



Intégration de la programmation basée entités pour la fabrication sur machines à commandes numériques dans un contexte multi-process

Raphael Laguionie

► To cite this version:

Raphael Laguionie. Intégration de la programmation basée entités pour la fabrication sur machines à commandes numériques dans un contexte multi-process. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Nantes (ECN) (ECN) (ECN) (ECN), 2010. Français. <tel-00592138>

HAL Id: tel-00592138

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00592138>

Submitted on 11 May 2011

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.

Ecole Centrale de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR, GEOSCIENCES, ARCHITECTURE

Année 2010

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

RAPHAËL LAGUIONIE

Le 17 Novembre 2010
à l'École Centrale de Nantes

INTÉGRATION DE LA PROGRAMMATION BASÉE ENTITÉS POUR LA FABRICATION SUR MACHINES À COMMANDES NUMÉRIQUES DANS UN CONTEXTE MULTI-PROCESS

JURY

Président : Mme Claire LARTIGUE, Professeur des universités, LURPA, IUT de Cachan

Rapporteurs : M. Emmanuel DUC, Professeur des universités, LaMI, IFMA
M. Lionel ROUCOULES, Professeur des universités, LSIS, Arts et Métiers ParisTech – CER Aix en Provence

Examineurs : M. Jean-Yves HASCOËT, Professeur des universités, IRCCyN, ECN
M. Matthieu RAUCH, Maître de conférences, IRCCyN, ECN
M. Ian A. STROUD, Professeur Assistant, LICP, EPFL

Directeur de thèse : Jean-Yves HASCOËT
Laboratoire : IRCCyN – Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes

N° ED 498-144

« Qui pense peu, se trompe beaucoup »

Léonard de Vinci

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués à l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, dirigé par Michel Malabre. Je tiens à le remercier ainsi que l'ensemble de son équipe pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je souhaite ensuite remercier Jean-Yves Hascoët pour la qualité de son encadrement. Il a été, en temps que directeur de thèse, un référent scientifique indéniable et a su me guider par sa vision omnisciente et novatrice. Au-delà de ses qualités scientifiques, je tiens particulièrement à le remercier pour sa confiance sans faille, ses valeurs humaines, sa disponibilité, sa rigueur et son écoute. J'ai beaucoup appris à son contact.

Je remercie aussi Matthieu Rauch avec qui j'ai été amené à travailler durant ces trois années. Il a été très présent au jour le jour pour que nous puissions échanger nos idées sur le sujet, même à l'autre bout du monde. Au-delà de sa disponibilité, de ces qualités humaines et scientifiques, nos relations amicales ont participé à mon épanouissement dans le cadre du travail mais aussi en dehors.

Mes remerciements vont également aux membres du jury : Claire Lartigue pour m'avoir fait l'honneur d'assurer la présidence, Emmanuel Duc et Lionel Roucoules pour avoir accepté de rapporter mes travaux et pour m'avoir proposé des retours sur la base d'une discussion scientifique constructive et Ian Stroud pour son expertise dans les domaines traités.

Ce travail de thèse n'aurait pas eu la même consistance sans le support informatique de Gilles Carabin. Je le remercie particulièrement pour sa disponibilité et son implication dans le projet. Je remercie aussi Thierry Broquin pour son support technique.

Une pensée particulière pour Eric Bossard qui a aussi participé à la réalisation technique de ces travaux.

Je remercie aussi l'ensemble des membres de l'équipe MO2P avec qui j'ai eu le plaisir de partager et d'échanger durant ces trois années. En particulier mes collègues de bureau Matthieu Rauch, Mickaël Rivette, Jonathan Lecompte, Aude Caillaud, Coralie Germain et David Noël : chacun a participé à l'ambiance conviviale de ce lieu.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel du département IPSI de l'Ecole Centrale de Nantes et en particulier l'équipe enseignante avec qui j'ai passé d'agréables moments. Je remercie en particulier mon tuteur pédagogique Olivier Legoff ainsi que Stéphane Tichadou pour ses conseils, sa disponibilité et ses encouragements.

Un grand merci aux collègues amis qui ont partagé une partie de mon quotidien durant ces trois années : Jonathan, Benjamin, Maxime, François, Florent, Julien, Philippe, Roland, Coralie, David, Erwan, Catherine, Emilie, Matthieu, Olivier, Mickaël, Sylvain, Côme... Une pensée toute particulière à Grég...

Je remercie aussi l'ensemble de mes amis de plus longue date qui m'ont permis de maintenir un équilibre nécessaire lors de la réalisation d'un projet comme la thèse. Je remercie en particulier Fred, Simon, Solène et l'ensemble des Clermontois, Max, Flavien, Marion et l'ensemble des Cachanais, Kzou, Renan, François et l'ensemble des Ker-lannais, Moon, Robert, Anaïs et l'ensemble des Montluçonnais. Merci aussi à Anne-Frieda qui a su éclairer ma fin de thèse.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble de ma famille et en particulier mes parents pour leur support inconditionnel. Vous m'avez toujours encouragé à aller plus loin dans les domaines qui me plaisent, je vous en suis reconnaissant aujourd'hui. Enfin, rien n'aurait été possible sans mes grands-parents paternels et maternels à qui je dédie cette thèse.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	1
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	5
ABREVIATIONS.....	9
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.....	11
1.1 INTRODUCTION GENERALE - CONTEXTE INDUSTRIEL	11
1.2 PROBLEMATIQUE GENERALE ET CONTRIBUTIONS	13
1.2.1 <i>Axe 1 : Intégrer la programmation basée entités</i>	13
1.2.2 <i>Axe 2 : Evolution du système de fabrication</i>	14
1.2.3 <i>Axe 3 : Prise en compte d'un contexte multi-process</i>	14
1.2.4 <i>Axe 4 : Ouverture au milieu industriel et validation des concepts</i>	15
1.3 CONTEXTE DE L'ETUDE	16
1.4 PLAN DE LECTURE DE LA THESE	17
CHAPITRE 2. PROGRAMMATION AVANCEE DES MACHINES A COMMANDE NUMERIQUE	19
2.1 LA CHAINE NUMERIQUE DE FABRICATION	20
2.1.1 <i>Modèles courants</i>	20
2.1.2 <i>Le DCN dans la chaîne numérique de fabrication</i>	22
2.1.2.1 Présentation des DCN actuels.....	22
2.1.2.2 CN ouvertes	25
2.1.2.3 CN virtuelles	27
2.1.3 <i>Discussion</i>	27
2.2 ECHANGES DES DONNEES AU SEIN DE LA CHAINE NUMERIQUE DE FABRICATION	28
2.2.1 <i>Echanges au sein de la suite CFAO</i>	28
2.2.2 <i>De la FAO à la CN</i>	29
2.2.2.1 La programmation actuelle des MOCN de la FAO à la CN	29
2.2.2.2 Programmation hors ligne : Langage Type, post-processeurs et code G	31
2.2.2.3 Programmation propriétaire conversationnelle machine.....	33
2.2.2.4 Discussion.....	35
2.2.3 <i>Feed-back de la CN vers la CFAO</i>	35
2.2.4 <i>Les lacunes de l'ISO 6983 (code G)</i>	36
2.2.5 <i>Discussions et évolutions de la programmation des MOCN</i>	36
2.3 STEP-NC : LE STANDARD DE REFERENCE POUR LA PROGRAMMATION BASEE ENTITES	38
2.3.1 <i>Une nouvelle vision de la chaîne numérique</i>	38
2.3.2 <i>Les apports de la programmation basée entités</i>	39
2.3.3 <i>Une recherche internationale, universitaire et industrielle</i>	40
2.4 LE STANDARD STEP-NC	43

2.4.1	<i>Le standard STEP</i>	43
2.4.1.1	Objectifs de STEP	43
2.4.1.2	Modélisation EXPRESS.....	44
2.4.1.3	Structure de STEP et protocoles d'application	45
2.4.2	<i>Normalisation de STEP-NC</i>	47
2.4.2.1	Modèle interprété (AIM) et modèle de référence (ARM).....	47
2.4.2.2	Structure de la norme ISO 14649	48
2.4.2.3	Syntaxe d'un programme STEP-NC ISO 14649.....	49
2.4.2.4	Méthode d'implémentation STEP Part 21 et Part 28.....	52
2.5	TRAVAUX S'APPUYANT SUR LE STANDARD STEP-NC	53
2.5.1	<i>Un enjeu majeur : l'interopérabilité</i>	53
2.5.2	<i>Une programmation basée sur la notion d'entités</i>	54
2.5.3	<i>Planification du processus de fabrication (CAPP)</i>	55
2.5.4	<i>Interprétation, exécution et contrôle de la fabrication à partir de STEP-NC</i>	56
2.5.4.1	Les systèmes conventionnels utilisant STEP-NC	56
2.5.4.2	Les contrôleurs interprétant STEP-NC	58
2.5.4.3	Les systèmes STEP-NC avancés, intelligents et collaboratifs.....	60
2.5.5	<i>Inspection et fabrication en boucle fermée</i>	63
2.6	CONCLUSIONS ET DISCUSSION	65
CHAPITRE 3. INTEGRATION DE LA PROGRAMMATION BASEE ENTITES STEP-NC		67
3.1	PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE DE L'ETUDE	67
3.2	PLACE DE LA CN DANS LA CHAINE NUMERIQUE STEP-NC [LAGUIONIE'09A]	68
3.2.1	<i>Introduction du concept de CN étendue</i>	68
3.2.2	<i>Vers la programmation avancée des MOCN</i>	71
3.2.2.1	Programmation STEP-NC Interprétée	72
3.2.2.2	Programmation STEP-NC Intégrée	72
3.2.2.3	Programmation STEP-NC Avancée.....	73
3.3	CONTRIBUTIONS A L'EVOLUTION DU STANDARD STEP-NC	74
3.4	INTEGRATION DE STRATEGIES D'USINAGE INNOVANTES AU STANDARD STEP-NC [LAGUIONIE'08A]	74
3.4.1	<i>Les stratégies d'usinage actuelles dans la norme STEP-NC</i>	75
3.4.2	<i>Présentation des trajectoires à motifs : applications à l'usinage trochoïdal et au tréflage</i>	77
3.4.2.1	Présentation de l'usinage trochoïdal.....	77
3.4.2.2	Présentation du tréflage.....	78
3.4.2.3	Description par trajectoires à motifs.....	79
3.4.3	<i>Proposition d'intégration au standard STEP-NC</i>	81
3.4.4	<i>Validation de la proposition et mise en œuvre [Laguionie'08b]</i>	83
3.4.4.1	Génération de programmes STEP-NC intégrant les stratégies à motifs : implémentation dans le logiciel PosSFP	83
3.4.4.2	Mise au point d'un interpréteur.....	86
3.4.4.3	Mise en œuvre pratique	88
3.4.5	<i>Conclusion</i>	90
3.5	ELABORATION D'UN MODELE FONCTIONNEL DES MOCN : ISO 14649 PART 110 [LAGUIONIE'09D].	90

3.5.1	<i>Nécessité d'un modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN</i>	91
3.5.2	<i>Construction et normalisation du MTFM</i>	91
3.5.3	<i>Cas d'utilisation proposés et intégration au modèle</i>	94
3.5.3.1	<i>Cas d'utilisation liés à la simulation de l'usinage</i>	94
3.5.3.2	<i>Spécificités fonctionnelles des machines à structure parallèle</i>	97
3.5.3.3	<i>Intégration au modèle</i>	98
3.5.4	<i>Conclusion</i>	100
3.6	CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS	101
CHAPITRE 4. SYSTEME ETENDU DE FABRICATION INTEGREE.....		103
4.1	PROBLEMATIQUE	103
4.2	PRESENTATION DU SYSTEME ETENDU DE FABRICATION XMIS	104
4.2.1	<i>Contexte d'entreprise</i>	104
4.2.2	<i>Présentation du système étendu de fabrication intégrée (XMIS)</i>	107
4.2.3	<i>Structure et unités intégrées au système XMIS</i>	108
4.3	ÉCHANGES DES DONNEES DANS XMIS.....	110
4.3.1	<i>Standards ICT, OC et CN</i>	110
4.3.2	<i>Données CN génériques et données CN optimisées pour une machine</i>	111
4.4	GESTION DE DONNEES DE PRODUCTION	113
4.4.1	<i>Pipeline d'échange des données de fabrication (MIP)</i>	114
4.4.2	<i>Usine numérique de production avec le système XMIS</i>	116
4.4.3	<i>Conclusion, apports et discussion</i>	117
4.5	CAO ETENDUE ET CN ETENDUE.....	119
4.5.1	<i>Intégration du système étendu de fabrication</i>	120
4.5.2	<i>CAO étendue (XCAD)</i>	121
4.5.3	<i>CN étendue (XCNC) [Laguionie'10]</i>	122
4.6	INTEGRATION DE XCNC DANS UN CONTEXTE INDUSTRIEL ET APPORTS	124
4.7	CONCLUSION	127
CHAPITRE 5. INTEGRATION DU CONTEXTE MULTI-PROCESS.....		129
5.1	PROBLEMATIQUE	129
5.2	PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE	130
5.2.1	<i>Définition du domaine d'étude multi-process</i>	130
5.2.2	<i>La programmation actuelle des différents procédés</i>	130
5.2.2.1	<i>Chaîne numérique basée code G actuelle</i>	130
5.2.2.2	<i>Machines multi-process</i>	132
5.2.2.3	<i>Discussion</i>	132
5.2.3	<i>STEP-NC : un standard commun à différents procédés</i>	133
5.2.4	<i>Domaines de compétence et fabrication par ajout de matière</i>	134
5.3	PROGRAMMATION D'ENTITES MULTI-PROCESS STEP-NC.....	136
5.3.1	<i>Présentation du concept</i>	136
5.3.2	<i>Construction de données STEP-NC multi-process</i>	138
5.3.3	<i>Apports de l'approche basée entités multi-process</i>	140

5.4 CONCEPT D'ESPACE DE SIMULATION DANS UN ENVIRONNEMENT MULTI-PROCESS [LAGUIONIE'09C]	142
5.4.1 Modélisation d'un environnement global de simulation.....	142
5.4.2 Interactions entre espaces de simulation.....	144
5.4.3 Apports du concept d'espaces de simulation.....	145
5.5 MISE EN ŒUVRE DES OUTILS DE SIMULATION DANS LA CHAÎNE NUMÉRIQUE STEP-NC	
[LAGUIONIE'10]	146
5.5.1 Illustration des relations inter-process par un cas d'étude.....	147
5.5.2 Implémentation dans la chaîne STEP-NC IRCCyN.....	149
5.6 DISCUSSION ET CONCLUSION.....	152
CHAPITRE 6. MISE EN ŒUVRE DANS UN ENVIRONNEMENT MULTI-PROCESS	155
6.1 PROBLÉMATIQUE	155
6.2 PLATE-FORME D'IMPLEMENTATION SPAIM	156
6.2.1 Situation vis-à-vis de l'existant.....	156
6.2.2 Contexte de l'étude et méthode d'implémentation choisie.....	157
6.3 INTERFACE CN ETENDUE : CAS DU FRAISAGE [LAGUIONIE'09B]	158
6.3.1 Présentation de la plate-forme SPAIM.....	158
6.3.2 Architecture de la plate-forme.....	159
6.3.2.1 Vue générale.....	159
6.3.2.2 Interface homme-machine (IHM)	160
6.3.2.3 Module de génération des trajectoires.....	161
6.3.2.4 Outils et modèle fonctionnel de la machine	162
6.3.3 Simulation et optimisation « process » pour le fraisage.....	163
6.3.4 Pièces tests.....	165
6.3.4.1 Pièce 2D½.....	166
6.3.4.2 Pièce aéronautique.....	170
6.3.5 Chaîne numérique réalisée, apports et discussions	178
6.4 SPAIM : SYSTEME INTEGRE DE FABRICATION ETENDUE DANS UN CONTEXTE MULTI-PROCESS	
[LAGUIONIE'10]	181
6.4.1 Intégration de la fabrication additive.....	181
6.4.2 Exemples d'application.....	183
6.4.2.1 Exemple 1 : traitement des entités spécifiques à la fabrication additive	183
6.4.2.2 Exemple 2 : matrice d'emboutissage réalisée en multi-process	186
6.4.3 Architecture étendue de la plate-forme SPAIM et apports.....	189
6.5 CONCLUSION ET DISCUSSIONS	192
CHAPITRE 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	195
7.1 SYNTHÈSE DES TRAVAUX	195
7.2 CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS	198
7.3 PERSPECTIVES.....	200
BIBLIOGRAPHIE.....	203

Table des illustrations

Figure 1 : Difficultés d’interopérabilité dans la chaîne numérique [Etude'06]	12
Figure 2 : Vue d’ensemble schématique de l’organisation du manuscrit	17
Figure 3 : Modèles courants de systèmes de fabrication	21
Figure 4 : Composants d’un système MOCN.....	23
Figure 5 : Représentation simplifiée de la chaîne numérique actuelle	28
Figure 6 : Séquence de traitement de la CAO à la pièce usinée.....	30
Figure 7 : Méthodes de programmation des MOCN	30
Figure 8 : Exemple de programmation code G	32
Figure 9 : Etapes de la programmation conversationnelle machine [Suh'08a]	34
Figure 10 : Evolutions de la programmation des MOCN [Newman'07].....	37
Figure 11 : La chaîne numérique STEP-NC	38
Figure 12 : Comparaison code G (ISO 6983) et STEP-NC (ISO 14649).....	39
Figure 13 : Une recherche STEP-NC internationale industrielle et universitaire.....	42
Figure 14 : Exemple de fichier EXPRESS physique	44
Figure 15 : Représentation graphique EXPRESS-G [Sardet'99].....	45
Figure 16 : Schéma du cycle de développement un protocole d’application.....	46
Figure 17 : Organisation de la norme ISO 14 649 et relations avec ISO 10 303	48
Figure 18 : Structure d’un programme STEP-NC [ESPRIT'00].....	50
Figure 19 : Exemple de programme STEP-NC	51
Figure 20 : Organisation d’un fichier STEP-NC en EXPRESS-G	51
Figure 21 : Systèmes de production interopérables [Newman'08].....	53
Figure 22 : Chaîne numérique proposée par STEP Tools Inc. [IMS'03]	57
Figure 23 : Interface graphique Siemens ShopMill STEP-NC [Weck'01].....	58
Figure 24 : Architecture contrôleur Siemens interfacé STEP-NC.....	59
Figure 25 : Etapes de mise en œuvre de la plate-forme de PosTech [Rauch'07].....	61
Figure 26 : Process sequence graph [Suh'03]	61
Figure 27 : Prototype Coréen STEP-NC	62
Figure 28 : Application STEP-NC avec feed-back de l’information [Denkena'02].....	64
Figure 29 : Place de la CN étendue dans la chaîne numérique STEP-NC	69
Figure 30 : Principe de l’approche ICAM [Rauch'07].....	70
Figure 31 : Programmation STEP-NC interprétée	72

