permettra de s'adapter à ces mutations tout en optimisant le déroulement du process par une programmation intelligente des moyens de production.

De manière générale, ces deux pistes d'évolution ont un impact bénéfique sur le développement des machines à structure parallèle. En effet, les applications d'e-manufacturing, outre les applications à but marketing, permettent de profiter facilement d'une expertise pour accéder au plus tôt à la maîtrise du comportement de ces mécanismes. Parallèlement à cela, le fait de disposer d'un standard de programmation, le format Step_NC, capable de tirer au maximum profit des moyens de fabrication par des actions de programmation avancée, induit également une optimisation de l'emploi des machines outils à structure parallèle.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Conclusions et perspectives

Le déploiement de l'Usinage Grande Vitesse s'est accompagné de nombreuses mutations au sein des ateliers de production mécanique. Il a ainsi conduit à une spécialisation des moyens de fabrication, dans la mesure où la définition des besoins lors de la recherche d'une machine capable implique un compromis entre la précision des déplacements effectués et la rapidité d'exécution. Par conséquent, c'est pour offrir des capacités dynamiques importantes que les machines à structure parallèle ont été développées. L'engouement pour ces mécanismes est toutefois resté assez limité jusqu'à présent, du fait, notamment, de contraintes liées à leur capabilité, comme le recours à des opérations de calibration, ou d'une méconnaissance des vecteurs d'optimisation propres à ces machines outils. De plus, contrairement à d'autres éléments participant à l'implémentation d'applications UGV, la programmation des moyens de fabrication à commande numérique est restée assez générique ; elle s'appuie toujours sur le format de données, ISO 6983 (ou code G) mis au point bien avant l'émergence de l'UGV et des contraintes associées. Cette situation limite donc la performance des moyens de fabrication innovants au comportement atypique, comme les machines à structure parallèle.

Fort de ce constat, le but des travaux présentés dans ce manuscrit a été de proposer des pistes d'optimisation de la programmation pour des applications sur MOCN à structure parallèle. Nous avons pour cela identifié plusieurs axes de recherche, visant à adapter la programmation au moyen de fabrication et à l'application visée. L'objectif associé était de disposer d'une vision transversale multi-procédés, permettant de faire émerger le potentiel des machines à structure parallèle comparativement aux machines sérielles. Par conséquent, si chaque thématique n'a pu être explorée dans toute sa globalité, les travaux menés posent les problématiques associées à chacune d'entre-elle et proposent de nouvelles voies pour l'optimisation de la programmation sur MOCN.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Afin de situer nos travaux et en définir le contexte, nous avons présenté au chapitre 1 les principales évolutions dues à l'introduction d'applications d'Usinage Grande Vitesse en nous focalisant sur les aspects relatifs aux machines outils et à leur programmation. Nous avons ainsi pu montrer que la programmation actuelle ne tire pas profit de toutes les capacités des DCN implantés sur les machines outils. Puis, une présentation des principales architectures parallèles développées nous a permis d'exposer la variété des mécanismes proposés, cette variété impliquant une adaptation de la programmation pour ces moyens de fabrication. Nous avons par la suite donné les résultats d'une étude comparant les performances d'une machine sérielle et d'une machine parallèle pour une même application d'usinage, dans le but d'illustrer les problématiques de programmation des MOCN. Enfin, nous avons présenté les axes de recherche développés au fil de ce manuscrit ; leur objectif commun étant de proposer des optimisations de programmation des MOCN pour adapter celle-ci aux caractéristiques du moyen d'usinage et à l'application implémentée.

Nous avons étudié au cours du chapitre 2 les problématiques de mise en œuvre d'une stratégie d'ébauche sur MOCN. Nous avons porté une attention particulière à l'implémentation de trajectoires de tréflage et d'usinage trochoïdal pour des applications de vidage de poches, celles-ci devenant désormais compétitives grâce à l'augmentation des capacités cinématiques des machines outils. Pour chacune de ces stratégies d'usinage, un modèle de génération de trajectoires optimisées a été développé et validé par des essais sur la MOCN parallèle VERNE du laboratoire. Ces expérimentations ont également servi de cadre à l'évaluation des performances de ces types de parcours d'outil au regard des capacités du moyen d'usinage employé. Nous avons de plus déterminé les paramètres cinématiques nécessaires et suffisants à l'implémentation efficace de stratégies de tréflage, grâce au développement d'outils de simulation. En particulier, la pertinence du choix d'une machine parallèle pour la mise en œuvre de ce type de trajectoire a été exposée. Nous avons pu également montrer l'intérêt de disposer d'outils de simulation pour optimiser le choix d'une stratégie d'usinage et pour disposer rapidement d'éléments de définition du cahier des charges d'une MOCN destinée à une application donnée. De la même manière, la mise en œuvre de stratégies trochoïdales requiert non seulement des capacités cinématiques importantes mais aussi un DCN puissant pour offrir les avantages liés à ces trajectoires. L'importance du format de description utilisé pour la programmation de ce type de parcours a également été mise en lumière. Nous avons enfin mis en

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

place des critères de choix d'une stratégie d'usinage, en nous appuyant sur un outil de simulation permettant d'évaluer la performance d'une stratégie d'usinage au regard des contraintes liées à l'application et aux moyens de fabrication. Par conséquent, les développements menés pour ce premier axe de recherche ont montré la nécessaire adaptation d'une stratégie d'usinage au moyen de fabrication utilisé.

Dans le cas des machines parallèles, les caractéristiques proposées ouvrent la voie à de nouvelles avancées. Il sera par la suite pertinent non seulement d'optimiser le paramétrage des stratégies proposées, notamment dans le cas des trochoïdes, mais aussi de s'appuyer sur le comportement spécifique des MOCN parallèles pour définir de nouvelles géométries de trajectoires optimisées. Le recours à des outils de simulation du type de ceux développés dans le cadre de ces travaux peut s'avérer très efficace. Une autre perspective serait également d'implémenter les outils de simulation développés dans les solutions FAO afin de donner des critères de productivité au programmeur lors du choix d'une stratégie d'usinage.