Figure 32 : Programmation STEP-NC intégrée	73
Figure 33 : Programmation STEP-NC avancée.....	73
Figure 34 : Stratégies d'usinage disponibles dans STEP-NC.....	75
Figure 35 : Stratégies d'usinage et attributs associés dans STEP-NC.....	76
Figure 36 : Trajectoire outil trochoïdale et pièce usinée	78
Figure 37 : Trajectoire outil de tréflage et pièce usinée.....	78
Figure 38 : Attributs de construction par stratégies à motifs de l'usinage trochoïdal et du tréflage	80
Figure 39 : Intégration des stratégies à motifs dans le standard STEP-NC	81
Figure 40 : Intégration EXPRESS-G des stratégies à motifs dans STEP-NC	82
Figure 41 : Etapes de fonctionnement du logiciel STEP-NC.....	84
Figure 42 : Fenêtres de choix des attributs des stratégies à motifs implémentées.....	85
Figure 43 : Données STEP-NC intégrant les stratégies à motifs.....	86
Figure 44 : Chaîne interprétée STEP-NC proposée intégrant les stratégies à motifs	86
Figure 45 : Exemples de trajectoires générées par l'interpréteur STEP-NC.....	88
Figure 46 : Usinage trochoïdal d'entités poches avec STEP-NC	88
Figure 47 : Système harmonisé des stades pour l'élaboration des normes	93
Figure 48 : Etapes d'intégration des cas d'utilisation au modèle fonctionnel	94
Figure 49 : Simulateur UGV développé à l'IRCCyN.....	95
Figure 50 : Mise en œuvre de la méthode ICAM	96
Figure 51 : Machine à structure parallèle Fatronik Verne	97
Figure 52 : Cas d'utilisation au sein des activités de fabrication [Suh'09].....	98
Figure 53 : Modèle d'application et d'activité du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN [Suh'09]	99
Figure 54 : Exemple d'intégration des cas d'utilisation au MTFM	100
Figure 55 : Vue schématisée des principaux axes du PLM.....	105
Figure 56 : Domaine d'étude du système XMIS au sein des outils PLM.....	107
Figure 57 : Vue d'ensemble des domaines d'activité de XMIS au sein du PLM.....	108
Figure 58 : Données STEP-NC génériques et optimisées pour une machine dans XMIS	112
Figure 59 : Echange des données au sein de XMIS	114
Figure 60 : Projet collaboratif de production avec XMIS.....	116
Figure 61 : Vision actuelle et vision proposée de la chaîne numérique.....	120
Figure 62 : XCAD et XCNC au sein du système XMIS.....	120
Figure 63 : Vue d'ensemble de la CN étendue XCNC.....	123

Figure 64 : Axes d'implémentation privilégiés au sein de la CN étendue.....	125
Figure 65 : Plate-forme SPAIM intégrée sur une CN industrielle Siemens 840D.....	126
Figure 66 : Programmation actuelle des process de fabrication	131
Figure 67 : Chaîne numérique intégrée STEP-NC multi-process	133
Figure 68 : Principes et mise en œuvre du formage incrémental sur MOCN	134
Figure 69 : Exemple d'entités spécifiques aux procédés par ajout de matière.....	136
Figure 70 : Chaîne numérique STEP-NC multi-process.....	137
Figure 71 : Intégration du contexte multi-process dans STEP-NC.....	138
Figure 72 : Séquence combinée fabrication additive et usinage pour la réalisation d'une entité.....	139
Figure 73 : Pièce multi-process traitée avec la plate-forme d'application STEP-NC	141
Figure 74 : Modélisation en espaces de simulation.....	143
Figure 75 : Evaluation de la complexité de fabrication et réflexion inter-process ...	147
Figure 76 : Exemple de simulations inter-process	149
Figure 77 : Intégration modulaire au sein du système de fabrication IRCCyN.....	151
Figure 78 : Plate-forme SPAIM dans un contexte multi-process	153
Figure 79 : CN étendue de la plate-forme SPAIM implémentée à l'IRCCyN	159
Figure 80 : Architecture de la CN étendue SPAIM	160
Figure 81 : Interface homme-machine de la CN étendue SPAIM et arborescence des données STEP-NC	161
Figure 82 : Visualisation des trajectoires outils	161
Figure 83 : Description des outils au sein de la CN étendue SPAIM.....	163
Figure 84 : Intégration des modules de simulation et optimisation dans la chaîne numérique SPAIM	164
Figure 85 : Pièce test 2D½ entièrement décrite à partir des données STEP-NC	166
Figure 86 : Pièce test 2D½ traitée au sein de la CN étendue SPAIM.....	166
Figure 87 : Exemple de modifications au sein de la CN étendue	167
Figure 88 : Modification de la géométrie des entités au sein de l'arborescence des données STEP-NC	168
Figure 89 : Création d'entités à partir de l'interface SPAIM	169
Figure 90 : Pièce aéronautique développée pour la recherche STEP-NC	170
Figure 91 : Choix des entités d'ébauche pour la programmation STEP-NC.....	171
Figure 92 : Principales étapes de l'usinage de la pièce aéronautique.....	172
Figure 93 : Génération des trajectoires à partir des données STEP-NC	173
Figure 94 : Simulation du comportement réel de la machine.....	174

Figure 95 : Implémentation proposée du simulateur UGV au sein de la CN étendue	175
Figure 96 : Ebauche des trois poches programmées en STEP-NC au sein de la CN étendue	176
Figure 97 : Modification des attributs de fabrication traitée au sein de la CN étendue	177
Figure 98 : Pièce test aéronautique usinée	178
Figure 99 : Chaîne numérique STEP-NC réalisée au sein de la plate-forme SPAIM	179
Figure 100 : Principe de fonctionnement de la tête de fusion laser de poudre.....	182
Figure 101 : Chaîne numérique SPAIM multi-process	182
Figure 102 : Pièces test comportant des canaux conformes.....	184
Figure 103 : Intégration actuelle des possibilités de traitement multi-process.....	184
Figure 104 : Association multi-process dans la CN étendue SPAIM	186
Figure 105 : Modèle de la matrice d'emboutissage étudiée.....	186
Figure 106 : Traitement de la matrice d'emboutissage par la CN étendue SPAIM..	187
Figure 107 : Réalisation de la matrice d'emboutissage.....	188
Figure 108 : Déformation d'une plaque support liée aux effets thermiques	188
Figure 109 : Application du système étendu de fabrication intégrée avec SPAIM ...	190

Abréviations

AAM	Application Activity Model
AIM	Application Interpreted Model
AM	Additive Manufacturing ou fabrication par Ajout de Matière
AP	Application Protocol
APT	Automatically Programmed Tool
ARM	Application Reference Model
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CAPP	Computer Aided Process Planning
CFAO	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CL	Cutter Location
CN	Commande Numérique
CRM	Customer Relationship Management
DCN	Directeur de Commande Numérique
EDM	Electrical Discharge Machining
Ei	Espace de simulation « inter-process »
Empp	Espace de simulation « multi-process planning »
Ep	Espace de simulation « process »
ERP	Enterprise Resource Planning
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
GDT	Gestion des Données Techniques
ICAM	Intelligent Computer Aided Manufacturing
ICT	Information and Communication Technologies
IGES	Initial Graphics Exchange Standards
IHM	Interface Homme-Machine
IRCCyN	Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes
ISO	International Standard Organization
MES	Manufacturing Execution System
MIP	Manufacturing Information Pipeline
MKW DB	Manufacturing Knowledge Warehouse Data Base

MO2P	Modélisation et Optimisation des Process de Production
MRP	Manufacturing Ressource Planning
MTFM	Machine Tools Functional Model
NCK	Numerical Control Kernel
NIST	National Institute for Standardization
NURBS	Non Uniform Rational Basis Splines
NWIP	New Work Item Proposal
OAC	Open Architecture Control
OC	Open Communication
OEM	Original Equipment Manufacturer
PAU	Process Analysis Unit
PCU	Process Control Unit
PDM	Product Data Management
PDU	Process Diagnosis Unit
PLC	Programmable Logic Control
PLM	Product Lifecycle Management
PosSFP	PosTECH Shop Floor Programming system
PPU	Project Production Unit
PU	Planning Unit
SCM	Supply Chain Management
SPAIM	STEP NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing
STEP NC	STEP compliant Numerical Control
STEP	Standard for the Exchange of Product data model
TCP	Tool Center Programming
TPDB	Tool Paths Data Base
UGV	Usinage Grande Vitesse
UML	Unified Modeling Language
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie
XCAD	eXtended Computer Aided Design ou CAO étendue
XCNC	eXtended Computer Numerical Control ou CN étendue
XMIS	eXtended Manufacturing Integrated System
XML	eXtensible Markup Language

Chapitre 1. Introduction

1.1 Introduction générale - Contexte industriel

Les évolutions techniques et économiques de ces dernières décennies ont conduit à de profondes mutations des systèmes de production industriels. L'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et la démocratisation d'Internet pour le consommateur comme au sein de l'entreprise ont accéléré la globalisation des échanges et de la production. L'entreprise n'est aujourd'hui plus localisée et l'implantation physique de ses différentes composantes est souvent privilégiée au sein du triptyque coût-compétences-marché. Cette entreprise étendue évolue au sein d'un tissu de petites et moyennes entreprises parmi lesquels ses fournisseurs, sous-traitants, prestataires, etc. Dans ce contexte, la communication et l'échange des données liées au produit et à sa production sont des éléments clés pour le bon fonctionnement d'un tel système.

L'entreprise moderne doit aussi pouvoir s'adapter à des marchés changeants et fragmentés. Sa compétitivité dépend directement de sa capacité à répondre aux besoins de plus en plus personnalisés du client avec une réactivité accrue. Capacité d'innovation, réduction des délais, flexibilité et adaptabilité sont nécessaires pour satisfaire aux nouvelles exigences du marché. Face à la complexification des solutions, l'évolution de l'entreprise peut mener à l'union des ressources et compétences, le développement collaboratif des produits et l'étude des moyens de fabrication dès la conception du produit. Cette mise en relation des différents acteurs doit s'accompagner d'outils et de standards de communication rassemblant des domaines variés n'utilisant pas nécessairement les mêmes codes.

Une étude allemande menée auprès de 251 chefs d'entreprise a permis de conclure que les déficiences des processus informatiques sont, de manière significative, liées aux

systèmes logiciels employés [Etude'06]. Le principal problème identifié est le flux de données accompagnant le processus d'ingénierie [Brecher'09]. Environ 90 % des audits ont pu confirmer que leur entreprise faisait face à des difficultés lors des transferts de données. Les principaux problèmes incluait des formats de données différents, des échecs de conversion et des versions différentes de logiciels (Figure 1).

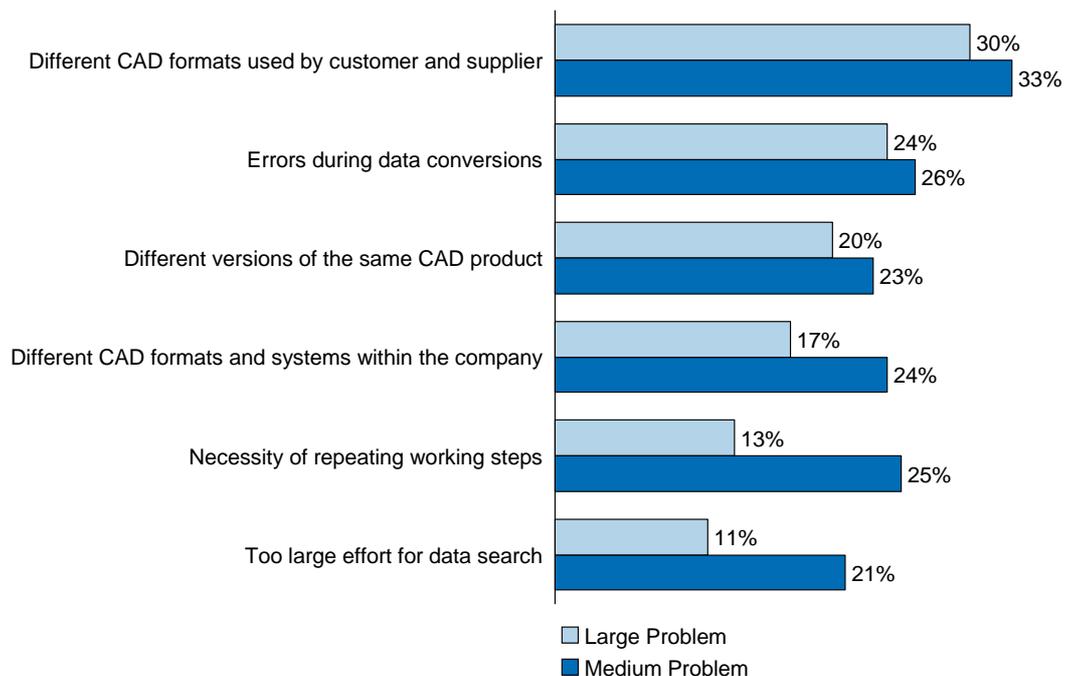


Figure 1 : Difficultés d'interopérabilité dans la chaîne numérique [Etude'06]

Il existe donc une nécessité importante ainsi qu'une forte demande industrielle pour l'amélioration des moyens et supports de communication des données au sein de l'entreprise. La fabrication des produits ne déroge pas à cette règle. Durant les dernières décennies, de larges évolutions technologiques ont permis l'évolution des premières machine-outil équipée de contrôleurs à cartes perforées jusqu'aux dernières cellules d'usinage multi-procédés équipées de Directeur de Commande Numérique (DCN) sophistiqués. La programmation d'opérations d'usinage de plus en plus complexes rend nécessaire l'utilisation de logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) pour la génération et la vérification du code CN. Ces logiciels s'intègrent dans une chaîne numérique de fabrication permettant la réalisation d'un produit conforme à partir de son modèle numérique. La maquette numérique est complétée par l'ensemble des outils de simulation et d'optimisation jusqu'à la réalisation de la pièce. Chacune des étapes de ce processus implique l'échange de

données entre les différents acteurs et logiciels. Dans un contexte technologique moderne, il est nécessaire de définir des moyens adaptés pour la programmation de l'ensemble de ces outils de la chaîne numérique de fabrication.

Malgré les profonds changements technologiques des machines-outils, le langage de programmation demeure le même depuis le début des années 80 avec l'utilisation du code G&M (ISO 6983) qui décrit structurellement les actions élémentaires à exécuter sur la machine-outil. Cette programmation désuète, dérivée numérique du principe des cartes perforées instaurées dans les années 1950, ne convient plus aux attentes de la programmation des machines-outils actuelles.

1.2 Problématique générale et contributions

La problématique générale de ces travaux est l'intégration des possibilités d'une programmation émergente des machines à commande numérique : la programmation basée entités. Notre objectif est d'explorer les voies d'implémentation offertes par cette nouvelle vision de la chaîne numérique de fabrication ainsi que les opportunités d'échange des données de fabrication. Nous exploiterons les évolutions engendrées au niveau de la commande numérique et son intégration dans la chaîne de fabrication assistée par ordinateur CAO\CAPP\FAO\DCN. Pour ceci, quatre principaux axes complémentaires de recherche sont proposés.

1.2.1 Axe 1 : Intégrer la programmation basée entités

La programmation basée entités s'appuie sur des concepts émergents et les premières implémentations académiques et industrielles sont récentes. Le concept est principalement véhiculé à travers le standard STEP-NC (STEP compliant Numerical Control), dérivé du standard STEP (Standard for the Exchange of Product data model) aujourd'hui largement répandu dans l'industrie pour l'échange des données produits. Le premier axe de notre recherche contribue à répondre à une problématique d'intégration de la programmation STEP-NC. Nous nous intéressons à l'évolution de la programmation code G vers la programmation basée entités et à l'enrichissement du standard STEP-NC. Nous proposerons pour cela :

- ✓ une nouvelle approche avec le concept de CN étendue,
- ✓ une méthode d'implantation progressive de la programmation STEP-NC avancée,

- ✓ deux contributions principales à l'évolution du standard STEP-NC. La première consiste en l'intégration de nouvelles stratégies d'usinage au standard STEP-NC. La seconde concerne la construction d'un modèle fonctionnel des machines-outils intégré au standard STEP-NC.

1.2.2 Axe 2 : Evolution du système de fabrication

L'utilisation du standard STEP-NC comme support de programmation basée entités s'inscrit dans une démarche globale nouvelle intégrant la CN au sein de la chaîne numérique de fabrication. Des changements profonds de la distribution des différents acteurs de la chaîne numérique sont mis en jeu, et ont une répercussion directe sur l'organisation du système de fabrication. La seconde problématique étudiée s'intéresse à l'évolution globale du système de fabrication pour tirer profit de la programmation générique basée entités ainsi qu'à la prise en compte des exigences de portabilité et interopérabilité d'un système à l'autre. Le second axe de recherche mène à la proposition de :

- ✓ un concept complet de système étendu de fabrication intégrée XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System),
- ✓ une nouvelle approche de conception de la chaîne numérique avec la CAO étendue (XCAD) et la CN étendue (XCNC).

1.2.3 Axe 3 : Prise en compte d'un contexte multi-process

La gamme de fabrication d'une pièce met souvent en jeu l'utilisation de plusieurs procédés de fabrication. La programmation STEP-NC offre un support d'échange de données commun à plusieurs procédés dont peut bénéficier le système de fabrication. Le troisième axe de ces travaux contribue à l'intégration du contexte multi-process au sein du système de fabrication. La prise en compte de plusieurs procédés et de leurs spécificités au sein d'une même gamme de fabrication ouvre un champ nouveau d'investigation mais complexifie les études de fabrication. La problématique étudiée, outre l'intégration de la programmation multi-process au sein du système de fabrication, est l'organisation des outils de simulation et d'optimisation pour pouvoir pleinement exploiter les possibilités de la programmation multi-process. Nous proposerons pour cela :

- ✓ la mise en place du concept d'espaces de simulation dans un environnement multi-process,

- ✓ une nouvelle approche pour l'intégration d'une gamme multi-process avec STEP-NC,
- ✓ une méthode d'implémentation des outils de simulation multi-process dans la chaîne numérique STEP-NC.

1.2.4 Axe 4 : Ouverture au milieu industriel et validation des concepts

Les récentes avancées de la programmation basée entités font de STEP-NC un standard prometteur pour la programmation avancée des machines outils. Il existe cependant aujourd'hui un réel manque d'application sur des moyens industriels des concepts véhiculés par ce type de programmation. La problématique de cette partie est la mise en œuvre des concepts proposés au cours des axes de recherche précédents dans un but de validations mais aussi de démonstrations sur des moyens industriels. Nous avons pour ceci développé :

- ✓ une plate-forme complète intégrant la programmation basée entités de la CAO jusqu'à la pièce usinée (plate-forme SPAIM : STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing),
- ✓ la mise en œuvre de l'ensemble de la chaîne numérique dans un contexte multi-process.

Ces 4 axes principaux de recherche permettent d'explorer graduellement les concepts de la programmation basée entités, son intégration au sein d'un système de fabrication complet, de l'étendre au contexte multi-process et de valider nos propositions par une plate-forme d'application sur des moyens industriels.

1.3 Contexte de l'étude

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le contexte général de l'étude de la programmation avancée des moyens de production. Cette problématique, traitée depuis de nombreuses années au sein de l'équipe MO2P (Modélisation et Optimisation des Procédés de Production), s'effectue ici dans un contexte particulier de participation au comité de normalisation du standard STEP-NC. Les contributions proposées ont pu être exposées et discutées lors des différents meetings du groupe de travail 7 du comité ISO TC184/SC4 pour la standardisation du modèle de référence de STEP-NC. Cette participation a été étendue au comité ISO TC184/SC1 pour la standardisation du modèle d'application de STEP-NC.

Ces travaux s'appuient par ailleurs sur des concepts et outils de programmation avancée des machines outils développés au sein de l'équipe MO2P. Nous serons amenés à utiliser les travaux d'optimisation de la programmation des MOCN et en particulier :

- le choix de stratégies d'usinage émergentes (tréflage et usinage trochoïdal) et leur construction à partir de courbes à motifs [Rauch'07],
- l'intégration de la méthode ICAM (Intelligent Computer-Aided Manufacturing) pour une programmation basée sur l'évaluation par le DCN des données process en cours de fabrication [Rauch'07],
- l'utilisation des possibilités d'un simulateur d'usinage de formes complexes permettant de simuler le comportement réel de la machine-outil [Dugas'02],
- la simulation et la compensation de la déflexion de l'outil lors de la génération des trajectoires d'usinage [Seo'98],
- la prise en compte des spécificités de l'usinage sur MOCN à structures parallèles [Terrier'05a; Rauch'07],
- la mise en œuvre d'outils de choix de procédés de fabrication [Kerbrat'09].

Cette thèse s'intègre ainsi dans une démarche d'ouverture à une nouvelle manière d'aborder la programmation des machines à commande numérique tout en se basant sur les bases solides développées dans l'équipe ces dernières années.