Le chapitre 3 a traité le déploiement d'un procédé émergent sur MOCN, le formage incrémental. Après avoir présenté les principes de mise en œuvre et les enjeux essentiels de ce procédé à l'aide d'une étude bibliographique, nous avons mené une étude par simulations éléments finis pour valider la capabilité des MOCN face à ce procédé et montrer la nécessité de maîtriser la génération et la gestion des parcours d'outil. Les résultats de cette analyse ont été par la suite validés par une étude expérimentale, qui a également évalué l'influence des principaux paramètres de programmation sur l'implémentation de ce procédé. Nous avons aussi pu montrer qu'il est indispensable de définir des parcours d'outil spécifiques au formage incrémental dans le but d'optimiser la capabilité de ce procédé. Ces actions nous ont ensuite amenés à proposer des pistes d'optimisation de la mise en œuvre d'applications de formage incrémental sur MOCN, basées sur des aspects de programmation. Enfin, la présentation d'une étude industrielle est venue non seulement concrétiser l'intérêt du secteur industriel pour le formage incrémental mais nous a également permis de proposer une méthodologie d'optimisation des trajectoires spécifiques à ce procédé.

Etant donnée la jeunesse du procédé de formage incrémental, les perspectives de développement sont nombreuses. Il conviendra particulièrement de poursuivre le déploiement de trajectoires de formage spécifiques répondant aux contraintes de mise en œuvre de ce procédé, afin d'optimiser la capabilité des MOCN sur lesquelles il sera

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

implémenté. Sur ce point, il faudra également approfondir la maîtrise des parcours d'outil en s'appuyant sur des approches de programmation avancée.

Suite à l'expression du besoin de programmation spécifique au procédé mis en œuvre et aux aptitudes des moyens de fabrication formulé au cours des chapitres 2 et 3, nous avons proposé dans le chapitre 4 une nouvelle approche de programmation avancée des MOCN, la méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing). Le recours à ce type d'optimisation a tout d'abord été démontré par une description des manques de la programmation usuelle des MOCN, à l'aide du format ISO 6983, et des limitations des méthodes d'optimisation de la programmation existantes. Par la suite, nous avons détaillé les principes de l'approche développée, la programmation par trajectoires ICAM qui s'appuie sur l'estimation en temps réel de données du process pour adapter les parcours d'outil et les paramètres opératoires, en faisant uniquement appel au DCN de la machine outil. Une étude expérimentale sur MOCN parallèle est venue confirmer les performances de cette approche de programmation et souligner son caractère générique. En effet, nous avons pu la mettre en œuvre avec succès pour des opérations d'usinage et de formage incrémental.

Les travaux menés dans ce manuscrit ont cependant principalement porté sur la définition du cadre général de l'approche ICAM. Il convient désormais d'étendre les estimations des données process à de nouveaux indicateurs, tout en proposant des modifications de paramètres opératoires adaptées non seulement à l'application implémentée mais surtout au moyen de fabrication employé.

Nous avons enfin présenté au cours du chapitre 5 deux évolutions destinées à optimiser l'emploi et la programmation des MOCN : les applications orientées e-manufacturing et le standard Step_NC. Dans le contexte de l'e-manufacturing, une plateforme de pilotage à distance de MOCN via le réseau Internet a été développée et a permis de réaliser avec succès des opérations d'e-expertise en collaboration avec des utilisateurs espagnols et d'e-learning avec des utilisateurs sud-coréens. De façon générale, ces actions ont pu mettre en lumière les changements futurs liés au développement des applications orientées réseau portant sur l'environnement et l'utilisation des moyens de fabrication à commande numérique ; dans le cas particulier des MOCN à structure parallèle, il devient alors possible de diffuser plus largement leurs caractéristiques et performances tout en optimisant leur emploi par le recours à des compétences déportées. Dans une seconde partie du chapitre 5, nos

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

travaux ont porté sur le format Step_NC. Nous avons d'une part montré que ce nouveau standard de programmation permet d'optimiser le déploiement de l'approche ICAM. Dans ce cadre, nous avons proposé une méthodologie d'intégration progressive de fonctionnalités intelligentes pour aboutir à une programmation Step_NC intelligente. D'autre part, nos travaux ont porté sur le développement d'une nouvelle approche de génération de parcours d'usinage par la définition de trajectoires à motifs. Celle-ci exploite la richesse du format Step_NC pour la génération et la maîtrise de trajectoires de haut-niveau et augmente les performances de ce standard de données.

La pertinence de cette approche de programmation a été reconnue par le comité ISO TC184/SC4 qui l'a intégrée à ses travaux. Les actions menées dans le cadre de cet axe de recherche ont ainsi indiqué de nouvelles directions de développement pour le standard ISO 14649. L'émergence de DCN capables d'interpréter directement les programmes au format Step_NC ouvrira sans nul doute la voie à des avancées supplémentaires.

De manière générale, les apports de ces travaux portent sur divers aspects du processus de fabrication ; ils s'attachent à montrer l'intérêt des approches de programmation avancée destinées à tirer profit des capacités du moyen de fabrication employé. En particulier, nous avons pu définir des domaines d'application privilégiés pour les MOCN parallèles en allant évaluer leurs performances pour chacun des axes de recherche étudiés. En termes de programmation, nos travaux ouvrent ainsi la voie à des optimisations futures. Celles-ci pourront s'appuyer sur le format Step_NC pour être implémentées de manière efficace. Ce format de description peut en effet tenir lieu de socle aux avancées relatives aux autres axes de recherche proposés dans ce manuscrit.