1.4 Plan de lecture de la thèse

Ces travaux sont présentés en 7 chapitres. Le chapitre 1 introduit le contexte général de l'étude. Les problématiques majeures étudiées dans ce manuscrit sont présentées ainsi qu'une synthèse des contributions apportées par cette thèse. Après un état de l'art de la programmation actuelle des systèmes de fabrication (chapitre 2), les travaux présentés dans le chapitre 3 s'intéressent au cœur de la programmation basée entités à travers l'implémentation du standard STEP-NC. Ils constituent une base pour la proposition d'un système étendu de fabrication s'appuyant sur cette programmation présenté dans le chapitre 4. Le chapitre 5 étend ce concept avec l'intégration d'un contexte plus large multi-process. Une plate-forme applicative est proposée dans le chapitre 6 et permet la mise en œuvre et la validation des travaux présentés dans les chapitres 3, 4, et 5 (Figure 2).

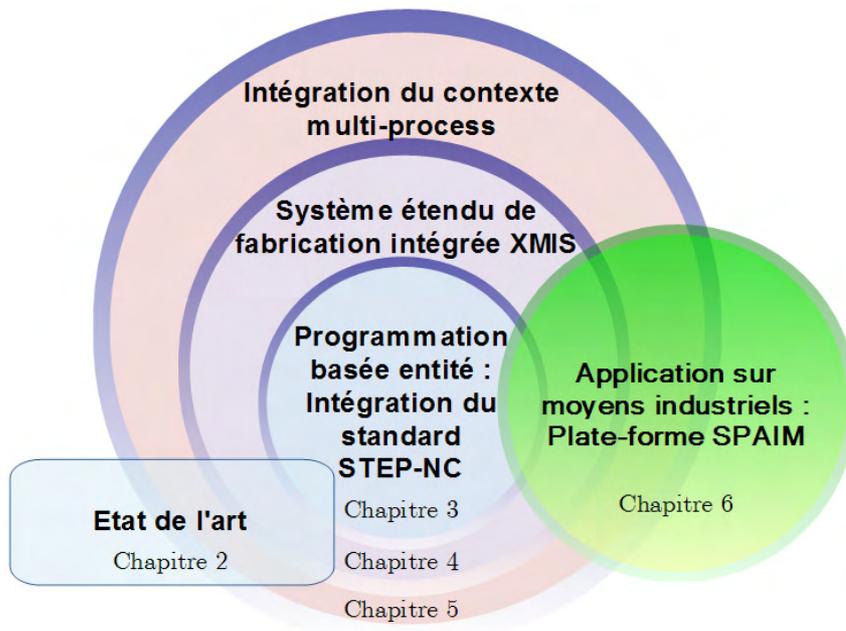


Figure 2 : Vue d'ensemble schématique de l'organisation du manuscrit

Les chapitres 3 à 6 reprennent ainsi les contributions apportées aux quatre principaux axes de recherche étudiée lors de cette thèse (cf. §1.2). Le chapitre 7 propose une synthèse des apports et contributions de cette thèse. Il présente un retour d'expérience objectif quant à la mise en œuvre de cette programmation émergente des machines à commande numérique. Il s'intéresse de même aux perspectives d'évolutions de ce standard et de déploiement dans le milieu industriel.

Chapitre 2. Programmation avancée des machines à commande numérique

Ce chapitre a pour but de présenter le socle de nos travaux avec l'étude du contexte industriel et universitaire de la programmation des machines à commande numérique. Nous présentons dans un premier temps la chaîne numérique de fabrication dans son ensemble pour mettre en avant l'échange des données de la CAO jusqu'à la pièce usinée (cf. § 2.1 et §2.2). Lors de cette étude, un intérêt particulier est porté à la place du directeur de commande numérique (DCN) ainsi qu'à son intégration dans la chaîne numérique. En tant que maillon final, le DCN occupe un rôle capital permettant de passer du modèle virtuel à la pièce réelle. La conformité de cette dernière dépend donc directement de la programmation du DCN, qui ne peut être totalement dissociée des outils numériques sollicités par l'ensemble de la chaîne numérique.

Nous décrivons dans un second temps une nouvelle approche pour la programmation des machines à commande numérique (cf. §2.3). Cette programmation basée entités s'inscrit dans un contexte de recherche internationale mêlant industriels et universitaires et a donné naissance à un standard émergent : STEP-NC (cf. §2.4). Ce dernier fait l'objet d'un certain nombre de travaux qui serviront de support à l'étude menée dans cette thèse. Nous serons donc amenés à détailler les principaux concepts et applications ayant permis l'émergence et la diffusion de ce standard (cf. §2.5). Enfin, nous serons à même de dégager les verrous technologiques et idéologiques à lever pour l'élaboration d'un standard robuste et sa mise en œuvre sur des moyens industriels.

2.1 La chaîne numérique de fabrication

Nous pouvons définir la chaîne numérique de fabrication comme l'ensemble des outils, modèles et maquettes numériques permettant de passer de l'idée au produit réalisé conforme. Cette vision large intègre l'ensemble des aspects liés à la production, ceux-ci pouvant être pris en compte très en amont dans la chaîne de conception avec par exemple des approches de type Design for Manufacturing (DFM) [Anderson'08].

2.1.1 Modèles courants

Les étapes majeures de la chaîne numérique de l'idée jusqu'à la pièce produite conforme sont la conception préliminaire, la conception détaillée et pré-industrialisation, l'industrialisation et la production. Le modèle traditionnel de fabrication s'appuie sur une série de tâches spécialisées permettant l'enrichissement de la maquette numérique en vue de la production. Les systèmes de fabrication modernes (CIM : Computer Integrated Manufacturing) visent à intégrer les outils informatiques de fabrication (ICAM : Integrated Computer-Aided Manufacturing) en lien avec les différents services de l'entreprise (marketing, approvisionnements, systèmes ERP, etc.) [Mikell'07]. Ils proposent un support informatique pour la conception (CAO : conception assistée par ordinateur), pour l'ingénierie de fabrication (CAPP : planification de la production assistée par ordinateur), pour l'industrialisation (FAO : fabrication assistée par ordinateur) et pour la production (DCN : directeur de commande numérique). Traditionnellement, la conception du modèle est le point d'entrée de la chaîne numérique et permet la création de la géométrie du produit. La phase de process planning est la première étape de réflexion en vue de la fabrication avec la sélection des procédés, des entités de fabrication, de la gamme de fabrication, des bruts, etc. Après la sélection des moyens de fabrication, la FAO génère l'ensemble des informations nécessaires à la machine pour exécuter la production (génération des trajectoires d'usinage, calcul des conditions de coupe, etc.). Ces données sont alors post-processées pour permettre la mise en œuvre et le pilotage de la machine par le DCN. Le flux des données au sein de ces systèmes ainsi que la nature des formats utilisés représente un enjeu capital pour l'interopérabilité des applications et la compatibilité des données. Deux modèles traditionnels d'échange des données au sein des systèmes peuvent être adoptés : le modèle centralisé et le modèle collaboratif [Xu'05] (Figure 3).

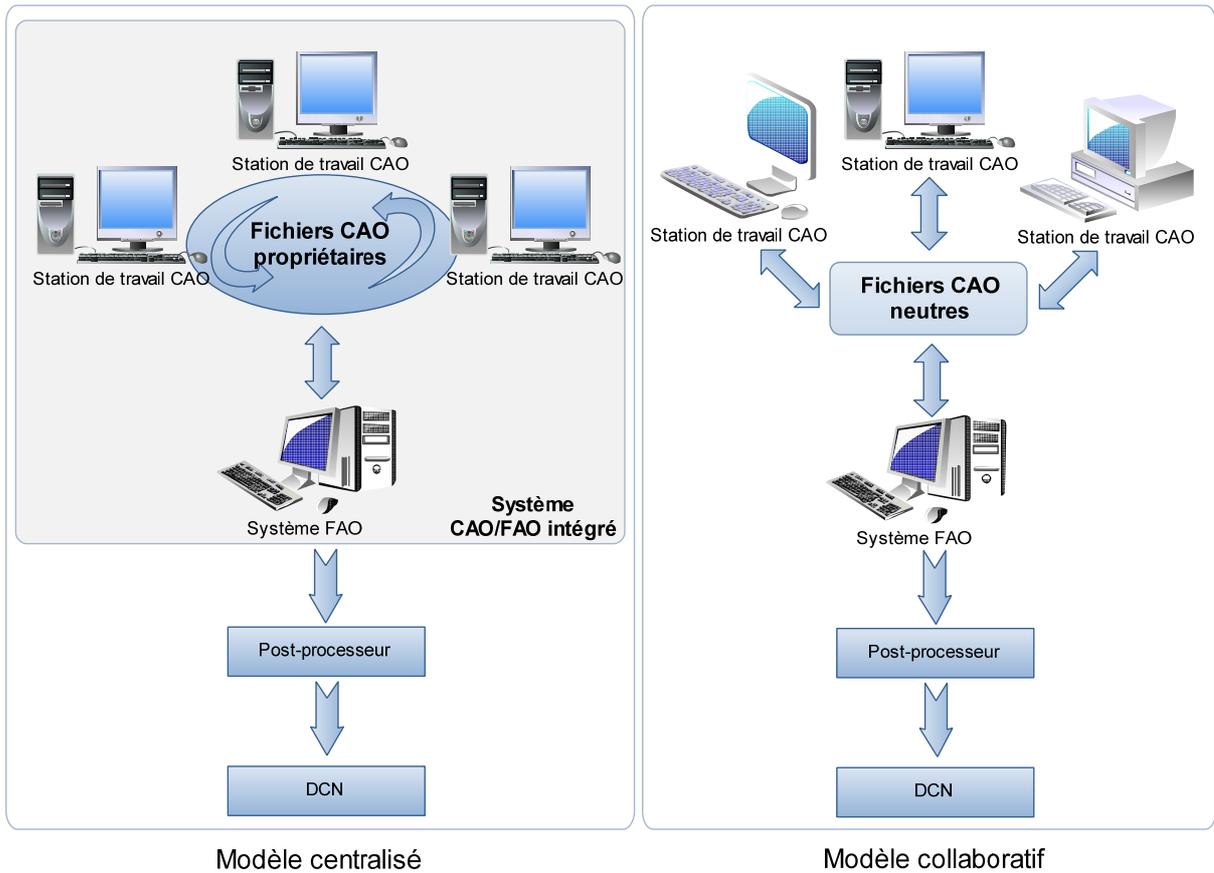


Figure 3 : Modèles courants de systèmes de fabrication

Dans le modèle de fabrication centralisé, la plupart des activités ont lieu entre des acteurs utilisant des systèmes similaires et compatibles. Les systèmes de CAO et FAO utilisent le même format de données éditeur. Les avantages de ce système résident dans l'unification d'un standard propriétaire, évitant ainsi les incompatibilités au sein d'un même système. Il offre de plus une liberté d'implémentation d'informations spécifiques pour l'éditeur du système. Nous pouvons citer par exemple les systèmes Pro/ENGINEER avec Pro/NC, Delcam PowerSHAPE/Mill, CATIA, Siemens NX, etc. Peu ou pas d'échange d'informations n'est cependant possible entre systèmes propriétaires concurrents dans leurs formats respectifs.

Le modèle de fabrication collaboratif est né de la nécessité d'activités collaboratives entre systèmes propriétaires concurrents. Il ajoute un format neutre d'échange des données permettant de résoudre les problèmes d'incompatibilité. Il permet d'offrir un environnement collaboratif et rend possible l'échange de données pour des projets de grande envergure. Nous pouvons citer par exemple les formats DXF (Drawing

eXchange Format), IGES (Initial Graphics Exchange Specifications), PDES (Product Data Exchange Specifications), STEP (Standard for the Exchange of Product data model), etc. Certains problèmes demeurent, en particulier dans le fait qu'ils sont souvent restreints à l'échange de données de géométrie entre la CAO et la FAO. Ils entraînent aussi parfois des pertes d'information par rapport au format propriétaire et ne sont pas toujours standardisés à l'international.

Ces modèles de fabrication couramment utilisés sont donc complémentaires et permettent une certaine intégration de la boucle CAO/FAO en particulier concernant les données de géométrie. Ce n'est cependant pas le cas du DCN, relayé à un second plan l'intégration au sein de la chaîne numérique de fabrication. L'utilisation de post-processeurs nécessaires à la génération d'un langage de programmation désuet (code G) entraîne cette rupture entre la FAO et le DCN. Malgré cela, certaines alternatives sont proposées pour une reconsidération de la place du DCN.

2.1.2 Le DCN dans la chaîne numérique de fabrication

Les concepteurs de directeur de commande numérique ont su profiter des progrès de l'informatique et de l'automatique pour répondre aux diverses contraintes d'exécution et de pilotage des procédés au sein de cellules de fabrication de plus en plus complexes et performantes. Après une présentation des DCN actuels, nous nous intéressons aux évolutions proposées pour une meilleure accessibilité et intégration au sein de la chaîne numérique.

2.1.2.1 Présentation des DCN actuels

Les contrôleurs CN sont des produits de haute valeur ajoutée entrant en compte pour souvent plus de 30 % du prix des machines-outils. La technologie DCN est généralement considérée comme une mesure des technologies de fabrication d'un pays dont les principaux leaders sont actuellement l'Allemagne, les USA et le Japon [Suh'08a]. Les DCN regroupent un ensemble de technologies logicielles et matérielles qu'il est nécessaire d'appréhender pour en comprendre les grands principes et pouvoir les intégrer au système de fabrication.

D'un point de vue global, un système à commande numérique est composé de trois unités : l'unité de commande constituée d'une interface utilisateur et permettant le contrôle de l'exécution des tâches, l'unité de pilotage regroupant les cartes d'axes et

variateurs, et l'unité cinématique composée des moteurs et capteurs. La programmation de l'usinage d'une pièce est directement traitée au sein de l'unité de commande, ou directeur de commande numérique à proprement dit (il est aussi usuel de parler de 'CN' ou commande numérique comme raccourci pour désigner l'unité de commande). D'un point de vue fonctionnel, le DCN regroupe une Interface Homme-Machine (IHM), un noyau de commande numérique (NCK : Numerical Control Kernel) et un automate programmable (PLC : Programmable Logic Control). Leur intégration au sein de la MOCN est schématisée Figure 4.

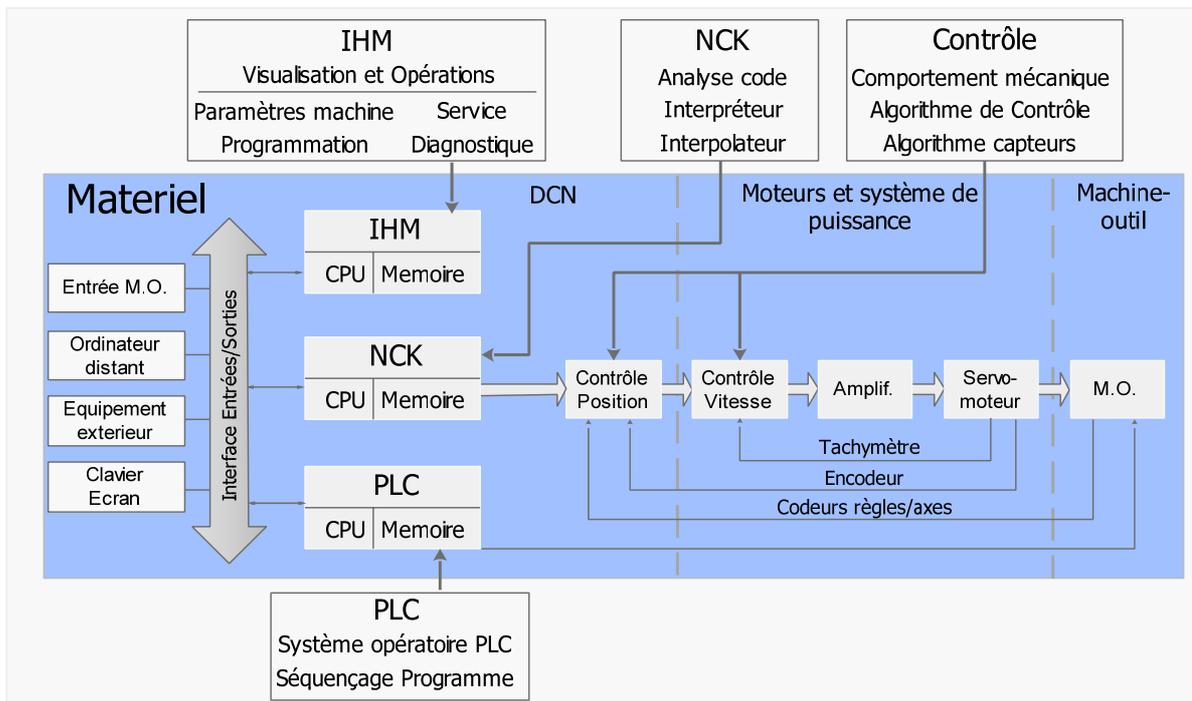


Figure 4 : Composants d'un système MOCN

D'un point de vue matériel, l'architecture d'un DCN est similaire à celle d'un ordinateur [Neuner'97]. L'exécution des calculs des unités IHM, NCK et PLC est traitée par un processeur principal. Un système de mémoire ROM et RAM permet le stockage des applications utilisateurs, des programmes pièce et des programmes PLC. Des entrées sorties analogiques/numériques sont disponibles pour la communication avec d'autres machines ou équipement externes. En interne, la communication entre la CN et l'unité de commande de puissance est numérique, permettant ainsi les échanges d'un large panel de données et la réduction du bruit par l'utilisation de câbles optiques. Les communications avec le matériel mécanique et les capteurs se fait

par l'intermédiaire de protocoles de communication standards comme Profi-Bus, CAN Bus, InterBus-S, etc.

D'un point de vue logiciel, l'IHM, le NCK et le PLC présentent des structures récurrentes d'implémentation constatées chez la majorité des constructeurs.

L'IHM supporte les fonctions d'opérations, de réglage des paramètres, d'édition des programmes, de monitoring, d'alarme et d'assistance pour l'utilisateur.

Les principales unités du NCK sont l'interpréteur, l'interpolateur, les contrôleurs d'accélération/décélération et de position :

- L'interpréteur ou pré-processeur lit et interprète les blocs ASCII du programme pièce. C'est donc réellement lui qui traite le fichier code G et prépare les fonctions d'interpolation de la trajectoire. Plusieurs fonctions avancées peuvent être implémentées suivant les constructeurs. Les plus communément utilisées sont par exemple le Look Ahead statique (anticipation des blocs suivants pour la préparation des blocs en cours), les fonctions de contrôle feedforward (anticipation des consignes dynamiques), les fonctions d'interpolation NURBS, etc. Il stocke ensuite les données préparées dans un buffer interne pour l'exécution dans l'interpolateur.
- Il existe deux grandes catégories d'interpolateur : matériels et logiciels. Les CN récentes utilisent en majorité des versions logicielles. Plusieurs algorithmes d'interpolation peuvent être implémentés basés sur les méthodes de pulsations de référence (interpolateur par approximation en escalier, par intégration numérique avec la version logicielle du DDA : Digital Differential Analyser, etc.) ou basés sur des méthodes d'échantillonnage des données (interpolateur d'Euler, de Taylor, de Tustin, etc.) [Suh'08a]. Un contrôle de l'accélération/décélération est exécuté avant ou après l'interpolation pour limiter les vibrations et chocs lors des mises en mouvement. Un Look Ahead Dynamique, calculé en temps réel, permet de limiter les dépassements lors des variations brutales d'accélération. À partir de la trajectoire et du profil de vitesse, l'interpolateur génère des positions de consignes pour chaque axe, échantillonnant ainsi la trajectoire suivant un pas de temps donné correspondant au temps de cycle de la boucle de position.
- Le contrôleur de position ou contrôleur de boucle (Servo Control Loops) vise à réduire l'erreur de contour (plus petite distance entre la trajectoire programmée et

la trajectoire réelle). Pour ceci, l'emploi de contrôleurs PID ou de système d'anticipation des forces dynamiques permettent de réduire l'erreur de poursuite et limitent l'erreur de contour.

Le PLC s'apparente à un automate programmable exécutant le contrôle séquentiel des changements d'outils, du chargement/déchargement des pièces, de la gestion des signaux d'entrées/sorties comme par exemple les arrêts d'urgence. De manière générale, il contrôle le comportement de la machine à l'exception des servomoteurs. Un circuit est dédié à la communication haute vitesse avec le NCK. Des programmes pour des applications dédiées peuvent être implémentés à partir d'un éditeur qui permet ensuite la compilation au sein de l'automate.

Les DCN actuels concentrent donc un ensemble de technologies permettant la commande des tâches de la machine. La structure intrinsèque du DCN, et en particulier du NCK, rendent difficiles les modifications de comportement en dehors de l'intervention du constructeur. Dans la plupart des cas, il est même impossible de connaître exactement le comportement réel du DCN. Le NCK peut alors être considéré comme une « boîte noire » où seulement quelques paramètres, laissés accessibles par les constructeurs, peuvent être modifiés. Ceci pose problème pour l'intégration du DCN dans la chaîne numérique et en particulier lors des étapes de simulation et d'optimisation en amont. De même, un nombre considérable d'informations (capteurs, puissances consommées, temps de cycles, etc.) ne sont pas toujours accessibles alors que leur feed-back pourrait être utilisé pour le monitoring, le contrôle adaptatif, mais aussi pour d'autres applications plus en amont dans la chaîne numérique et la capitalisation de l'expérience. Pour palier ces manques, plusieurs propositions ont vu le jour proposant des architectures ouvertes de DCN et l'élaboration de CN virtuelles.

2.1.2.2 CN ouvertes

Avec l'évolution des paradigmes pour des systèmes de production plus agiles, flexibles et intégrés, les DCN constructeurs (ou DCN à architecture « fermée ») ne répondent plus toujours aux besoins spécifiques des utilisateurs. Les architectures ouvertes de DCN (OAC : Open Architecture Control) sont développés dans le cadre d'un environnement standardisé et indépendant des constructeurs. Un système ouvert peut être défini comme un système satisfaisant les propriétés suivantes [Miles'98]:

- *interopérabilité* : c'est la capacité des composants d'un système à coopérer pour effectuer les tâches spécifiées. Pour ceci, il est en particulier nécessaire de mettre en place les spécifications standardisées du langage de représentation de données, le modèle de comportement, les mécanismes de communication, etc.,
- *portabilité* : c'est la capacité pour un composant logiciel ou matériel de pouvoir être exécuté sur différents systèmes,
- *évolutivité* : c'est la possibilité d'étendre et de réduire les fonctionnalités d'un système sans investissements conséquents,
- *interchangeabilité* : c'est la capacité de remplacer des composants existants par de nouveaux composants sans remplacer le système complet.

Nous pouvons aussi noter que les systèmes ouverts peuvent être considérés par leurs caractéristiques d'extensibilité, de modularité, de réutilisabilité et de compatibilité. Pratiquement, la plupart des DCN ouverts ont une base PC (aussi appelés PC-NC) et peuvent être classés en trois catégories principales [Pritschow'01] :

- *IHM ouverte* : seules les parties non exécutées en temps réel du système sont ouvertes. Des adaptations peuvent être menées au niveau des applications orientées utilisateur. Le NCK est totalement fermé. La majorité des DCN ouverts commerciaux a été développés en se basant sur cette architecture,
- *NCK partiellement ouvert* : le NCK à une topologie fixe mais offre des possibilités d'implémentation de nouveaux algorithmes,
- *systèmes totalement ouverts* : les applications au sein de l'IHM et du NCK sont modulaires et l'interface de communication entre les deux est standardisée.

Plusieurs projets ont permis d'aboutir à la réalisation de systèmes CN ouverts comme OSACA en Europe [Lutz'97], OMAC aux USA [Yen'98] ou OSEC au Japon [Asato'02]. Les CN ouvertes à base PC offrent une alternative pour le remplacement de CN constructeurs fermées qui représentent un coût important. Elles permettent une adaptation spécifique aux besoins de l'utilisateur avec l'ajout de modules, les possibilités de modification des fonctions et de lien direct avec d'autres applications [Altintas'96]. Ce premier pas vers l'intégration du DCN au sein de la chaîne numérique offre certaines possibilités pour la simulation du comportement réel de la machine mais demeure limitée par sa programmation code G. Cette dernière est inadaptée dans sa structuration comportant des extensions spécifiques aux constructeurs et ne permettant pas de feed-back de la CN vers la FAO. De plus, ces

solutions demandent un effort de développement conséquent pour pouvoir garantir des systèmes robustes « clef en main » que peu de fabricants de CN sont prêts à concéder, idéologiquement comme financièrement. Une autre approche consiste à simuler, en amont de la chaîne numérique, le comportement réel du DCN pour pouvoir compenser ses lacunes par la programmation.

2.1.2.3 CN virtuelles

Les technologies de production virtuelles visent à concevoir une usine totalement numérique où la pièce peut être modélisée et produite avec des paramètres de fabrication optimisés. Les erreurs résiduelles peuvent alors être prédites et des actions correctives menées dans un environnement intégré de simulation. Dans ce contexte, la machine-outil virtuelle présente un intérêt majeur pour la réduction des temps d'industrialisation du produit [Altintas'05]. Il en résulte un intérêt direct pour la programmation des machines par anticipation de leur comportement qui peut être pris en compte lors des simulations au sein de la chaîne numérique. La mise au point de DCN virtuels s'appuie souvent sur des CN ouvertes au comportement connu pour des soucis de modélisation [Yeung'06]. La modélisation du comportement du DCN permet d'envisager son intégration au sein du système de FAO, palliant ainsi en partie l'impossibilité actuelle d'un feed-back des informations du DCN vers la FAO [Suh'00]. Ces possibilités ont pu donner lieu à l'élaboration de simulateurs permettant de simuler le comportement de la machine et de son contrôleur [Dugas'03]. Dans le cas particulier de l'UGV, de fortes accélérations associées à des trajectoires complexes justifient d'autant plus la nécessité de pouvoir simuler le comportement de la CN mais aussi des axes [Prevost'08] et de la structure de la machine [Pateloup'08] pour la génération optimale des trajectoires d'usinage.

2.1.3 Discussion

L'ensemble des outils de simulation du comportement réel de la machine outils et de son DCN contribue ainsi à une meilleure intégration de la fabrication au sein de la chaîne numérique. Les technologies proposées sont aujourd'hui suffisamment évoluées pour garantir la fabrication conforme de pièces de formes complexes. Il demeure cependant un écart substantiel entre les possibilités de telles technologies et la réalité de leur mise en œuvre. Nous pouvons en effet constater un réel manque de communication bidirectionnelle entre le DCN et la FAO. Le feed-back du comportement réel de la machine lors de la production est difficilement possible et

des informations disponibles au sein du DCN sont peu exploitées en amont de la chaîne numérique. Il est donc primordial de s'intéresser à la façon de communiquer les informations de fabrication à la machine. Les standards de programmation constituent l'élément clef de cette communication et sont le support des échanges de données de l'idée jusqu'à la pièce réalisée. Ils conditionnent même l'architecture de l'ensemble de la chaîne numérique et offrent des possibilités plus ou moins restreintes d'intégration des différents modules au sein de celle-ci.

2.2 Echanges des données au sein de la chaîne numérique de fabrication

Nous nous intéresserons plus en détail dans cette partie aux échanges de données entre les différents modules de la chaîne numérique. La représentation simplifiée du flux de l'information au sein de la chaîne numérique actuelle est proposée Figure 5 :

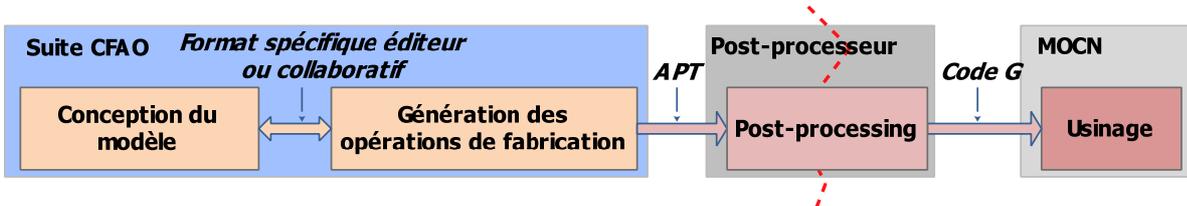


Figure 5 : Représentation simplifiée de la chaîne numérique actuelle

Nous nous proposons d'étudier dans cette partie l'échange des données du modèle géométrique jusqu'à la pièce usinée.

2.2.1 Echanges au sein de la suite CFAO

Les modèles centralisés et collaboratifs présentés au paragraphe §2.1.1 permettent à proprement parler d'utiliser le terme « suite CFAO » pour désigner des outils de CAO et de FAO intégrés à un même environnement et permettant un flux bidirectionnel des données sans pertes d'informations. Concrètement, les suites CFAO commerciales basées sur un modèle centralisé utilisent un format spécifique éditeur qui permet une réelle intégration des modules CAO et FAO. Les modifications de géométrie en CAO sont immédiatement répercutées en FAO, et réciproquement, sans pertes d'informations. Il demeure cependant des problèmes lorsqu'il est nécessaire

d'échanger des informations entre différentes suites propriétaires. C'est dans ce cas que le modèle collaboratif est plébiscité.

Théoriquement, le modèle collaboratif devrait être en mesure de proposer des standards permettant ce niveau d'intégration pour l'échange de données entre suites CFAO issues de différents éditeurs. Pratiquement, chaque système CAO a recours à des descriptions de géométrie différentes sur le plan mathématique et structurel. Il existe donc toujours une perte d'information lors de la transformation d'un format CAO à un autre [Wang'06]. Ceci n'est pas toujours pénalisant si les informations nécessaires à la suite du projet de fabrication sont conservées. Pour l'échange des données process entre systèmes de FAO, il n'existe pas de standard collaboratif couramment répandu. Cela constitue aujourd'hui un réel manque malgré une forte demande. Le standard émergent STEP-NC offre de nouvelles possibilités dans ce domaine et fera l'objet d'une étude détaillée dans la suite de ce chapitre.

2.2.2 De la FAO à la CN

La fabrication assistée par ordinateur met en œuvre les outils permettant l'analyse, la préparation et la programmation des moyens de fabrication. Ces outils peuvent être intégrés au sein de suites complètes CFAO ou sous forme de modules indépendants spécialisés dans certaines tâches comme la génération des trajectoires, le choix des paramètres de fabrication, la vérification des collisions, etc. Il est ensuite nécessaire de communiquer les choix effectués au DCN pour l'exécution sur le moyen de production.

2.2.2.1 La programmation actuelle des MOCN de la FAO à la CN

Programmer une machine à commande numérique consiste à générer une gamme de fabrication et les programmes pièce correspondants. À partir d'un dessin ou du modèle 3D de la pièce, une série de processus permet d'obtenir les programmes pièce. Les étapes 1 à 6 de la Figure 6 constituent une phase de préparation de la fabrication où la pièce est analysée et une stratégie de fabrication est mise en place. Cette planification des processus de fabrication (« Process Planning ») est effectuée par un programmeur ou un opérateur machine et nécessite une connaissance approfondie des machines-outils, de leur DCN, des outils et théories de fabrication.

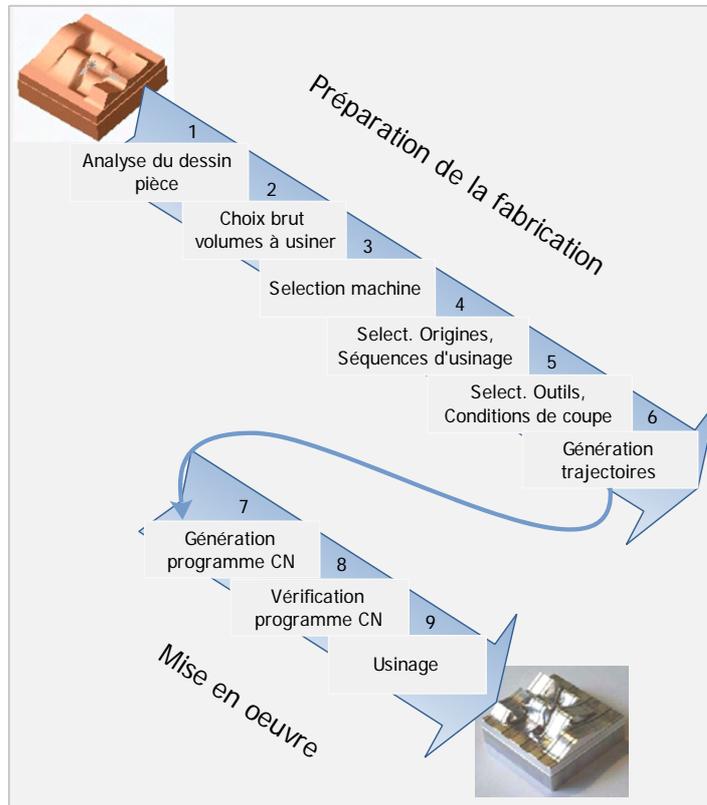


Figure 6 : Séquence de traitement de la CAO à la pièce usinée

Beaucoup d'études ont permis de mettre en place des outils informatisés d'aide à la planification des opérations de fabrication (CAPP : Computer Aided Process Planning) [Wang'07b]. À l'étape 7, la génération du programme pièce peut être effectuée de façon manuelle ou automatique (Figure 7).

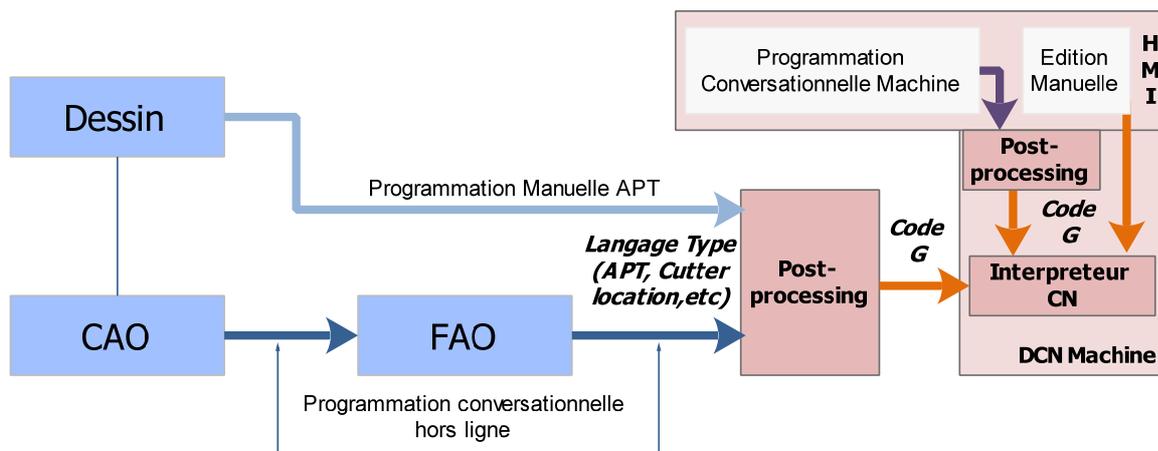


Figure 7 : Méthodes de programmation des MOCN

La programmation manuelle consiste à directement éditer un programme pièce dans un langage standard. Elle demande des connaissances poussées et ne permet pas de traiter des pièces compliquées. Les avantages principaux résident dans la possibilité de programmation rapide d'opérations simples et dans le peu d'investissement à concéder. Le recours à la programmation complète manuelle est aujourd'hui très limité, et parfois utilisé dans le cas de modifications ponctuelles d'erreurs de programme.

La programmation automatique s'appuie principalement sur une programmation conversationnelle (signifie qu'il existe une conversion automatique de l'environnement graphique utilisateur en code CN) en ligne (conversationnel machine) et hors ligne (conversationnel FAO). La programmation hors ligne s'appuie sur des logiciels de fabrication assistée par ordinateur et permettent la génération du code CN (ou code G) après une étape de post-processing. La programmation en ligne ou « embarquée » permet de programmer la machine directement à partir de son IHM. Nous détaillons dans les paragraphes suivants ces deux types de programmation les plus répandus aujourd'hui.

2.2.2.2 Programmation hors ligne : Langage Type, post-processeurs et code G

Les parcours outils et les attributs de fabrication (avance, vitesse de coupe, etc.) sont générés en FAO et font l'objet d'une première compilation en langage type. La programmation langage type consistait initialement en une méthode où le programmeur éditait les programmes pièce dans un langage facilement compréhensible similaire à du BASIC ou FORTRAN [Suh'08a]. Le langage APT (Automatically Programmed Tool), développé aux USA dans les années 60, est le plus répandu. Il contient un grand nombre de fonctions et de représentation de géométries variée et permettait la génération de programmes en 3, 4 et 5 axes incluant le contrôle des rotations de la broche et des plateaux machine. Ses évolutions lui permettent d'offrir aujourd'hui des capacités et un panel d'applications beaucoup plus importantes. Il est constitué de quatre principales parties : la définition de la géométrie de la pièce, la définition des mouvements et trajectoires outils (fichier CL préliminaire), les conditions de coupe (fichier CL final) ainsi que d'une partie auxiliaire (taille des outils, numéro de pièce, etc.). Des variantes comme EXAPT ou FAPT pour FANUC ont été développées en se basant sur des concepts similaires.

Initialement, un processeur APT standardisé était utilisé comme sortie du logiciel de FAO et générait le programme APT. Le post-processeur permettait alors de générer le programme ISO (ou code G) pour une configuration DCN/machine à partir de la partie 3 du fichier APT (ou Cutter Location file). Ainsi, il n'existait qu'un seul post-processeur par machine, quelque soit le logiciel FAO. Aujourd'hui, les systèmes de FAO modernes n'utilisent pas tous la programmation APT normalisée mais parfois des variantes (en particulier pour des raisons de temps de réponse des compilateurs APT). Il existe donc aujourd'hui autant de post-processeurs que de configurations logicielles de FAO/DCN/machine. Une estimation fait état d'environ 4500 post-processeurs sur le marché aujourd'hui [Hardwick'06]. L'emploi de post-processeurs représente donc une limitation de la flexibilité en empêchant la portabilité des programmes d'une MOCN à l'autre ainsi qu'un surcoût tant en termes d'investissement que de maintenance.

Le fichier code G ainsi généré par le post-processeur est construit sur les bases du standard ISO 6983 dont la normalisation date des années 80 [ISO6983'82]. En pratique, au-delà de ce standard, les constructeurs de CN ont développé leurs extensions propres pour pallier les manques et la désuétude d'un standard qui ne convient plus pour la programmation avancée des machines à commande numérique. Il est cependant aujourd'hui majoritairement utilisé dans l'industrie. Le principe de cette programmation structurée repose sur la description d'une séquence de blocs de commande. Chaque bloc numéroté est composé de différentes fonctions et adresses associées (Figure 8).

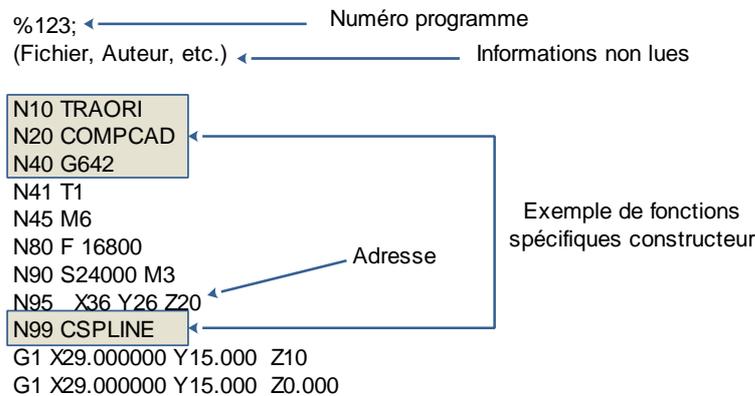


Figure 8 : Exemple de programmation code G

Les fonctions préparatoires G décrivent les commandes du mouvement de l'outil et sont suivies des coordonnées de translation ou de rotation. Les fonctions auxiliaires M décrivent la commande des fonctions on/off de la machine-outil (mise en marche/arrêt de la lubrification, changements d'outils, etc.). Les conditions opératoires sont spécifiées à travers le F (Feedrate) pour définir l'avance, S (Spindle speed) pour la fréquence de broche, T (Tool number) pour le numéro d'outil, etc. A partir d'un programme principal, il est possible de faire appel à des sous programmes ainsi qu'à des cycles modaux. Certaines fonctions d'interpolation (Spline G06.1, etc.) permettent d'adapter la commande pour des trajectoires spécifiques aux machines-outils multiaxes. Chez le constructeur Siemens, l'ajout de la fonction Cspline permet d'interpoler la trajectoire avec une Spline cubique, il en existe de même d'autres pour des interpolations Spline de degrés différents. Le mode de coupe G64 permet de contrôler l'avance sur les axes en faisant appel à des fonctions de Look-Ahead. Une extension Siemens, G641\G642, appelle de plus à un contrôle de l'erreur de corde [Siemens'08b]. Il existe ainsi un certain nombre de fonctions standardisées mais beaucoup de constructeurs fournissent leurs propres extensions lorsque les possibilités de la norme ISO 6983 sont dépassées. Il en résulte directement que les programmes pièce ne sont pas transportables et doivent être totalement régénérés lors de l'usinage sur des machines différentes. Il apparaît de plus que cette manière de programmer spécifie à la machine « comment faire » par une succession d'actions élémentaires, et laissant ainsi une liberté très restreinte de décisions et d'actions à la machine comme à l'opérateur.