Dans la même optique d'optimisation de la programmation des MOCN en fonction de leurs propriétés et domaines de performance, il conviendra de poursuivre l'intégration de fonctionnalités intelligentes à l'intérieur du DCN. Comme celui-ci est en lien direct avec la structure de la machine, il permet de définir les facteurs d'optimisation propres à la machine concernée. Le DCN pourra ainsi être amené à proposer de lui-même des optimisations de la programmation des parcours d'outil (en informant toutefois l'opérateur des modifications projetées), en fonction des aptitudes de l'architecture de la machine outil ou de l'évaluation de données en cours de process.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Enfin, l'optimisation des process de production par des approches combinant résultats de simulation technologique des procédés et programmation avancée des moyens de fabrication a montré son efficacité dans les travaux présentés ici et dans d'autres actions de recherche menées au sein de l'équipe MO2P de l'IRCCyN. Il conviendra donc de poursuivre dans cette voie en ayant pour objectif, d'une part d'optimiser les choix de programmation des moyens de fabrication et, d'autre part, d'assurer une retranscription adéquate de ces choix lors de la réalisation du process.

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

Références bibliographiques

[Abele2007] Abele E., Weigold M., Roth M., **New Machine Tool Concept for High Speed Machining**, International Conference on High Speed Milling, San Sebastian (Espagne), 21-22 mars, 2007, CD-Rom

[Affouard2004] Affouard A., Duc E., Lartigue C., Langeron J. M., Bourdet P., **Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, Vol. 44 n°4, pp. 415-425

[Al-Ahmad2005a] Al-Ahmad M., D'Acunto A., Lescalier C., Bomont O., **Modeling of cutting forces in plunge milling**, Advanced Manufacturing Systems and Technology, 2005a, Vol. 486, pp. 155-164

[Al-Ahmad2005b] Al-Ahmad M., D'Acunto A., Martin P., **Etude des performances et limites de l'opération de tréflage : appliquer à l'entité poche**, Congrès Français de Mécanique, Troyes (France), 29 août - 2 septembre, 2005b, CD-Rom

[Al-Ahmad2006] Al-Ahmad M., D'Acunto A., Martin P., **Prediction of cutting forces system in plunge milling operations**, International Conference on High Speed Milling, Metz (France), 14-16 mars 2006, pp. 385-396

[Al-Ahmad2007] Al-Ahmad M., D'Acunto A., Martin P., **Influence de différentes stratégies de treflage sur la qualité de surface et la productivité**, Congrès Français de Mécanique, Grenoble (France), 27-31 août, 2007, CD-Rom

[Allwood2005] Allwood J. M., King G. P. F., Duflou J., **A structured search for applications of the incremental sheet-forming process by product segmentation**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2005, Vol. 219 n°2, pp. 239-244

[Altintas2006] Altintas Y., Ko J. H., **Chatter stability of plunge milling**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2006, Vol. 55 n°1, pp. 361-364

[Alvares2006] Alvares A. J., Ferreira J. C. E., **WebTurning: Teleoperation of a CNC turning center through the Internet**, Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol. 179 n°1-3, pp. 251-259

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Ambrogio2004] Ambrogio G., Costantino I., De Napoli L., Filice L., Fratini L., Muzzupappa M., **Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation**, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 153-154, pp. 501-507

[Ambrogio2005] Ambrogio G., De Napoli L., Filice L., Gagliardi F., Muzzupappa M., **Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing**, Journal of Materials Processing Technology, 2005, Vol. 162-163, pp. 156-162

[Attanasio2006] Attanasio A., Ceretti E., Giardini C., **Optimization of tool path in two points incremental forming**, Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol. 177 n°1-3, pp. 409-412

[Attanasio2007] Attanasio A., Ceretti E., Giardini C., Mazzoni L., **Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization**, Journal of Materials Processing Technology, 2007, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053

[Bieterman2001] Bieterman M., Boeing, **Industrial Problems Seminar**, Mathematics & Computing Technology, University of Minnesota IMA, 2001, CD-Rom

[Calvo2006] Calvo I., Marcos M., Orive D., Sarachaga I., **A methodology based on distributed object-oriented technologies for providing remote access to industrial plants**, Control Engineering Practice, 2006, Vol. 14 n°8, pp. 975-990

[Castagnetti2007] Castagnetti C., Duc E., Ray P., **Influence of optimised five-axis tool paths on the machine behaviour**, International Conference on High Speed Milling, San Sebastian (Espagne), 2007, CD-Rom

[CEA] CEA, http://www-cast3m.cea.fr, date de consultation: aout 2007

[Ceretti2004] Ceretti E., Giardini C., Attanasio A., **Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines**, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 152 n°2, pp. 176-184

[CGTech2007] CGTech, http://www.cgtech.fr/, 2007, date de consultation: Juillet 2007

[Chanal2006a] Chanal H., **Etude de l'emploi des machines outils à structure parallèle en usinage**, Thèse de doctorat, Institut Français de Mécanique Avancée / Université Blaise Pascal, 2006a

[Chanal2006b] Chanal H., Rauch M., Duc E., Hascoet J. Y., Ray P., **Identification géométrique des machines outils à structure parallèle : proposition d'une méthode basée sur l'usinage d'une pièce**, Assises Françaises Machine Outils & Usinage Grande Vitesse, Aix-en-Provence (France), 8-9 juin, 2006b, CD-Rom

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Chanal2007] Chanal H., Duc E., Ray P., Hascoet J. Y., **A new approach for the geometrical calibration of parallel kinematics machines tools based on the machining of a dedicated part**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47 n°7-8, pp. 1151-1163

[Choi1997] Choi B. K., Kim B. H., **Die-cavity pocketing via cutting simulation**, CAD Computer Aided Design, 1997, Vol. 29 n°12, pp. 837-846

[Choi1999] Choi B. K., Park S. C., **Pair-wise offset algorithm for 2D point-sequence curve**, CAD Computer Aided Design, 1999, Vol. 31 n°12, pp. 735-745