Avec la complexification de pièces à usiner avec toujours plus de précision, la programmation hors ligne a pris une place importante pour la mise en œuvre des machines à commande numérique. En même temps, dans l'atelier, le nombre d'experts en programmation a largement diminué. Il existe cependant toujours un besoin de programmation pied-machine des opérations d'usinage. Les DCN modernes proposent pour ceci des interfaces conversationnelles permettant l'usinage d'entités simples directement à partir de l'IHM.

2.2.2.3 Programmation propriétaire conversationnelle machine

Un système de programmation conversationnel est conçu pour :

- pouvoir être utilisé par un opérateur inexpérimenté,
- générer un programme pièce rapidement avec un minimum d'entrées requises,

- vérifier rapidement le programme pièce généré,
- autoriser des modifications faciles,
- pouvoir être exécuté pied-machine.

La procédure de création d'un programme pièce dans un tel système est synthétisée (Figure 9) :

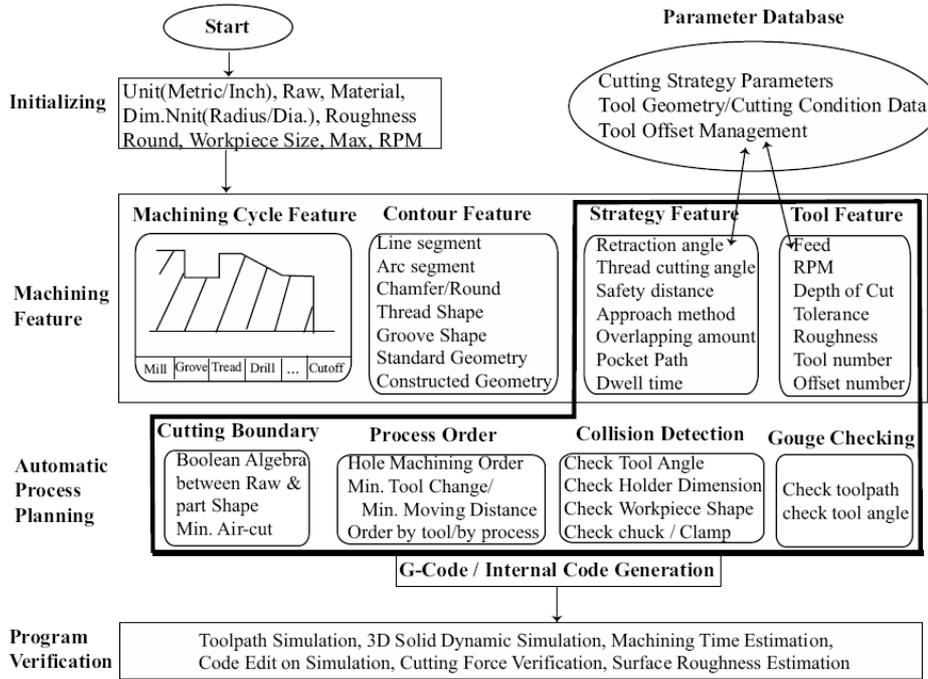


Figure 9 : Etapes de la programmation conversationnelle machine [Suh'08a]

À partir de la sélection des entités géométriques simples à usiner, une gamme de fabrication est générée de façon semi-automatique. Pour chaque entité, des cycles automatiques peuvent être sélectionnés, permettant le calcul des trajectoires, des conditions d'usinage et la détection des collisions. Un fichier code CN (généralement code G) est généré et exécuté après vérification par des modules de simulation.

Les possibilités des systèmes conversationnels sont cependant limitées à des cycles d'opérations sur des entités « classiques » (poches, trous, entités 2,5D, etc.) et l'usinage d'entités plus compliquées et surfaces complexes est impossible. Il n'existe de même pas de possibilité de transporter le programme conversationnel d'une machine à l'autre ou de feed-back en direction d'une suite CFAO. Son utilisation reste donc cantonnée au sein du DCN et ne s'intègre pas au système de fabrication complet.

2.2.2.4 Discussion

Le tableau suivant (Tableau 1) reprend les principaux avantages et inconvénients des méthodes de programmation actuelles des MOCN :

Type de programmation	Avantage	Désavantage
Manuelle ISO	Rapide à mettre en œuvre pour des opérations simples Pas d'investissements particuliers	Connaissances approfondies requises Connaissance de la définition géométrique requise
Conversational FAO	Traitement des géométries complexes Prog. de machines différentes possibles	Investissement conséquent Expert requis Feed-back impossible de l'atelier à la FAO/CAO
Conversational Machine	Création facile de prog. Edition pied-machine	Prog. utilisable sur une seule machine Reprogrammation nécessaire sur une autre machine Prog. de pièces compliquées exclue

Tableau 1 : Comparaison entre les méthodes de programmation actuelles des MOCN

Le domaine de l'aéronautique et de l'usinage de moules et matrices fait souvent appel à l'usinage de pièces de formes complexes demandant une expertise et une préparation importante de la fabrication. Dans ces domaines, seule la programmation hors ligne faisant appel à des suites FAO peut répondre aux objectifs de qualité et de productivité des pièces obtenues. Notre étude se déroulera dans ce contexte.

2.2.3 Feed-back de la CN vers la CFAO

Le retour de l'information de la CN vers la CFAO représente aujourd'hui un verrou technologique majeur pour l'intégration de la CN au sein de la chaîne numérique. Le feed-back des modifications pied-machine ainsi que la capitalisation de l'expérience demeurent très restreintes. Pour combler ce manque, certains constructeurs travaillent à proposer l'ensemble des modules de la CAO jusqu'à la CN et pourront ainsi utiliser un langage propriétaire pour faciliter le flux bidirectionnel des données au sein de la chaîne numérique propriétaire. Siemens propose aujourd'hui l'ensemble des équipements de la CN jusqu'aux variateurs ainsi que, avec l'acquisition récente d'UGS, la suite CFAO Solid Edge/CAM Express complétée par la suite Siemens NX

[Siemens'08a]. L'objectif est à terme de pouvoir proposer une chaîne numérique complète et intégrée incluant la CN. Le feed-back des informations pied-machine serait alors possible, dans un format propriétaire. Il ne permettra cependant pas d'échange avec d'autres suites propriétaires.

2.2.4 Les lacunes de l'ISO 6983 (code G)

De nombreux progrès ont été effectués à chaque extrémité de la chaîne numérique, avec d'une part le développement de suites CFAO avec des capacités de calcul adaptées à la programmation avancée des MOCN, et d'autre part des DCN technologiquement évolués et capables de traiter, d'interpréter et de mettre en œuvre des usinages complexes. Il existe cependant un véritable verrou technologique et idéologique dans l'approche actuelle de programmation des moyens de fabrication avec l'utilisation du code G. Ceci se traduit directement par un manque d'intégration de la fabrication et du DCN au sein de la chaîne numérique. L'étude de la chaîne numérique actuelle a permis de mettre en avant les principales lacunes du code G :

- utilisation de post-processeurs onéreux, sources de pertes d'information, et dédiés à une unique configuration logiciel FAO/DCN/machine,
- non transportabilité des programmes pièce d'une machine à l'autre,
- code G non adapté à la programmation des courbes complexes et pertes d'information lors des discrétisations et approximations,
- modifications pied-machine difficiles et contrôle limité de l'exécution du programme,
- flux unidirectionnel de l'information : absence de feed-back possible de la CN vers la CFAO. Cela entraîne des difficultés de communication, de correction, de préservation et capitalisation de l'expérience atelier,
- le code G ne peut être utilisé comme support d'échange des données de fabrication d'un logiciel FAO vers un autre.

2.2.5 Discussions et évolutions de la programmation des MOCN

Les avancées rapides des technologies matérielles, logicielles et de l'information ont mené à une évolution de l'environnement de production et des paradigmes associés (Figure 10) :

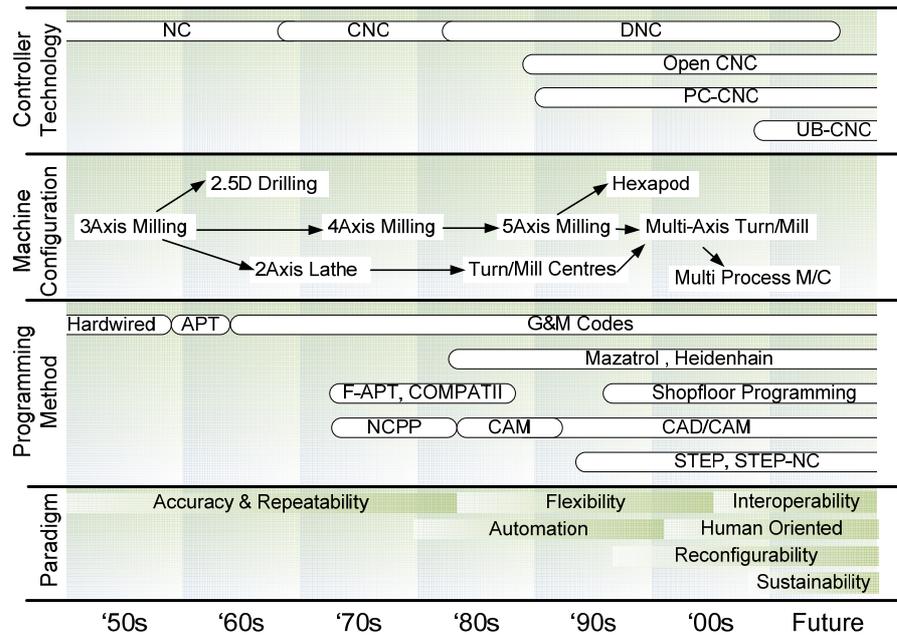


Figure 10 : Evolutions de la programmation des MOCN [Newman'07]

Les méthodes de programmation des MOCN reposent encore massivement sur le standard ISO 6983 ou code G. Cependant, beaucoup d'efforts sont menés pour l'évolution vers des standards plus appropriés. Nous pouvons en particulier citer les travaux de Fortin et al. pour permettre une programmation plus accessible DCN. Le langage BNCL (Base Numerical Control Language) propose une amélioration du flux des informations compatibles avec STEP entre la FAO et la CN [Fortin'04]. Le système proposé repose sur une machine virtuelle BNCL fonctionnant comme un microprocesseur virtuel ainsi qu'une machine outils virtuelle. Ce langage demeure cependant de bas niveau et son apport reste très centré sur son accessibilité vis-à-vis de l'utilisateur. D'autres travaux, en particulier pour l'échange des données CN par Internet, ont permis d'aboutir au langage NCML (Numerical Control Markup Language) [Jerard'06]. NCML est basé sur XML et permet la description de la gamme de fabrication d'une pièce qui peut être traduite en trajectoires et exécuté par des DCN modernes. Ces applications sont plutôt dédiées à des scénarios de production collaborative supportant le e-commerce. Un autre type de programmation émergente est né de la nécessité de pallier aux manques du standard code G : la programmation basée entités. Cette programmation décrit les entités de fabrication (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 [Kramer'06].

2.3 STEP-NC : le standard de référence pour la programmation basée entités

La programmation basée entités des MOCN s'appuie actuellement principalement sur le standard émergent STEP-NC conçu initialement pour améliorer la communication entre les systèmes CFAO et les DCN, et permettre ainsi l'intégration de la chaîne numérique complète CAO/FAO/DCN. Il propose une nouvelle conception de cette chaîne numérique et fait l'objet d'une recherche internationale, aussi bien universitaire qu'industrielle.

2.3.1 Une nouvelle vision de la chaîne numérique

La réorganisation de la chaîne numérique de fabrication ne se restreint par la seule programmation des CN mais à l'implémentation d'un seul fichier lors des différentes étapes de la conception jusqu'à la fabrication (Figure 11).

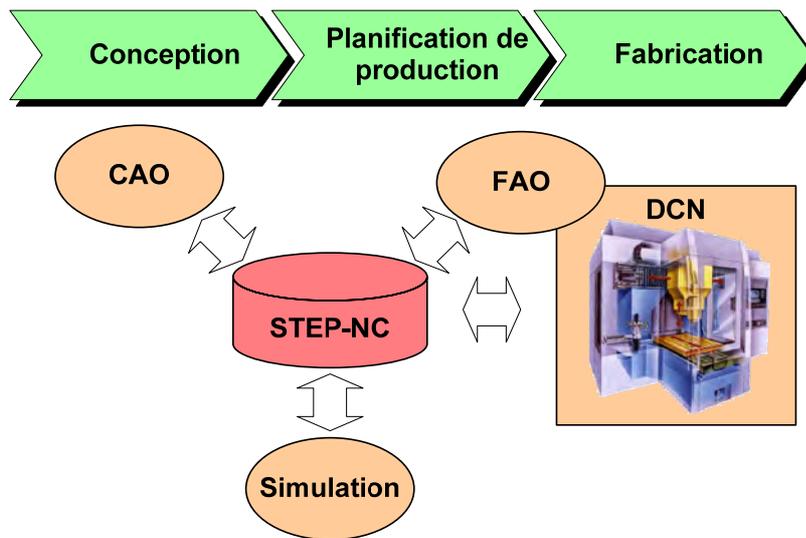


Figure 11 : La chaîne numérique STEP-NC

Ainsi, la maquette numérique est enrichie des diverses simulations et choix des stratégies de fabrication. Elle peut être directement interprétée et exécutée par la machine au sein du système de fabrication. Les modifications effectuées sur la CN, en FAO ou CAO sont directement répercutées sur la maquette numérique STEP-NC permettant ainsi un flux bidirectionnel des données et la capitalisation de l'expérience [Suh'02b].

2.3.2 Les apports de la programmation basée entités

Cette approche constitue une solution pérenne pour s'affranchir des défauts liés au format ISO 6983 [Suh'02b]. L'échange d'informations de haut niveau basé entités simplifie la programmation par une description orientée objet [Maeder'02]. Cela permet ainsi le flux bidirectionnel des données et la conservation d'un fichier générique pouvant être traité par des suites CFAO différentes et exécuté sur des machines différentes. La Figure 12 compare la gestion des informations dans le cas du format actuel (ISO 6983) et dans celui du format STEP-NC (ISO 14649).

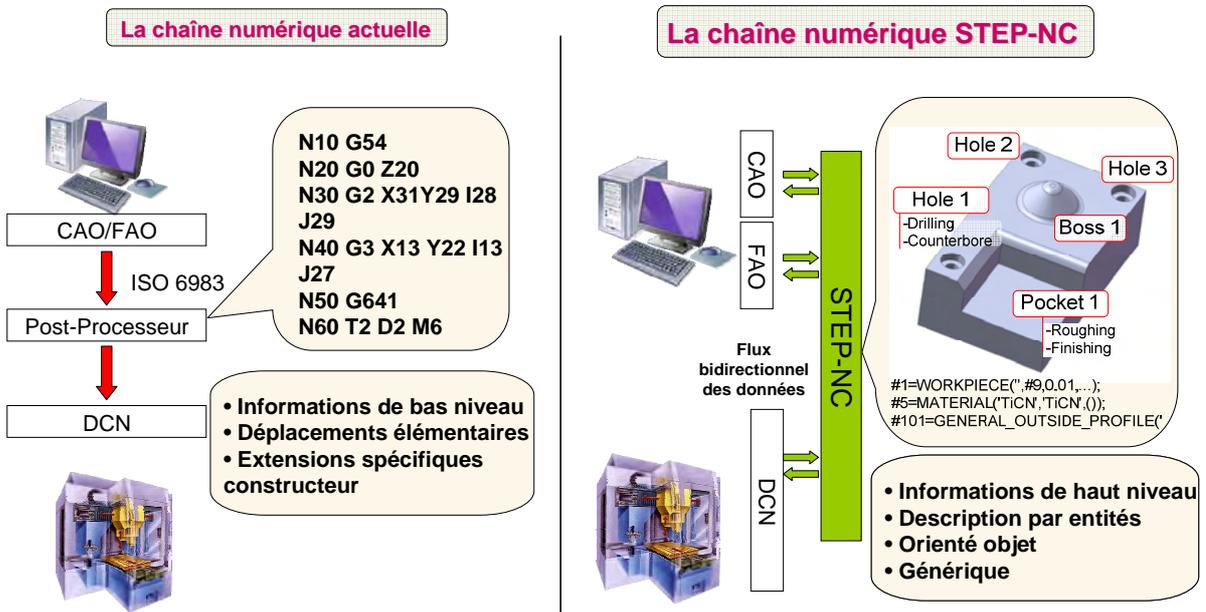


Figure 12 : Comparaison code G (ISO 6983) et STEP-NC (ISO 14649)

Une conséquence directe de l'utilisation du standard STEP-NC est l'élimination des post-processeurs : les mêmes données STEP-NC génériques peuvent être exécutées sur des MOCN différentes. Nous pouvons de plus souligner les points suivants :

- élimination des post-processeurs et adaptation générique des données STEP-NC indépendamment de la machine,
- limitation des pertes d'informations entre les différentes étapes du process : STEP-NC fournit un modèle complet et structuré des données,
- possibilités de feed-back de la CN vers les suites CFAO et modules de simulation/optimalisation,
- compatibilité avancée pour le transfert Internet et l'e-manufacturing,

- support standardisé de l'échange de données de la CAO jusqu'à la CN permettant une amélioration de l'interopérabilité entre les différents outils numériques Du système de production,
- planification du process avec plus de liberté et d'intelligence intégrées à la CN,
- combinaison possible des avantages des conversationnels FAO et machine,
- réduction significative des temps de mise en production et de modification des petites et moyennes séries,
- extensibilité du modèle de données pour de nouvelles applications et procédés de fabrication.

L'ensemble de ces avantages sont les fondements qui ont poussé à l'instigation et au développement du standard STEP-NC pour la programmation basée entités des moyens de production. Ceci a été rendu possible grâce à un effort international de recherche dont nous nous proposons de détailler les grandes lignes.

2.3.3 Une recherche internationale, universitaire et industrielle

Le projet STEP-NC a été initié à la fin des années 90 et regroupe de nombreux acteurs internationaux, privés et publics. Construire un tel standard est un projet ambitieux nécessitant un important travail de développement ainsi que la mise en place d'actions de communication visant à la diffusion des concepts véhiculés. L'initialisation des travaux sur le standard STEP-NC a eu lieu avec différents projets détaillés par XU et al. dans [Xu'05]. Les principaux d'entre eux sont les suivants :

- *Le projet IMS (Intelligent Manufacturing System) STEP-NC* : approuvé en 2001, il a regroupé un ensemble d'actions de recherche au niveau international avec des laboratoires d'Europe, de Corée et des USA. Ont participé à ce projet des éditeurs de suite CFAO (Open Mind, Dassault Catia, etc.), des fabricants de DCN (Siemens, Fidia, etc.), des fabricants de machines-outils (CMS, AGIE, etc.) et des utilisateurs (Boeing, Daimler-Chrysler, Samsung, Volvo, General Electric, Lockheed Martin, General Motors, etc.). Le but de ce projet est d'initier et de coordonner des sous projets dont certains sont détaillés par la suite :
- *Le projet européen Esprit STEP-NC* : l'objet a été de développer un prototype pour le fraisage présenté en 2001, à Aachen en Allemagne. Les modules CAO d'Open Mind (hyperfact) et de Dassault systèmes (Catia V5) ont permis de générer un programme STEP-NC exécuté par la suite sur une CN Sinumerik 840D adaptée STEP-NC. Certains autres travaux concernant le prototypage rapide ont

été menés. Dans une seconde phase du projet, l'accent a été mis sur les mécanismes de retour d'informations dédiées à la surveillance d'usinage ainsi que des travaux d'inspection.