[Cus2006] Cus F., Milfelner M., Balic J., **An intelligent system for monitoring and optimization of ball-end milling process**, Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol. 175 n°1-3, pp. 90-97

[Duc1999] Duc E., Lartigue C., Tournier C., Bourdet P., **New concept for the design and the manufacturing of free-form surfaces: the machining surface**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1999, Vol. 48 n°1, pp. 103-106

[Duc2002] Duc E., Lartigue C., Bourdet P., **Utilisation de l'interpolation polynomiale pour l'UGV - Cas de l'usinage à 5-axes**, Assises Françaises Machine Outils & Usinage Grande Vitesse, Lille, 13-14 Mars 2002, pp. 287-296

[Duflou2007] Duflou J., Tunckol Y., Szekeres A., Vanherck P., **Experimental study on force measurements for single point incremental forming**, Journal of Materials Processing Technology, 2007, Vol. 189 n°1-3, pp. 65-72

[Dugas2002] Dugas A., **CFAO et UGV : Simulation d'usinage de formes complexes**, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes, 2002

[Dugas2003] Dugas A., Lee J. J., Terrier M., Hascoet J. Y., **Development of a machining simulator considering machine behaviour**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, Vol. 217 n°9, pp. 1333-1339

[Erkorkmaz2001] Erkorkmaz K., Altintas Y., **High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, Vol. 41 n°9, pp. 1323-1345

[ESPRIT2000] ESPRIT, **Newsletter issue 2**, 2000, www.step-nc.org

[Feeney2003] Feeney A. B., Kramer T. R., Proctor F., Hardwick M., Loffredo D., **STEP_NC Implementation - ARM or AIM ?**, ISO TC184/SC4 WG3 N1223, mars, 2003, CD-Rom

[Filice2006] Filice L., Ambrogio G., Micari F., **On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring**, Annals of CIRP, 2006, Vol. 55 n°1, pp. 245-248

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Flores2007] Flores P., Duchene L., Bouffioux C., Lelotte T., Henrard C., Pernin N., Van Bael A., He S., Duflou J., Habraken A. M., **Model identification and FE simulations: Effect of different yield loci and hardening laws in sheet forming**, International Journal of Plasticity, 2007, Vol. 23 n°3, pp. 420-449

[Friant2005] Friant J., **Formage Incrémental**, Thèse de Master Sciences Mécaniques Appliquées, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes, 2005

[Furet2006] Furet B., Garnier S., Le Borgne D., **Plunge milling applied to aerospace machining**, International Conference on High Speed Milling, Metz (France), 2006, pp. 465-476

[Geldart2003] Geldart M., Webb P., Larsson H., Backstrom M., Gindy N., Rask K., **A direct comparison of the machining performance of a variax 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, Vol. 43 n°11, pp. 1107-1116

[Ghemraoui2006] Ghemraoui R., **Optimisation du processus de fabrication en Usinage à Grande Vitesse sur machine outil à structure parallèle**, Thèse de Master Sciences Mécaniques Appliquées, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes, 2006

[Guérin2004] Guérin S., **Nouvelles Stratégies d'Usinage en Ebauche – Trochoïdes et Tréflage**, édition CETIM, 2004

[Gunasekaran1999] Gunasekaran A., Love P. E. D., **A review of multimedia technology in manufacturing**, Computers in Industry, 1999, Vol. 38 n°1, pp. 65-76

[Hagan2004] Hagan E., Jeswiet J., **Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2004, Vol. 218 n°10, pp. 1307-1312

[Ham2006] Ham M., Jeswiet J., **Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003**, Annals of CIRP, 2006, Vol. 55 n°1, pp. 241-244

[Ham2007] Ham M., Jeswiet J., **Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007, Vol. 56 n°1, pp. 277-280

[Hao2005] Hao Q., Shen W., Wang L., **Towards a cooperative distributed manufacturing management framework**, Computers in Industry, 2005, Vol. 56 n°1, pp. 71-84

[Hascoet2000] Hascoet J. Y., Dugas A., Lee J. J., **High speed milling : Simulation considering machine and controller's limits**, International CIRP Seminar on Improving Machine Tool Performance, La Baule (France), Juillet, 2000, CD-Rom

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Hascoet2005] Hascoet J. Y., Rauch M., **Remote Control of a parallel kinematics machine tool in an e-manufacturing context**, Journal of Machine Engineering, 2005, Vol. 5 n°1-2, pp. 95-104

[Hascoet2006a] Hascoet J. Y., Mognol P., Rivette M., Rauch M., **STEP-NC applications for Milling and Rapid Prototyping**, 49th ISO TC 184/SC4 Meetings, Toulouse (France), 25-30 juin, 2006a, CD-Rom

[Hascoet2006b] Hascoet J. Y., Rauch M., **Trochoïdal milling and plunging strategies in rough pocket milling of aluminium alloys**, International Conference on High Speed Milling, Metz (France), 14-16 mars 2006b, pp. 649-661

[Hascoet2006c] Hascoet J. Y., Rauch M., **A new approach of the tool path generation in manufacturing operations using CNC data**, International Conference on High Speed milling, Suzhou (China), 11-13 mai 2006c, pp. 101-113

[Hascoet2006d] Hascoet J. Y., Rauch M., Friant J., **Agility in Manufacture: improvement of the quality in incremental sheet forming**, International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Grenoble (France), 17-19 mai, 2006d, CD-Rom

[Hascoet2007] Hascoet J. Y., Rauch M., Suh S. H., **Relevance of Step-Nc standard for high level toolpaths generation**, International Conference on High Speed Milling, San Sebastian (Espagne), 21-22 mars, 2007, CD-Rom

[Held1998] Held M., **Voronoi diagrams and offset curves of curvilinear polygons**, Computer-Aided Design, 1998, Vol. 30 n°4, pp. 287-300

[Hertel2002] Hertel A., **Requirement for parallel kinematics for powertrain manufacturing in the automotive industry**, 3rd Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, Chemnitz (Allemagne), avril 2002, pp. 753-762

[Hirt2003] Hirt G., Ames J., Bambach M., **Economical and ecological benefits of CNC incremental sheet forming**, International conference on ME (ICME), juin, 2003, CD-Rom

[Hirt2004] Hirt G., Ames J., Bambach M., Kopp R., **Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, Vol. 53 n°1, pp. 203-206

[Hussain2007] Hussain G., Gao L., Dar N. U., **An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming**, Journal of Materials Processing Technology, 2007, Vol. 186 n°1-3, pp. 45-53

[IRCAD2001] IRCAD, **"Operation Lindbergh" A World First in TeleSurgery: The Surgical Act Crosses the Atlantic!**, Conference de Presse, 19 Septembre, 2001, CD-Rom

[ISO_10303-238] **Norme ISO 10303-238 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration. Représentation et échange de données de produits. Partie**

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

238: Protocole d'application : Modèle d'application interprété pour les directeurs de commande numérique, ISO TC 184/SC4/WG3 N1534, 2004

[ISO_14649-11] **Norme ISO 14649-11 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Commande des dispositifs physiques -- Modèle de données pour les contrôleurs numériques informatisés -- Partie 11 : Données des procédés relatifs au fraisage**, ISO TC 184/SC1, 2004

[ISO_14649-12] **Norme ISO 14649-12 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Commande des dispositifs physiques -- Modèle de données pour les contrôleurs numériques informatisés -- Partie 12 : Données de procédé pour le tournage**, ISO TC 184/SC1, 2005

[Jeswiet2005a] Jeswiet J., Duflou J. R., Szekeres A., Lefebvre P., **Custom manufacture of a solar cooker - A case study**, Erlangen, Germany, Advanced Materials Research, mai 2005a, pp. 487-492

[Jeswiet2005b] Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J., **Asymmetric single point incremental forming of sheet metal**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005b, Vol. 54 n°2, pp. 623-649

[Jeswiet2005c] Jeswiet J., Young D., **Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet**, Journal of Engineering Manufacture, 2005c, Vol. 219-B, pp. 359-364

[Kim2002a] Kim B. H., Choi B. K., **Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path**, Computer-Aided Design, 2002a, Vol. 34 n°2, pp. 89-95

[Kim1996] Kim T.-Y., Kim J., **Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, Vol. 36 n°8, pp. 925-937

[Kim2002b] Kim Y. H., Park J. J., **Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal**, Journal of Materials Processing Technology, 2002b, Vol. 130-131, pp. 42-46

[Kimura2005] Kimura T., Kanda Y., **Development of a remote monitoring system for a manufacturing support system for small and medium-sized enterprises**, Computers in Industry, 2005, Vol. 56 n°1, pp. 3-12

[Ko2007] Ko J. H., Altintas Y., **Time domain model of plunge milling operation**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47 n°9, pp. 1351-1361

[Kopac2005] Kopac J., Kampus Z., **Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool**, Journal of Materials Processing Technology, 2005, Vol. 162-163, pp. 622-628

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Kramer2006] Kramer T. R., Proctor F., Xu X. W., Michaloski J. L., **Run-Time interpretation of STEP-NC: implementation and performance**, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, Vol. 19 n°6, pp. 495-507

[Küttner2004] Küttner R., Pohlak M., Majak J., **Modeling and optimal design of sheet metal RP&M Processes**, 10th European Forum on Rapid Prototyping, Paris (France), September 14-15, 2004, CD-Rom

[Kwong2003] Kwong W. C., Toncich D., Lee S. F., **Potential manufacturing productivity changes arising from the application of Internet-based technologies**, Journal of Materials Processing Technology, 2003, Vol. 139 n°1-3, pp. 35-39

[Laguionie2007] Laguionie R., **Programmation avancée des machines outils. Implémentation de l'usinage trochoïdal et du tréflage dans la chaîne numérique Step_NC**, Thèse de Master Sciences Mécaniques Appliquées, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes, 2007

[Lal2007] Lal S. P., Onwubolu G. C., **Three tiered web-based manufacturing system--Part 1: System development**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, Vol. 23 n°1, pp. 138-151

[Langeron2004] Langeron J. M., Duc E., Lartigue C., Bourdet P., **A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves**, CAD Computer Aided Design, 2004, Vol. 36 n°12, pp. 1219-1229

[Lartigue1999] Lartigue C., Duc E., Tournier C., **Machining of free-form surfaces and geometrical specifications**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1999, Vol. 213 n°1, pp. 21-27

[Lartigue2003] Lartigue C., Duc E., Affouard A., **Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelope surface**, CAD Computer Aided Design, 2003, Vol. 35 n°4, pp. 375-382

[Larue2005] Larue A., Altintas Y., **Simulation of flank milling processes**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, Vol. 45 n°4-5, pp. 549-559

[Lavernhe2006] Lavernhe S., **Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoires 5 axes UGV**, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2006

[Le Parc2004] Le Parc P., Vareille J., Marcé L., **Web based remote control of mechanical systems.**, 1st IFAC Symposium on Telematics Applications in Automation and Robotics, Helsinki, Juin, 2004, CD-Rom

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Le Parc2005] Le Parc P., Vareille J., Marcé L., **Long Distance Remote Control over internet: a Reliability Challenge**, Intelligent Machines and Factories, 2005, Vol. 5 n°1-2, pp. 222-231

[Lee2003a] Lee J., **E-manufacturing--fundamental, tools, and transformation**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003a, Vol. 19 n°6, pp. 501-507

[Lee2003b] Lee R. S., Tsai J. P., Kao Y. C., Lin G. C. I., Fan K. C., **STEP-based product modeling system for remote collaborative reverse engineering**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003b, Vol. 19 n°6, pp. 543-553