- *Le projet « Super model » aux USA* : fondé par le NIST et conjointement piloté par STEP Tools Inc., il a permis de constituer des bases de données pour les informations de fabrication associées à l'utilisation d'interface au format XML permettant de relier trajectoire, outils, géométries à usiner et phases d'usinage. Un outil permettant, à partir d'un fichier STEP, de générer un fichier STEP-NC a été développé : ST-Plan.
- *Le projet SMS (STEP Manufacturing Suite)* : financé par l'US Army par l'intermédiaire de sa branche TACOM (Tank-Automotive and Armament Command) et le National Automotive Center, il s'appuie sur des concepts développés précédemment pour implémenter l'architecture de STEP-NC en vue d'applications commerciales ou de défense.
- *Le projet américano-britannique RAMP (Rapid Acquisition of Manufactured Parts)* : a abouti au standard STEP ISO 10303-AP224 qui contient toutes les spécifications requises pour la fabrication d'un produit (entités, matériaux, tolérancement, etc.).

Ces projets ont permis de constituer des bases solides pour la standardisation du langage STEP-NC. La participation d'un grand nombre d'industriels majeurs à ces projets dénote bien d'une volonté d'investissements communs pour l'évolution de la programmation des MOCN. Cette forte demande confirme l'intérêt industriel pour le développement d'une programmation de haut niveau basée entités. Du côté universitaire, une communauté grandissante s'articule autour des principaux acteurs mondiaux (Figure 13).



Figure 13 : Une recherche STEP-NC internationale industrielle et universitaire

Les thématiques principales d'études des principaux acteurs travaillant sur le standard STEP-NC sont regroupées dans le Tableau 2 :

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
	STEP Tools Inc.	Interprétation des fichiers Step_NC 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 2 : Thématiques des principaux acteurs du standard STEP-NC [Rauch'07]

Il existe donc une communauté active pour le développement, la standardisation et l'implémentation du format STEP-NC. La standardisation de STEP-NC est une étape importante qui constitue la base sur laquelle reposent beaucoup de travaux. STEP-NC s'appuie sur les concepts véhiculés par le standard STEP (STandard for the Exchange of Product data model) que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

2.4 Le standard STEP-NC

Le standard STEP-NC est né de la volonté d'étendre les possibilités d'échange des données du standard STEP à la production sur machines à commande numérique. Il en reprend donc les bases et vise à faire de STEP-NC un protocole d'application du standard STEP.

2.4.1 Le standard STEP

Depuis le début des années 80, des travaux pour une meilleure intégration de l'entreprise dans un contexte d'ingénierie concurrente ont fait appel à diverses actions, notamment normatives, pour permettre l'échange, le partage et l'intégration des données techniques. Les premiers travaux mettent l'accent sur l'échange des données [Khalkhali'02]. Les premières normes proposées ciblaient des domaines d'applications spécifiques telles que la norme allemande VDA (Verband der Deutschen Automobilindustrie) pour l'industrie automobile [VDA'86] ou IGES (Initial Graphics Exchange Standards) [IGES'80] créée pour l'échange des données géométriques. Au début des années 90, l'ensemble de ces actions normatives ont été unifiées dans une norme internationale de l'ISO connue sous le nom de STEP (STandard for the Exchange of Product data model) [ISO10303].

2.4.1.1 Objectifs de STEP

L'objectif général de STEP est de définir une représentation non ambiguë des données du produit interprétable par tout système informatique et couvrant tout le cycle de vie des produits [Michael'01]. Cet objectif vise à faire de STEP :

- un format neutre interprétable par tout système informatique indépendamment du système particulier utilisé pour générer les données,
- un format couvrant un très vaste domaine de connaissance. Il intègre l'ensemble des catégories de produits (pièces élémentaires, assemblages, mécanismes, etc.),

des métiers (électronique, mécanique, ingénierie, etc.) et des phases du cycle de vie (conception, analyse, fabrication, maintenance, etc.).

Le standard STEP impose de : 1- faire collaborer des participants au sein d'un spectre extrêmement large de compétences 2- dans un format neutre. Ces deux problématiques ont pu être traitées par 1- la mise au point de la modélisation EXPRESS et 2- la structuration du standard STEP.

2.4.1.2 Modélisation EXPRESS

La définition d'un format neutre a imposé de développer une méthodologie de modélisation des données pour en assurer l'indépendance vis-à-vis des systèmes. C'est dans ce but qu'un langage formel de spécification des données, le langage EXPRESS, a été défini et standardisé comme la Part 11 de STEP [ISO10303-11'94]. Un modèle EXPRESS décrit un ensemble d'entités qui représentent les objets à modéliser. Ces entités sont définies par un ensemble de caractéristiques appelées attributs. Chaque attribut possède un domaine de valeurs licites (renvoie au type de données qui peuvent eux-mêmes être des entités) précisé par des contraintes d'intégrité. Les entités sont organisées de façon hiérarchique. Après adjonction de type de données, d'attributs et des contraintes nécessaires pour préciser les propriétés que doivent respecter toutes les populations données conformes au modèle, le modèle peut être traité automatiquement et compilé par le système. L'exemple de la Figure 14 propose un modèle de données contraint en EXPRESS :

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('EXEMPLE',LE FICHIER CONTIENT LA
DESCRIPTION DE...'),'1')
FILE_NAME('NOM',2010-05T16:20:30,'RAPHAEL LAGUIONIE','IRCCYN',
'PREPROC_VERSION','SYSTEME','AUTORIS');
FILE_SCHEMA('ETABLISSEMENT_SCHEMA');
END_SEC;
DATA;
#1 = ETUDIANT ('1700975121457', /* num_ss, h<rit> de la classe
personne*/
'Dupont', /* son_nom, h<rit> de la classe
personne */
(10.0,13.5,15.0,9.0)) /* ses_notes*/
(#5,#6,#7) /*les cours suivis par l'<tudiant*/
#2 = ETUDIANT ('2700286054018', 'Durand', (12.0,18.5,15.0),
(#5,#6..));
#3 = ENSEIGNANT ('1541211100004', 'Martin', $, (#5, #6));
#4 = ENSEIGNANT ('1600366015259', 'Dupont', $, (#6));
#5 = COURS(.MATH., A1);
#6 = COURS(.INFO., A2);
..
END_DATA;
END-ISO-10303-21;
```

Figure 14 : Exemple de fichier EXPRESS physique

Cette représentation textuelle est difficilement lisible. Un formalisme graphique, EXPRESS-G, a été défini pour donner une vue synthétique des modèles de données et faciliter leur conception dans les phases initiales d'analyse des problèmes à modéliser. Il ne permet cependant pas d'exprimer les contraintes d'intégrité. La Figure 15 propose la modélisation graphique associée au modèle EXPRESS de la Figure 14.

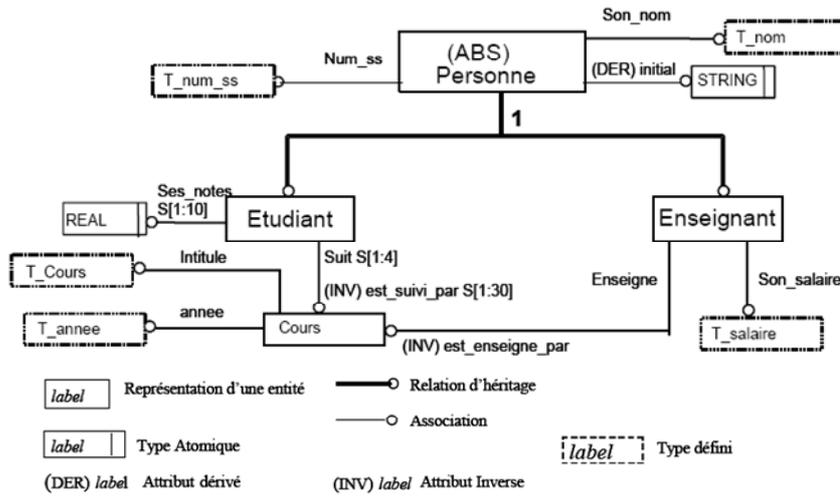


Figure 15 : Représentation graphique EXPRESS-G [Sardet'99]

Il est possible de passer automatiquement de la version graphique à la version textuelle et inversement. Le langage EXPRESS possède donc, à la différence de nombreuses notations comme UML (Unified Modeling Language [Rumbaugh'91]) qui ne sont que graphiques, à la fois une version graphique et une version textuelle qui rend ce langage traitable par une machine. La génération d'applications à partir d'un modèle EXPRESS est possible grâce aux nombreux outils existants (comme par exemple ceux disponibles sur le site de STEP Tools Inc. [STEPTools'10]). Ces applications permettent la création de bases de données (BD) pour stocker les instances du modèle, l'accès à une interface normalisée avec la BD et de programmes de lecture/écriture d'un fichier neutre.

2.4.1.3 Structure de STEP et protocoles d'application

Le nombre important et croissant de domaines balayés par le projet STEP nécessite la définition de modèles ainsi qu'une structuration de la norme. Malgré des applications différentes, certaines informations sont génériques et indépendantes du contexte et peuvent être utilisées par plusieurs applications. Ces ressources intégrées sont distinguées en deux types :

- *Ressources Intégrées Génériques* : elles se composent d'un ensemble de modèles de données génériques indépendants du type de produit, d'application et de processus de fabrication. Cet ensemble est défini en produits industriels génériques avec une applicabilité générale. On retrouve par exemple une partie matériaux, tolérances, représentation géométrique et topologique, etc.
- *Ressources Intégrées d'Application* : elles peuvent être des spécialisations de données génériques ou des entités complètement autonomes. On retrouve un certain nombre de données dites applicatives qui ne sont utilisées que pour des domaines applicatifs particuliers. Il s'agit par exemple de données spécifiques au dessin technique, à l'analyse éléments finis, à la cinématique, etc.

Au-delà de ces approches génériques, la spécialisation du savoir-faire commun aux différents métiers techniques est conservée au niveau des protocoles d'application (ou AP pour Application Protocol). Par exemple, le protocole d'application AP203, normalisé depuis 1994 a pour objectif de couvrir des données, associées à un produit lors de sa phase de conception, de type géométrique avec une gestion de la configuration. L'élaboration des protocoles d'application est spécifiée par une méthodologie résumée Figure 16 [Khalkhali'02] :

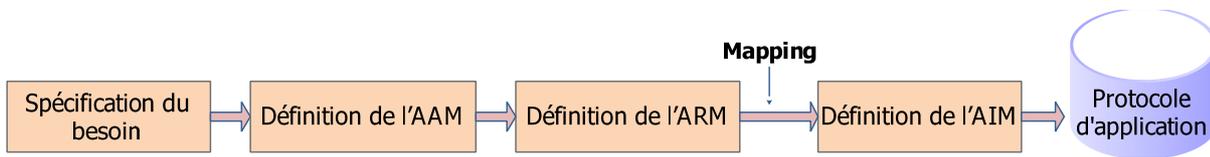


Figure 16 : Schéma du cycle de développement un protocole d'application

Les différentes étapes de cette méthodologie sont :

- *La spécification du besoin* qui consiste à exprimer le besoin en information du point de vue utilisateur.
- *La définition de l'Application Activity Model (AAM)* qui permet de construire le modèle informationnel du domaine d'application. Il permet d'établir un glossaire du vocabulaire utilisé, de mettre en avant les flux d'informations et les différentes activités du domaine. Cette modélisation est faite à l'aide du formalisme IDEF0 [Idef0].
- *La définition de l'Application Reference Model (ARM)* permet, à partir de l'AAM, de définir les unités fonctionnelles (ou UoF pour Unit of Functionality) qui consistent en un regroupement d'objets participants à une fonction donnée dans le

domaine d'application. L'ARM permet aussi de définir le modèle de données utilisateurs correspondant à une formalisation avancée des données dans le vocabulaire utilisateur. Cette modélisation peut-être effectuée en EXPRESS.

- *La définition de l'Application Interpreted Model (AIM)* est la phase de « mapping » au cours de laquelle le modèle de données de référence est défini à partir de l'ARM et des ressources intégrées. Cette opération permet de mettre en correspondance les données utilisateurs avec les ressources intégrées génériques et applicatives. Elle permet donc de construire et d'intégrer le protocole d'application au sein de la norme STEP ISO 10303 à partir du modèle ARM.

Les protocoles d'application couvrent une très grande variété de domaines applicatifs. Le standard STEP-NC est en cours de développement pour devenir le protocole d'application du domaine de la programmation des machines de fabrication à commandes numériques.

2.4.2 Normalisation de STEP-NC

Comme pour tout développement de protocole d'application, il existe un modèle de référence (ARM) et un modèle interprété (AIM) pour le standard STEP-NC. Après avoir présenté les 2 standards concernés, nous nous focaliserons sur le modèle de référence sur lequel portent certains travaux de cette thèse.

2.4.2.1 Modèle interprété (AIM) et modèle de référence (ARM)

Le modèle de référence (ARM) de STEP-NC est normalisé sous l'appellation ISO 14649 dont la standardisation revient au groupe de travail 7 du comité ISO TC184/SC1 [ISO14649-1'03]. Le comité ISO TC 184/SC4 travaille sur la standardisation du modèle interprété (AIM) à travers le protocole d'application 238 de la norme STEP (ISO 10303-AP238) [ISO10303-238'07]. La principale différence entre ces deux modèles est le degré d'utilisation des méthodes de représentation STEP ainsi que leur architecture technique [Feeney'03]. Le tableau de comparaison suivant (Tableau 3) reprend les principales différences entre ces modèles :

L'ISO 14649 est constitué de différentes parties (ou Part) spécifiques aux applications. Les parties administratives permettent de spécifier les outils de représentation ainsi que les syntaxes utilisées. La part 10 « general process model » contient le modèle général commun aux parties suivantes [ISO14649-10'04]. La programmation STEP-NC ne se restreint pas à l'usinage mais prévoit une programmation des machines à commande numérique dans un sens plus large. Elle inclut en effet d'autres procédés de fabrication ainsi que l'inspection. Les développements actuels de l'ISO 14649 permettent de proposer :

- le fraisage/perçage (ISO 14649 part 11 [ISO14649-11'04]) ,
- le tournage (ISO 14649 part 12 [ISO14649-12'03]) ,
- l'électroérosion (ISO 14649 part 13 [ISO14649-13'03]) est en cours de développement [Richard'04; Sokolov'06],
- la fabrication par ajout de matière (ISO 14649 part 17) dont l'IRCCyN est en charge. Une première proposition normative a été soumise [Bonnard'08],
- l'inspection (ISO 14649 part 16 [ISO14649-16'04]).

L'ISO 14649 s'appuie d'autre part sur certaines parties et protocoles d'applications de la norme STEP ISO 10303. En particulier, la description des entités d'usinage (Manufacturing Features) est calquée, à quelques détails près (différence principale dans la définition des repères et origines), sur le protocole d'application AP224 [ISO10303-224'06]. De même, le langage de modélisation est le langage EXPRESS de STEP Part 11. La construction d'un programme STEP-NC ISO 14649 est réalisée en utilisant la syntaxe d'échange des données de STEP Part21 [ISO10303-21'02]. Nous nous intéressons dans le paragraphe suivant à cette syntaxe d'un programme STEP-NC.

2.4.2.3 Syntaxe d'un programme STEP-NC ISO 14649

Le format de fichier STEP Part 21 est actuellement la méthode d'implémentation la plus commune. Elle décrit l'organisation pour la représentation des entités STEP en texte. Cette description s'articule autour de plusieurs sections (Figure 18) :

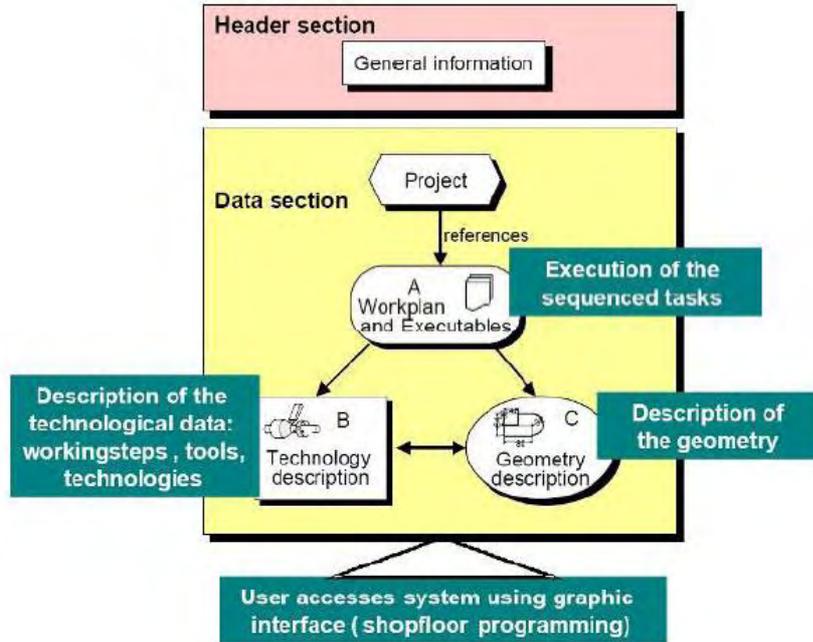


Figure 18 : Structure d'un programme STEP-NC [ESPRIT'00]

La section d'en-tête ou « Header » permet d'inscrire les informations d'ordre général comme le nom du fichier, de l'auteur, la date ou des commentaires. La section des données ou « Data » est la section principale contenant l'ensemble des informations de géométrie et de fabrication. Après une première partie « Project » permettant l'initialisation de l'exécution du programme, celle-ci est divisée en trois parties. La partie A, « Workplan and Executables » recense les informations concernant l'ordre et de séquencement des opérations ainsi que les exécutables associés. La partie B, « Technology description » décrit les entités d'usinage, les opérations, les outils, etc. La partie C renvoie à la géométrie des entités de fabrication. Ses différentes sections se retrouvent dans l'exemple suivant extrait d'un programme STEP-NC (Figure 19) :