[Li2004a] Li W. D., Fuh J. Y. H., Wong Y. S., **An Internet-enabled integrated system for co-design and concurrent engineering**, Computers in Industry, 2004a, Vol. 55 n°1, pp. 87-103

[Li2000] Li Y., Liang S. Y., Petrof R. C., Seth B. B., **Force modelling for cylindrical plunge cutting**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, Vol. 16 n°12, pp. 863-870

[Li2004b] Li Y., Shao X., Li P., Liu Q., **Design and implementation of a process-oriented intelligent collaborative product design system**, Computers in Industry, 2004b, Vol. 53 n°2, pp. 205-229

[Li2004c] Li Z. Z., Zhang Z. H., Zheng L., **Feedrate optimization for variant milling process based on cutting force prediction**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004c, Vol. 24 n°7-8, pp. 541-552

[Liu2007] Liu Y., Guo X., Li W., Yamazaki K., Kashihara K., Fujishima M., **An intelligent NC program processor for CNC system of machine tool**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, Vol. 23 n°2, pp. 160-169

[Lopez de Lacalle2007] Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A., Sanchez J. A., Salgado M. A., **Toolpath selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surfaces milling**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47 n°2, pp. 388-400

[Lucas2006] Lucas T., **Le formage incrémental réalise des prototypes en acier**, L'Usine Nouvelle, 2006, Vol. 3026

[Luo1998] Luo T., Lu W., Krishnamurthy K., McMillin B., **A neural network approach for force and contour error control in multi-dimensional end milling operations**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, Vol. 38 n°10-11, pp. 1343-1359

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Maeder2002] Maeder W., Nguyen V. K., Richard J., Stark J., **Standardization of the Manufacturing Process: The IMS STEP-NC project**, IPLnet Workshop, Saas-Fee (Switzerland), 10-11 Septembre 2002, pp. 5.5/1-3

[Marescaux2002] Marescaux J., **Nom de code : "Operation Lindbergh"**, Annales de Chirurgie, 2002, Vol. 127 n°1, pp. 2-4

[Martin2001] Martin P., D'Acunto A., Schneider F., **Quelques aspects génie mécanique en intégration produit/process**, Congrès Français de Mécanique, Nancy (France), 3-7 septembre, 2001, CD-Rom

[Martin2006] Martin Y. S., Gimenez M., Rauch M., Hascoet J. Y., **VERNE – A New 5-Axes Hybrid Architecture Machining Centre**, 5th Chemnitzer Parallelkinematik Seminar, Chemnitz (Germany), April 25-26 2006, pp. 657-676

[Martinez2004] Martinez L., Collado V., **Calibration of a Hybrid Serial/Parallel 5-Axes Milling Machine Using a Double BallBar Probe**, 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chemnitz (Allemagne), mai 2004, pp. 137-150

[Matsubara2000] Matsubara S., Amino H., Aoyama S., Lu Y., **Apparatus for dieless forming plate materials**, Amino, EP 0 970 764 A1, 2000

[Merlet1997] Merlet J. P., **Les robots parallèles**, édition Hermès, 1997

[Merlet2002] Merlet J. P., **Still a long way to go on the road for parallel mechanisms**, ASME 27th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Montréal (Canada), 29 septembre – 2 octobre, 2002, CD-Rom

[Milfelner2005] Milfelner M., Kopac J., Cus F., Zuperl U., **Genetic equation for the cutting force in ball-end milling**, Journal of Materials Processing Technology, 2005, Vol. 164-165, pp. 1554-1560

[Murata1999] Murata A., **A New Trial on Incremental Forming of Sheet Metal Parts**, R&D Review of Toyota CRDL, 1999, Vol. 34 n°3

[Newman2003] Newman S. T., Allen R. D., R.S.U. R., **CAD/CAM solutions for STEP-compliant CNC manufacture**, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2003, Vol. 16 n°7-8, pp. 590-597

[Otkur2007] Otkur M., Lazoglu I., **Trochoidal milling**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47 n°9, pp. 1324-1332

[Parallemic] Parallemic, www.parallemic.org, date de consultation: août 2007

[Park2003] Park J.-J., Kim Y.-H., **Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique**, Journal of Materials Processing Technology, 2003, Vol. 140 n°1-3, pp. 447-453

[Patel2000] Patel A. J., Ehmann K. F., **Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, Vol. 40 n°4, pp. 489-512

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Pateloup2004] Pateloup V., Duc E., Ray P., **Corner optimization for pocket machining**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, Vol. 44 n°12-13, pp. 1343-1353

[Pateloup2005] Pateloup V., **Amélioration du comportement cinématique des machines outils UGV - Application au calcul de trajets d'évidement de poches**, Thèse de doctorat, Institut Français de Mécanique Avancée / Université Blaise Pascal, 2005

[Pohlak2005] Pohlak M., Kuttner R., Majak J., **Modelling and optimal design of sheet metal RP and M processes**, Rapid Prototyping Journal, 2005, Vol. 11 n°5, pp. 304-311

[POSTECH2003] POSTECH, **Korea STEP-NC : Next Generation of CNC System adapting STEP-NC system based on ISO14649**, 2003, diaporama Powerpoint

[PRAP] **Contrat de plan Etat-Région «Pôle de Recherches, développements et transferts technologiques dans la mise en oeuvre des matériaux pour l'amélioration de la productivité en fabrication mécanique », Thème «Maîtrise des processus de fabrication»**, 2000-2006

[Pritschow2002] Pritschow G., Eppler C., Gardber T., **Influence of the dynamic stiffness on the accuracy of PKM**, 3rd Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, Chemnitz (Allemagne), mai 2002, pp. 313-333

[Rahman1999] Rahman S. M., Sarker R., Bignall B., **Application of multimedia technology in manufacturing: a review**, Computers in Industry, 1999, Vol. 38 n°1, pp. 43-52