```

ISO-10303-21;
HEADER;
FILE DESCRIPTION(('A STEP-NC testing file'), '1');
FILE NAME('sample part1.stp', $, ('AUMS'), ('',
'Prototype Mill', ', ', ''));
FILE SCHEMA(('STEP-NC milling schema'));
ENDSEC;
DATA;
// Project and workplan
#1=PROJECT('Contour', #2, (#3));
#2=WORKPLAN('Work plan', (#4), $, #5);
#3=WORKPIECE('Workpiece', #6, 0.1, $, $, #8);
// Working steps
#4=MACHINING WORKINGSTEP('Rough
Contour', #13, #16, #17);
#5=SETUP('main setup', #44, #48, (#51));
#6=MATERIAL('ST-50', 'Steel', (#7));
#7=PROPERTY PARAMETER
('E=200000 N/mm^2');
#8=BLOCK('Block', #9, 260.000, 210.0, 110.000);
// Geometric data
#9=AXIS2 PLACEMENT 3D
('BLOCK', #10, #11, #12);
yyyy
// Manufacturing features
#16=GENERAL OUTSIDE PROFILE
('Profile', #3, (#17), #18, #22, $, $, $, #23, $, $); // Operation data
#17=SIDE ROUGH MILLING($, $, 'Contour
profile', #38, 10.0, #39, #40, #43, $, $, $, 20. 0, 5. 0);
#18=AXIS2 PLACEMENT 3D('Position of contour',
#19, #20, #21);
#19=CARTESIAN POINT('Position of contour',
(40.000, 90.000, 100.000));
#20=DIRECTION('', (0.0, 0.0, 1.0));
#21=DIRECTION('', (1.0, 0.0, 0.0));
#22=TOLERANCED
LENGTH MEASURE(20.000, $, $, $);
#23=COMPOSITE CURVE('Contour Profile',
(#24, #25, #56), .F.);
// Tool data
#40=CUTTING TOOL('Endmill
10 mm', #41, (), (50.000), 50.000);
#41=TAPERED ENDMILL(#42, 3, .RIGHT, ., .F., $, $);
#42=TOOL DIMENSION(10.000, $, $, $, $, $);
// Machining technology
#43=MILLING TECHNOLOGY($, .TCP, $, 3.3333, $,
0.10, .T, ., .F, ., .F.);
#44=AXIS2 PLACEMENT 3D('Reference point to
Machine zero', #45, #46, #47);
#45=CARTESIAN POINT('', (20.000, 30.000, 10.000));
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;

```

Figure 19 : Exemple de programme STEP-NC

Une synthèse graphique des informations disponibles dans le programme STEP-NC est présentée Figure 20 :

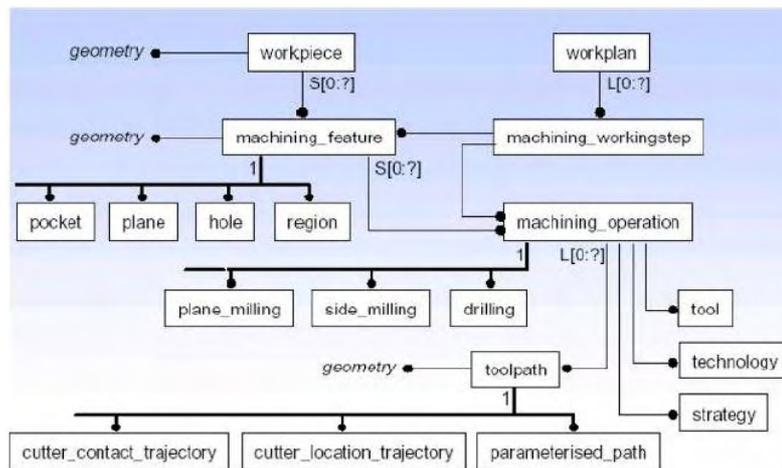


Figure 20 : Organisation d'un fichier STEP-NC en EXPRESS-G

À travers les entités et leurs attributs, le programme STEP-NC rassemble l'ensemble des données de géométrie et de fabrication permettant d'être directement utilisé par la commande numérique. L'implémentation de ces données natives par le système FAO ou au sein du DCN évite les conversions de format et pertes d'informations

associées. L'existence de parties distinctes pour le stockage des données de géométrie et de process permet une simplification du flux et du stockage des données. De plus, cela offre des possibilités pour l'échange des données avec des modules situés en amont de la chaîne numérique (en particulier avec la CAO).

2.4.2.4 Méthode d'implémentation STEP Part 21 et Part 28

L'implémentation de STEP-NC à partir de STEP Part 21 est actuellement la plus répandue mais certains travaux visent à évoluer vers une implémentation à partir de STEP Part 28 [ISO10303-28'08], qui concerne l'intégration du langage XML (eXtended Markup Language) [Lubell'02] à la norme STEP. Dans cette optique, les développements à l'ERC-ACI de l'université de Séoul ont permis de mettre au point un interpréteur STEP-NC en XML [Lee'03]. Le système a été testé avec 2 pièces, les fichiers étant écrits à partir de l'éditeur XML de l'interpréteur puis exécutés sur le contrôleur STEP-NC [Lee'06]. Un système STEP-NC pour le tournage a été présenté par Choi et al. [Choi'06] où le schéma XML est défini à partir de l'EXPRESS pour supporter la fabrication par Internet (Web-based Manufacturing). D'autres travaux portent sur la planification du processus de fabrication assisté par ordinateur (CAPP). Amaitik et Engin Kilic ont développé un système intelligent s'appuyant sur une approche d'intelligence artificielle pour, à partir d'un ensemble d'entités d'usinage AP224, générer une gamme de fabrication ISO 14649 en XML [Amaitik'07]. Un système CAPP de l'université d'Auckland adopte une architecture réseau Web dans lequel XML est utilisé pour représenter les informations STEP-NC au sein de bases de données [Xu'07]. L'ensemble de ces travaux a permis de mettre en avant les possibilités qu'offre XML dans le cadre de la programmation STEP-NC, et en particulier les avantages qu'il offre en matière d'extensibilité, d'échange de données via des pages Web (nombreux avantages en e-manufacturing) et de facilité d'interprétation par l'utilisateur humain. Cependant, la syntaxe STEP Part21 demeure plus ancienne et répandue que la Part 28. La conséquence directe est qu'aujourd'hui la plupart des applications intégrant STEP sont basées sur la Part 21, en particulier au sein des systèmes de CAO. Ainsi, ces deux approches peuvent s'avérer complémentaires [Peak'04], et sont toutes deux bien adaptées à la programmation STEP-NC.

2.5 Travaux s'appuyant sur le standard STEP-NC

Après avoir défini les fondements sur lesquels repose le standard STEP-NC, nous focalisons sur les travaux scientifiques permettant son évolution, sa diffusion ainsi que les avancées permises par son utilisation.

2.5.1 Un enjeu majeur : l'interopérabilité

L'interopérabilité peut être définie comme la capacité des systèmes informatiques à échanger des informations sans rencontrer des problèmes [Ray'06]. Martin [Martin'05] définit trois niveaux de connectivité entre systèmes différents : les systèmes unifiés où les informations sont transférées sans nécessité d'altérations, les systèmes intégrés où les informations sont échangées sur la base de standards prédéfinis, et les systèmes interopérables où l'échange des informations se fait sur la base de règles dynamiques créées selon la nécessité. La Figure 21 représente un réseau global de production supporté par des systèmes de production interopérables :

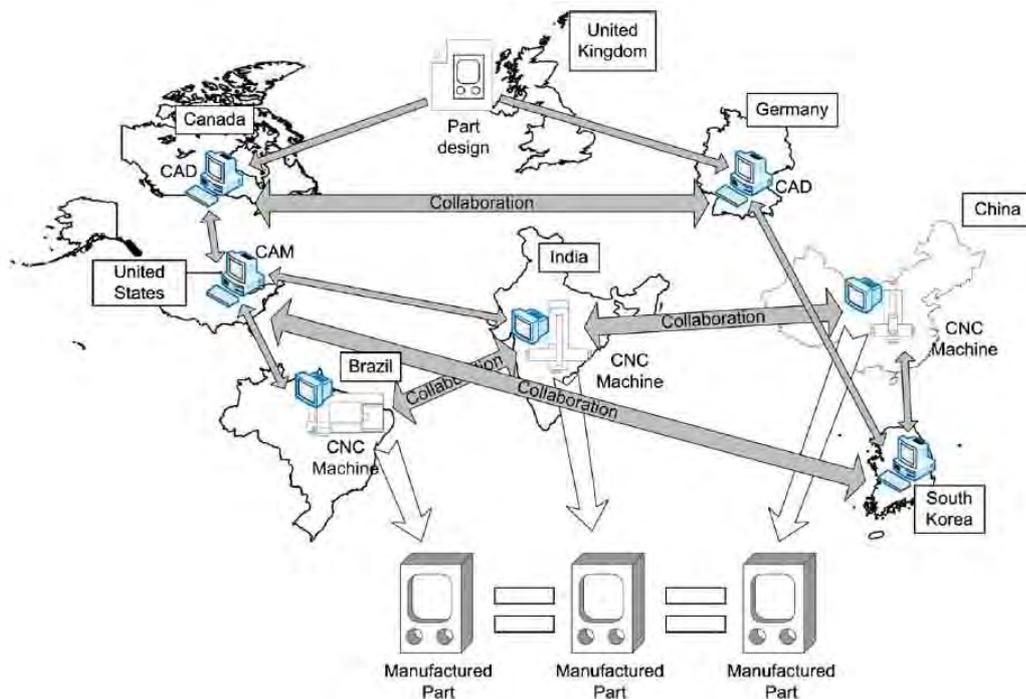


Figure 21 : Systèmes de production interopérables [Newman'08]

Un tel système de production nécessite de rendre interopérable chacun des maillons de la chaîne numérique de la CAO jusqu'à la CN. STEP-NC offre de nouvelles possibilités dans la mesure où il permet d'échanger des données de géométrie (CAO),

de préparation de la production (CAPP et FAO) et de production (DCN et inspection) [Newman'08]. Après avoir explicité les travaux s'intéressant la notion d'entités sur laquelle se base la programmation STEP-NC, nous focalisons sur les travaux contribuant à l'amélioration de l'interopérabilité à chacun des maillons de la chaîne numérique : CAPP, FAO, DCN et inspection.

2.5.2 Une programmation basée sur la notion d'entités

La définition des entités de fabrication est un prérequis important pour la mise en œuvre et la diffusion du standard STEP-NC [Xu'06]. Les entités actuellement définies dans STEP-NC s'appuient sur le protocole d'application STEP AP224. Beaucoup de travaux se sont intéressés à la manière de reconnaître automatiquement des entités de fabrication à partir d'une géométrie STEP AP203 ou AP214 [Kumar'10]. La notion d'entités de fabrication est très directement liée au procédé de fabrication utilisé [Mantyla'96]. Ainsi, une même géométrie de pièce mène à des entités de fabrication différentes en usinage et en fabrication par ajout de matière. Il existe aujourd'hui peu de systèmes permettant de reconnaître automatiquement et de façon fiable les entités de fabrication, en particulier dans le cas de formes complexes ou d'esthétique [Stroud'06]. L'utilisateur est encore aujourd'hui sollicité dans la plupart des cas, en particulier lors du recours à plusieurs procédés. Rosso et al. montrent cependant que les entités de fabrication de l'ISO 14649 Part10 supportent parfaitement le cas de tournage-fraisage de pièces asymétriques [Rosso'04].

Pour des applications STEP-NC, deux principaux outils permettent la reconnaissance des entités de fabrication pour le fraisage. Le module FB Mach (Feature-Based Machining) du logiciel ST-Plan développé par STEP Tools Inc. [STEPTools'10] contient une librairie d'entités d'usinage ainsi que des algorithmes de reconnaissance pour entités surfaciques ou volumiques (utilisation de trois approches possibles : reconnaissance automatique, interactive et manuelle [Han'00]). Le module PosSFP (Shop Floor Programming) de l'université de PosTech en Corée du Sud permet aussi de générer automatiquement des entités STEP AP224 à partir d'un fichier STEP AP203 [Suh'02a; Suh'02c; Suh'03]. Certains des travaux de cette thèse ont porté sur l'utilisation et l'implémentation de nouvelles possibilités dans le module PosSFP que nous serons amenés à présenter plus en détail au chapitre 3.

2.5.3 Planification du processus de fabrication (CAPP)

La planification du processus de fabrication (CAPP ou Computer-Aided Process Planning) est une tâche complexe demandant une expertise poussée qui permet de transformer les informations du modèle géométrique en gamme de fabrication et de séquencer les opérations de fabrication. Un grand nombre de facteurs affecte les choix effectués comme la géométrie de la pièce, le matériau, les procédés de fabrication disponibles, les ressources matérielles disponibles, etc. Les principales étapes de cette planification sont la sélection des procédés et des entités de fabrication (voir paragraphe précédent), le choix des origines [Arezoo'00], le séquençement des opérations [Wu'98], la sélection des outils [Lin'97], la sélection des trajectoires et des paramètres machine [Boogert'96], et la conception des systèmes de fixation [Ma'99]. L'ensemble de ces paramètres à prendre en compte pour l'élaboration de la gamme appelle à l'utilisation de méthodes d'optimisation avec des approches par algorithmes génétiques [Morad'99], réseaux de neurones [Devireddy'99], réseaux de Pétri [Lee'95], etc. De nombreuses autres approches, en particulier l'approche basée agents [Sun'01], sont détaillées dans [Wang'07b].

La programmation basée entités STEP-NC offre un support standardisé qui se prête bien à l'aide informatisée de la planification du processus de fabrication. Nous retrouvons dans ce domaine les travaux de l'université de Bath qui propose un système de planification de la production des pièces prismatiques nommé AB-CAM [Allen'05]. Ce système couple les décisions de l'utilisateur avec un système hiérarchique de prise de décisions automatisées. Les travaux de Fichtner et al. sur un système basé agents pour l'interprétation et l'exécution des programmes pièce STEP-NC [Fichtner'06] ont été étendus par Nassehi et al. pour le développement de systèmes multi-agents pour la programmation assistée par ordinateur [Nassehi'06c]. Le système, nommé MASCAP, a pu être mis en œuvre dans le cas de la planification STEP-NC de l'usinage de pièces prismatiques comportant des entités interférentes. Une autre application sous forme de systèmes à agents mobiles a pu être mise en place pour la sélection des informations d'outillage [Nassehi'06b]. De même, une approche de planification pour la fabrication globale adaptative a pu être présentée [Nassehi'06a]. D'autres travaux de l'université chinoise de Shandong proposent un modèle de planification du processus de fabrication basé STEP-NC pour la génération des entités de fabrication, la génération des opérations et de la gamme de fabrication.

Des modules ont été développés et permettent l'optimisation à chaque étape [Liu'04]. L'université d'Auckland a développé un système CAPP pour la fabrication collaborative. Le système utilise STEP Part21 et le standard STEP-NC (AP238) pour construire un modèle de données universel. Deux modes de planification, intégré et interfacé, sont supportés [Xu'04b]. Les programmes STEP-NC physiques et XML sont utilisées comme modèles de données par défaut pour unifier les formats durant les phases de conception, planification de la fabrication et production.

La planification du processus de fabrication est une étape importante regroupant l'ensemble des choix permettant de passer du modèle à la mise en œuvre de la production. STEP-NC offre un standard de programmation basée entités supportant l'ensemble des données du modèle jusqu'à la CN. En cela, il offre de nouvelles possibilités d'unification et d'intégration des données durant toute la phase de planification du processus de fabrication. Une fois cette phase terminée, les données STEP-NC peuvent être directement exécutées sur le contrôleur de la machine.

2.5.4 Interprétation, exécution et contrôle de la fabrication à partir de STEP-NC

La capacité d'interpréter et d'exécuter des données STEP-NC sur des moyens de production constitue un point clé de la démarche de programmation basée entités. Un certain nombre de travaux proposent des concepts et applications permettant d'utiliser STEP-NC pour rendre plus ouvertes et interopérables les machines à commande numérique. Ces travaux peuvent être classés en quatre grandes catégories [Xu'06] : les systèmes conventionnels utilisant STEP-NC, les contrôleurs interprétant les données STEP-NC, les systèmes STEP-NC avancés intelligents et les systèmes STEP-NC collaboratifs.

2.5.4.1 Les systèmes conventionnels utilisant STEP-NC

Le premier objectif de ces systèmes est de valider le contenu et la structure des données STEP-NC pour permettre directement au contrôleur d'exécuter la production. L'utilisation de « traducteurs » hors DCN permet de convertir le programme STEP-NC en code G. Les travaux réalisés lors du projet SuperModel aux USA ont permis de mettre au point un ensemble d'outils logiciels (ST-Plan, ST-Machine, STIX, etc. [STEPTools'10]). Un adaptateur « plug-in » STEP-NC AP238

pour le logiciel Gibbs CAM a été développé par STEP-Tools Inc. L'utilisation de ST-Plan permet la conversion d'un fichier STEP AP203 en STEP-NC AP238. Il comporte deux modules principaux, FBMach (Feature-Based Machining) et FBTol (Feature-Based Tolerancing). FBMach permet la reconnaissance des entités d'usinage ainsi que la définition des opérations associées et FBTol concerne la définition des tolérances. Le plug-in ST-Machine permet l'interfaçage avec le logiciel Gibbs CAM pour la génération des trajectoires. Un fichier code G est ensuite envoyé à la machine pour l'usinage. Une librairie ouverte de code STIX permet d'implémenter des fonctions et des cycles pour l'exécution de l'AP-238. La chaîne numérique ainsi créée est schématisée Figure 22. :

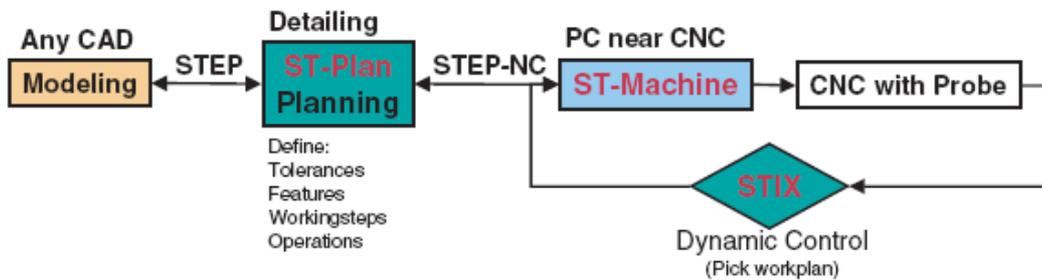


Figure 22 : Chaîne numérique proposée par STEP Tools Inc. [IMS'03]