[Rauch2005] Rauch M., Caballero D., Hascoet J. Y., **Pilotage à distance d'une machine-outil à structure parallèle dans un contexte d'E-Manufacturing**, Congrès Français de Mécanique, Troyes (France), 29 août - 2 septembre, 2005, CD-Rom

[Rauch2007a] Rauch M., Hascoet J. Y., **Rough pocket milling with trochoïdal and plunging strategies**, International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2007a, Vol. 2 n°2, pp. 161-175

[Rauch2007b] Rauch M., Hascoet J. Y., **Génération de trajectoires de tréflage et d'usinage trochoïdal pour le vidage de poche**, Mécanique & Industries, 2007b, Vol. 8 n°5, pp. 445-453

[Richard2004] Richard J., Nguyen V. K., Stroud I., **Standardisation of the Manufacturing Process: IMS/EU STEP-NC project on the Wire EDM process**, International IMS Forum, Côme (Italie), 2004, pp. 1189-1196

[Ritou2006] Ritou M., **Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la broche**, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes, 2006

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Rivette2007] Rivette M., Rauch M., Hascoet J. Y., Mognol P., **Milling and Rapid Prototyping models for STEP-NC**, 51th ISO TC 184/SC4 Meetings, Funchal (Portugal), 26-30 mars, 2007, CD-Rom

[Sarma1999] Sarma S. E., **Crossing function and its application to zig-zag tool paths**, CAD Computer Aided Design, 1999, Vol. 31 n°14, pp. 881-890

[Schaefer2005] Schaefer T., Schraft R. D., **Incremental sheet metal forming by industrial robots**, Rapid Prototyping Journal, 2005, Vol. 11 n°5, pp. 278-286

[Schulz1997] Schulz H., **State of the art of high-speed machining**, 1st French and German Conference on High Speed Machining, Metz (France), Juin 1997, pp. 1-7

[Seo1997] Seo T. I., Dépincé P., Hascoet J. Y., **Paths Compensation For Tool Deflection In End Milling**, Ifac-Ims Intelligent Manufacturing Systems, Seoul (Korea), July 21-23, 1997, CD-Rom

[Seo1998] Seo T. I., **Intégration des effets de déformation d'outil en génération de trajectoires d'usinage**, Thèse de doctorat, Université de Nantes / Ecole Centrale de Nantes, 1998

[Shim2001] Shim M.-S., Park J.-J., **The formability of aluminum sheet in incremental forming**, Journal of Materials Processing Technology, 2001, Vol. 113 n°1-3, pp. 654-658

[Siemens2004] Siemens, **Fabrication de pièces complexes en fraisage**, édition 04/2004, Siemens AG, 2004

[Siemens2006] Siemens, **Sinumerik 840D Basic Functions, Function Manual**, édition 03/2006, Siemens AG, 2006

[SMT] SMT, **Tricept, Company presentation 03:03**, CD-Rom distribué à l'EMO, 2003, Milan (Italie)

[Sofotec2000] Sofotec, **L'organisation à grande vitesse**, Machines Production, 2000, Vol. 726 pp. 109

[Sofotec2001] Sofotec, **L'expert externe**, Machines Production, 2001, Vol. 738 pp. 50

[Sofotec2004] Sofotec, **Les méthodes externes**, Machines Production, 2004, Vol. 799 pp. 23

[Sokolov2006] Sokolov A., Richard J., Nguyen V. K., Stroud I., Maeder W., Xirouchakis P., **Algorithms and an extended STEP-NC-compliant data model for wire electro discharge machining based on 3D representations**, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, Vol. 19 n°6, pp. 603-613

[Song1999] Song J., Mou J. I., King C., **Error modelling and compensation for parallel kinematic machines**, dans "Parallel kinematic machines:

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

theoretical aspects and industrial requirement", Boer, C.R., Molinari-Tosatti, L., Smith, K.S., éditions Springer, 1999, pp. 170-187

[StepTools2007] StepTools, www.stepnc.org, 2007, date de consultation: aout 2007

[Stroud2006] Stroud I., Xirouchakis P., **Strategy features for communicating aesthetic shapes for manufacturing**, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, Vol. 19 n°6, pp. 639-649

[Suh1996] Suh S. H., Cho J. H., Hascoet J. Y., **Incorporation of Tool Deflection in Tool Path Computation: Simulation and Analysis**, SME J. of Manufacturing Systems, 1996, Vol. 15 n°3, pp. 190-199

[Suh2002] Suh S. H., Cheon S. U., **A Framework for an Intelligent CNC and Data Model**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, Vol. 19 n°10, pp. 727-735

[Suh2003] Suh S. H., Lee B. E., Chung D. H., Cheon S. U., **Architecture and implementation of a shop-floor programming system for STEP-compliant CNC**, Computer-Aided Design, 2003, Vol. 35 n°12, pp. 1069-1083

[Suh2006] Suh S. H., Hascoet J. Y., Mognol P., Rauch M., Rivette M., **Milling and Rapid Prototyping : proposal for STEP-NC**, 50th ISO TC 184/SC4 Meetings, Hershey (USA), 22-27 octobre, 2006, CD-Rom

[Tang1998] Tang K., Chou S.-Y., Chen L.-L., **An algorithm for reducing tool retractions in zigzag pocket machining**, Computer-Aided Design, 1998, Vol. 30 n°2, pp. 123-129

[Terrier2004] Terrier M., Dugas A., Hascoet J. Y., **Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, Vol. 44 n°7-8, pp. 865-877

[Terrier2005a] Terrier M., **Optimisation du processus de fabrication en usinage à grande vitesse sur machines-outils à structure parallèle**, Thèse de doctorat, Université de Nantes / Ecole Centrale de Nantes, 2005a

[Terrier2005b] Terrier M., Gimenez M., Hascoet J. Y., **VERNE - A five-axis parallel kinematics milling machine**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2005b, Vol. 219 n°3, pp. 327-336

[Tuomi2004] Tuomi J., Lamminen L., **Incremental Sheet Forming as a Method for Sheet Metal Component Prototyping and Manufacturing**, 10e Assises Européennes de Prototypage Rapide, Paris (France), 14-15 septembre, 2004, CD-Rom

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

[Wakaoka2002] Wakaoka S., Yamane Y., Sekiya K., Narutaki N., **High-speed and high-accuracy plunge cutting for vertical walls**, Journal of Materials Processing Technology, 2002, Vol. 127 n°2, pp. 246-250

[Wang2004] Wang L., Orban P., Cunningham A., Lang S., **Remote real-time CNC machining for web-based manufacturing**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, Vol. 20 n°6, pp. 563-571

[Weck2000] Weck M., Staimer D., **On the accuracy of parallel kinematic machine tools: design, compensation and calibration**, 2nd Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, Chemnitz (Allemagne), janvier 2000, pp. 73-84

[Weck2002] Weck M., Staimer D., **Parallel Kinematic Machine Tools - Current State and Future Potentials**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002, Vol. 51 n°2, pp. 671-683

[Xu2004] Xu X. W., He Q., **Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, Vol. 20 n°2, pp. 101-109

[Xu2005] Xu X. W., Wang H., Mao J., Newman S. T., Kramer T. R., Proctor F. M., Michaloski J. L., **STEP-compliant NC research: The search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration**, International Journal of Production Research, 2005, Vol. 43 n°17, pp. 3703-3743

[Xu2006] Xu X. W., Newman S. T., **Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent--a review of the technologies**, Computers in Industry, 2006, Vol. 57 n°2, pp. 141-152

[Yang2004] Yang S.-H., Kim K.-H., Park Y. K., **Measurement of spindle thermal errors in machine tool using hemispherical ball bar test**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, Vol. 44 n°2-3, pp. 333-340

[Yao2003] Yao Z., Gupta S. K., Nau D. S., **Algorithms for selecting cutters in multi-part milling problems**, CAD Computer Aided Design, 2003, Vol. 35 n°9, pp. 825-839

[Zhang2006] Zhang D., Wang L., Esmailzadeh E., **PKM capabilities and applications exploration in a collaborative virtual environment**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, Vol. 22 n°4, pp. 384-395

[Zuperl2005] Zuperl U., Cus F., Milfelner M., **Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling**, Journal of Materials Processing Technology, 2005, Vol. 164-165, pp. 1472-1478

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009

OPTIMISATION DE LA PROGRAMMATION DES MOCN
-
APPLICATION AUX MACHINES A STRUCTURE PARALLELE

Résumé :

Les travaux de recherche présentés visent à définir des voies d'optimisation concernant la programmation des MOCN liées au développement des machines à structure parallèle. Nous avons identifié quatre axes de recherche permettant d'adapter la programmation de la machine à l'application visée.

Le premier axe traite de la préparation de la fabrication, en particulier le choix de la stratégie d'usinage, en évaluant le potentiel de nouvelles trajectoires (tréflage et usinage trochoïdal) et en définissant des fenêtres de performance pour les principales stratégies d'usinage en fonction des aptitudes de la machine employée. Le deuxième axe se focalise sur le formage incrémental, procédé émergent. Nous montrons que le recours à une programmation adaptée améliore la mise en œuvre de ce procédé et que les voies d'optimisation sont fonction des capacités de la MOCN choisie. Au cours du troisième axe, nous proposons une nouvelle approche de programmation avancée des parcours d'outil, la méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing). Elle permet d'optimiser la programmation implémentée en s'appuyant sur une évaluation par le DCN de données process en cours de fabrication. Le quatrième axe porte enfin sur les évolutions à moyen terme de la programmation en s'intéressant d'un côté aux mutations de l'environnement des MOCN générées par le développement de l'e-manufacturing et d'un autre côté à la mise en place d'un nouveau standard de programmation des machine outils, le format Step_NC. Ce dernier constitue un cadre idéal aux optimisations proposées pour les autres axes de recherche, en plus de conduire à de nouvelles avancées en programmation des MOCN.

Mots-clés : Machine outil à structure parallèle – Génération de trajectoires – Tréflage – Usinage Trochoïdal – Formage Incrémental – Programmation avancée de MOCN – e-manufacturing – Step_NC

OPTIMISATION OF CNC MACHINE TOOL PROGRAMMING
-
APPLICATION TO PARALLEL KINEMATICS MACHINES

Abstract:

These research works aim to define new optimisation ways for CNC machine tool programming that are enabled by the development of parallel kinematics milling machines. Four research axes were identified.

The first one deals with the preparing of machining operations and evaluates the implementation of new milling tool paths (plunge milling and trochoïdal milling) on parallel NC machine tools. The main object is to determine the best milling strategy according to the application constraints and the employed machining mean. Then, the second axis focuses on incremental sheet forming which is an emerging manufacturing process that can be carried out on milling machine tools. We prove that an adapted programming of the toolpath can strongly optimise its implementation. Moreover its capability depends on the one of the selected machine tool. On the third axis, we propose a new toolpath programming approach, called ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing). It optimises the machining programming thanks to an evaluation of process data made into the CNC. Finally, the fourth axis proposes two evolutions for CNC programming. The first one deals with the rise of e-manufacturing and its consequences on the environment and the use of NC machine tools. The second one presents the development of a new data standard, Step_NC. This latest stands for the ideal background regarding to the optimisations proposed about the other research axes, while leading to further progress in NC programming.

Keywords: Parallel kinematics machine tool – Tool path generation – Plunge Milling – Trochoïdal Milling – Incremental Sheet Forming – Advanced NC programming – e-manufacturing – Step-NC

Discipline : Sciences de l'Ingénieur

tel-00429692, version 1 - 4 Nov 2009