Ces premières implémentations concernant STEP-NC AP238 [Hardwick'02] ont pu faire l'objet de développements complémentaires qui forment les bases de travail du comité ISO TC184/SC4 pour la standardisation de l'AP238. Plusieurs démonstrations ont été proposées, impliquant des éditeurs de FAO et les constructeurs de CN [Hardwick'06]. Les travaux de Venkatesh et al., basés sur ces développements, ont permis l'utilisation de la programmation centre outil (TCP ou Tool Center Programming) pour illustrer un scénario de production interopérable entre Boeing et le NIST (National Institute for STandardization aux USA) [Venkatesh'06]. Le fichier STEP-NC AP238 contient alors l'ensemble des trajectoires outils générées par un logiciel FAO sous format neutre de Cutter Location (fichier CL extraits par exemple d'un fichier Catia Part 3). Cela permet ainsi de pouvoir exécuter le fichier STEP-NC AP238 sur plusieurs machines mais nécessite cependant encore une opération de post-processing effectué par le logiciel ST-Machine. D'autres travaux, réalisés à l'université de Bath, présentent le cadre de l'implémentation de STEP-NC AP238 au sein d'un système CN. Celui-ci est constitué de modules d'interprétation, de planning, de simulation et d'un noyau CN. L'implémentation a actuellement été réalisée

uniquement pour le module d'interprétation dans le cas de données de l'ISO 14649 [Liu'06].

Les systèmes conventionnels utilisant STEP-NC interprété en dehors de la CN présentent l'avantage de pouvoir être rapidement mis en place dans un contexte et sur des équipements industriels. Comme beaucoup des développements réalisés dans le cadre de l'AP238, les solutions proposées sont rapidement commercialisables et trouvent un écho favorable dans le milieu industriel. Elles demeurent cependant encore assez éloignées des ambitions initiales de STEP-NC dans la mesure où ils nécessitent toujours une étape de post-processing, l'utilisation du code G et l'impossibilité de feed-back de l'information de la CN vers les modules de CFAO.

2.5.4.2 Les contrôleurs interprétant STEP-NC

Les contrôleurs interprétant STEP-NC rendent possible le traitement des données STEP-NC directement au sein du DCN. Certains d'entre eux utilisent toujours le code G pour l'exécution de la fabrication mais de façon totalement transparente pour l'utilisateur. Les premiers travaux de cette catégorie ont été menés par le laboratoire WZL à Aachen proposant un premier prototype de commande numérique industrielle conforme au format STEP-NC [Weck'03]. Les données STEP-NC ISO 14649 ont pu être intégrées directement au contrôleur Siemens 840D permettant une visualisation des entités d'usinage et des opérations associées dans une version modifiée STEP-NC du système conversationnel machine ShopMill (Figure 23) [Weck'01; Weck'02].

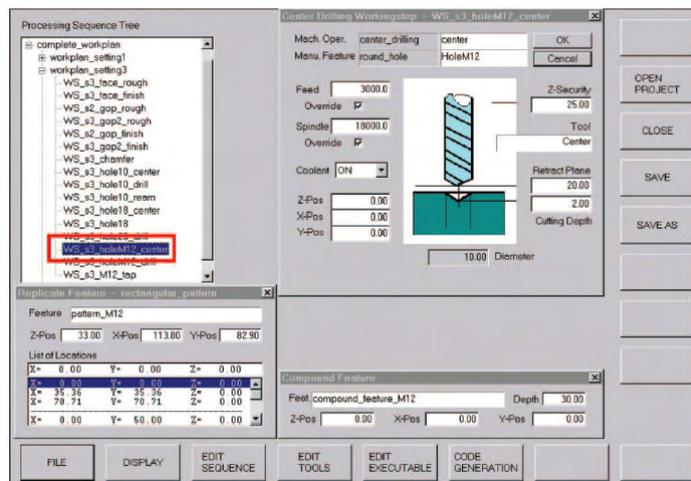


Figure 23 : Interface graphique Siemens ShopMill STEP-NC [Weck'01]

Cette interface permet d'analyser les données STEP-NC et les opérations d'usinage sont exécutées à partir des cycles préexistants. Le schéma suivant illustre l'architecture du contrôleur STEP-NC Siemens proposé (Figure 24) :

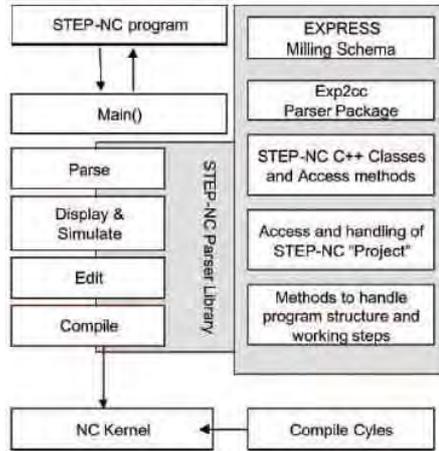


Figure 24 : Architecture contrôleur Siemens interfacé STEP-NC

Des travaux complémentaires ont abouti à la proposition d'un système complet pied-machine comprenant WZL-Mill, un système de programmation compatible STEP-NC, et WZL-WOP (Workshop Oriented Programming). Des applications commerciales avec Catia et OpenMind ont été présentés par Volvo et Daimler Chrysler pour illustrer les capacités d'intégration du standard dans les suites CFAO et exporter le fichier STEP-NC résultant vers le contrôleur Siemens 840D. En complément de ces travaux sur le fraisage, un prototype pour le tournage a été développé par l'ISW de Stuttgart [Storr'02]. Le logiciel STEPTurn permet d'importer la géométrie des entités d'usinage, de définir les stratégies d'usinage et de générer un programme STEP-NC. Le contrôleur Siemens 840D interprète et convertit les données STEP-NC pour une exécution directe sur le conversationnel machine Siemens ShopTurn.

Malgré des résultats concluants, il n'a pas été donné de suite à ces travaux. Ils ont cependant permis de montrer que l'utilisation de l'ISO 14649 propose une représentation de haut niveau des données de fabrication permettant par exemple le pilotage des logiciels commerciaux (conversationnel FAO ou machine) pour la génération et l'exécution de la fabrication sur des moyens industriels. Les solutions présentées précédemment (utilisation du conversationnel machine) ne permettent

cependant aucun feed-back de la CN vers la CFAO, occultant ainsi un des fondements majeurs du STEP-NC.

2.5.4.3 Les systèmes STEP-NC avancés, intelligents et collaboratifs

Le contrôle intelligent des MOCN ne peut être réellement réalisé avec l'utilisation du code G tant les informations de bas niveau échangées limitent les possibilités d'optimisations adaptatives ou en temps réel. Avec STEP-NC, les informations du modèle géométrique et de process sont disponibles au niveau CN. Cela ouvre de réelles perspectives de contrôle intelligent des MOCN, en particulier par exemple dans les domaines du contrôle adaptatif, de monitoring, des modifications temps réelles des paramètres process et des trajectoires, du feed-back des informations d'usinage vers la CAPP/FAO/CAO, etc. Pour parvenir à ceci, il a été proposé d'implémenter des systèmes ne faisant pas du tout appel au code G.

Parmi les prototypes réalisés, la plate-forme développée par l'équipe du Prof. Suh de l'université PosTech en Corée du Sud présente l'intégration complète d'un système de contrôle autonome basé entités STEP-NC [Suh'02a; Suh'02c; Suh'03]. Le système est composé de plusieurs modules principaux (Figure 25) :

- PosSFP (Shop Floor Programming) : à partir d'un fichier d'entrée CAO STEP ou Parasolid, il permet la reconnaissance automatique ou manuelle des entités de fabrication et le choix des paramètres de stratégies associées. Il permet aussi l'édition de fichiers STEP-NC ISO 14649. Ce module ayant servi de support à nos développements, nous en détaillerons le fonctionnement dans le chapitre 3 de ce manuscrit,
- PosTPG (Tool Path Generator) : génère les parcours outils à partir des données process lues dans le programme STEP-NC,
- PosTPV (Tool Path Viewer) : affiche les trajectoires construites dans PosTPG,
- PosMMI (Man Machine Interface) : constitue une interface homme-machine de la plate-forme de démonstration,
- PosCNC (Computer Numerical Control) : CN logicielle pour la commande automate de la MOCN 3 axes associée à la plate-forme.

L'ensemble de ces modules communiquent par l'intermédiaire d'un réseau CORBA [Geib'00] permettant ainsi la mise en relation des différents environnements.

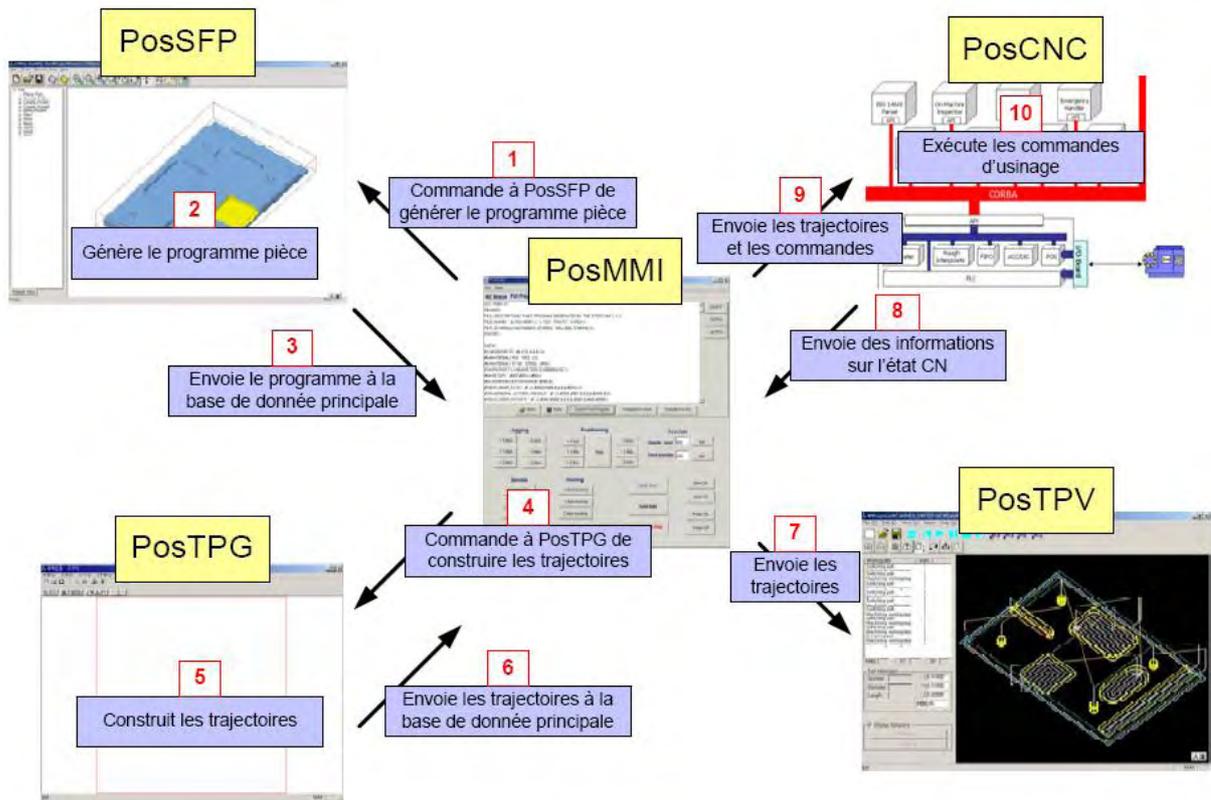


Figure 25 : Etapes de mise en œuvre de la plate-forme de PosTech [Rauch'07]

Au sein de cet environnement, un compilateur EXPRESS permet de convertir les informations STEP-NC de gamme en une séquence non linéaire d'opérations sous la forme d'un graph de séquences (PSG ou « Process Sequence Graph » illustré Figure 26) [Suh'03]. Des opérations booléennes 'et/ou' permettent à la pièce d'être usinée avec des séquences différentes opérations, rendant les possibilités d'exécution CN flexibles, intelligentes et autonomes.

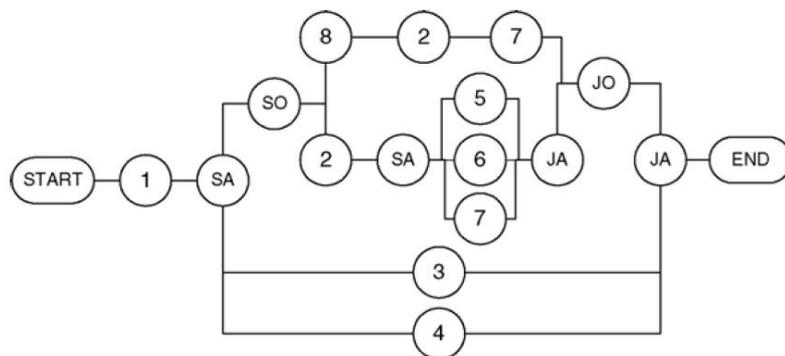


Figure 26 : Process sequence graph [Suh'03]

Ce système présente ainsi de bonnes bases pour l'implémentation de la programmation STEP-NC sans code G. Il demeure cependant un outil de développement encore assez éloigné de la réalité du monde industriel (Figure 27).

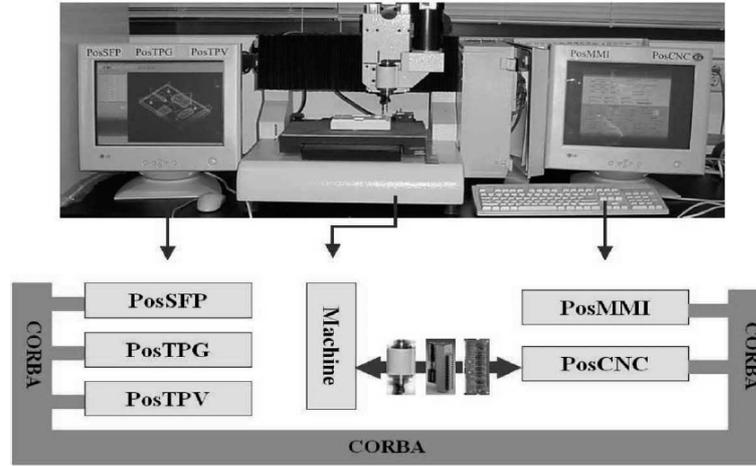


Figure 27 : Prototype Coréen STEP-NC

Une autre application à l'université d'Auckland a permis de démontrer un scénario d'usinage sans code G sur un tour CN compatible STEP-NC [Xu'04a]. Ces travaux se composent d'une partie de remise à niveau d'une machine existante et du développement d'un convertisseur STEP-NC. Le système de contrôle CompuCam est utilisé pour remplacer la CN [Comp'10]. Il utilise un langage propre (6 K Motion Control language) et permet l'interfaçage avec des logiciels CAPP/FAO par l'intermédiaire de langages tels que le Visual Basic, Visual C++ et Delphi. Les données STEP-NC AP238 sont converties en langage de plus bas niveau qui, malgré que ce ne soit pas du code G, présentent des similarités avec une traduction STEP-NC-code G. D'autres développements de l'université d'Auckland proposent le développement d'un adaptateur pour l'implémentation du STEP-NC sur les systèmes CN natifs (CN industrielles par exemple) [Wang'04]. Le « Native STEP-NC Adaptator » propose, à partir d'une base de données constructeur et d'un module d'interprétation, d'adapter la programmation STEP-NC sur des CN existantes. L'avantage d'un tel système est de permettre la planification collaborative du processus de fabrication grâce à la généralité de STEP-NC, et de pouvoir ensuite réaliser les opérations sur les moyens industriels. Outre le concept, il n'a cependant pas été proposé d'implémentation sur des moyens industriels et ne permettent pas de retour de l'information de la CN vers la CFAO. Xu et al. s'intéressent aussi à

l'utilisation conjointe de STEP-NC et de « Function blocks » basées sur la norme IEC 61499 [IEC'99]. Ils proposent une architecture CNC-FB (Computer Numerical Control - Function Blocks) constituée de différentes couches d'applications pour simplifier la conception des CN et l'adapter à l'utilisation de STEP-NC [Minhat'09]. Cette approche permet de même de construire des modules 'Plug-and-Play' pour l'adaptation sur des CN existantes [Wang'07a].

Les systèmes STEP-NC proposés dans cette partie ouvrent la voie de la fabrication STEP-NC totalement intégrée pour la plupart sans l'utilisation de code G. Ils mettent en avant le potentiel collaboratif de la programmation basée entités et ouvre de nouvelles voies pour l'optimisation adaptative ou temps réel des paramètres et trajectoires d'usinage. L'ensemble de ces développements demeure cependant peu ou pas appliqué sur des moyens industriels. Cela représente aujourd'hui un réel manque, tant au niveau démonstratif des possibilités concrètes de STEP-NC, que pour l'implémentation des outils nouveaux d'optimisation adaptative ou temps réel associés à la disponibilité des informations de CAO/CAPP/FAO au sein du DCN.

2.5.5 Inspection et fabrication en boucle fermée

L'inspection sur machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), l'inspection en ligne sur MOCN et l'usinage en boucle fermée sont d'autres centres d'intérêt de la recherche STEP-NC. L'intégration des possibilités de la programmation basée entités sur ces aspects ont fait l'objet de travaux aboutissant à l'élaboration de l'ISO 14649 Part16 pour l'inspection. Les premiers travaux ont donné le cadre de l'inspection basée STEP-NC pour la mesure des erreurs géométriques des pignons coniques [Suh'02d] et suggéraient l'ajout de l'inspection en ligne à l'ISO 14649. Ali et al. ont alors développé le cadre de l'implémentation d'une telle norme dans laquelle les gammes d'inspection peuvent être interprétées en ligne aussi bien par la MOCN que par une MMT [Ali'05].

Suite à la création de la partie 16 de l'ISO 14649 pour l'inspection, Brecher et al. ont pu repositionner les possibilités d'usinage en boucle fermée offertes par celle-ci [Brecher'06] en comparaison avec d'autres standards comme le protocole d'application STEP pour l'inspection ISO 10303-AP219 [ISO10303-219'07]. À partir de là, des systèmes d'usinage en boucle fermée ont pu faire appel à l'inspection pour le retour direct de la géométrie réelle de la pièce usinée et opérer les corrections nécessaires.

Wosnik et al. ont suggéré une approche pour permettre le retour des données process au sein des moyens d'usinage équipés STEP-NC s'appuyant sur les données des axes et différents servomoteurs [Wosnik'06]. Les travaux de Zhao et al. ont permis d'étendre les possibilités d'inspection STEP-NC en ligne en proposant l'intégration d'opérations d'inspection pour l'usinage en boucle fermée au sein même du programme STEP-NC [Zhao'08].

Une autre partie de la recherche concerne le feed-back de la commande numérique à la FAO [Denkena'02].

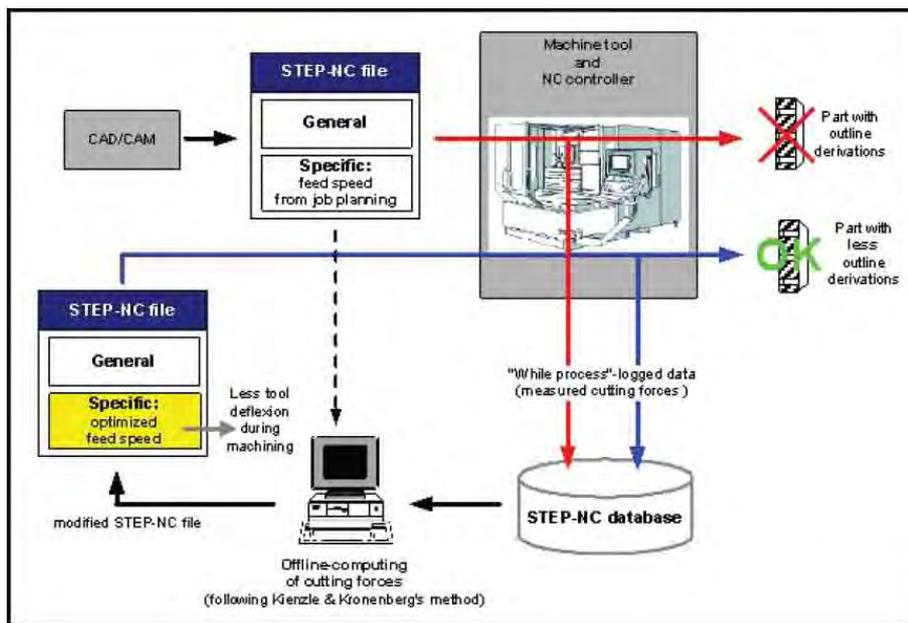


Figure 28 : Application STEP-NC avec feed-back de l'information [Denkena'02]

Un algorithme de compensation off line a été développé et permet de modifier le programme STEP-NC pour diminuer les effets des déformations de l'outil en UGV. Pour ceci, les valeurs mesurées des efforts de coupe sont récoltées dans une base de données (STEP-NC data base). A partir de modèles de déformation d'outil, il est alors possible de régénérer le programme STEP-NC corrigé, dont les vitesses d'avance ont été modifiées et optimisées.

Le standard STEP-NC propose ainsi un support complet pour la programmation basée entités des MOCN. La fabrication en boucle fermée a pu être mise en œuvre avec des applications d'inspection en ligne STEP-NC et de feed-back des données de fabrication jusqu'à la FAO pour la compensation des défections outils. Ces

applications demeurent cependant hors ligne car les systèmes STEP-NC utilisés requièrent souvent encore l'utilisation transparente du code G. STEP-NC offre cependant des perspectives nouvelles pour la gestion et le feed-back des informations au sein de la CN et en direction de la FAO/CAO. Il permet aussi un traitement de la fabrication en boucle fermée uniquement au sein de la CN dans les cas d'inspection par exemple, sans nécessiter un retour FAO systématique.

Les applications présentées dans ce paragraphe sont encore assez restreintes mais démontrent l'intérêt d'un standard de haut niveau permettant le feed-back de l'information entre les différents modules.

2.6 Conclusions et discussion

Ce chapitre bibliographique a permis de définir le cadre de nos travaux de recherche. Après une étude détaillée de la programmation actuelle et des technologies des DCN, nous sommes en mesure de cibler les manques liés à l'utilisation d'un standard de programmation désuet : le code G. Celui-ci crée une réelle rupture dans la chaîne numérique de fabrication entre la CFAO et le DCN, ne supportant que la description unidirectionnelle de bas niveau d'actions élémentaires.

Une alternative nouvelle a été proposée et détaillée avec la programmation basée entités des MOCN. Avec l'étude des travaux sur le standard STEP-NC, le potentiel et la viabilité d'une telle approche ont pu être démontrés. Cette nouvelle vision de la chaîne numérique de fabrication s'avère prometteuse et propose un standard de haut niveau permettant l'intégration de la CN au sein de la chaîne CAO/CAPP/FAO. STEP-NC demeure cependant un standard émergent dont les avantages ne sont pas toujours exploités lors des différents développements. Nous avons pu en particulier identifier plusieurs verrous technologiques et idéologiques freinant la mise en œuvre et le déploiement de ce standard. Dans un premier temps, STEP-NC souffre de sa « jeunesse » et nécessite des travaux d'amélioration et de standardisation pour pouvoir acquérir une maturité suffisante à son intégration dans un contexte industriel. De plus, il n'existe pas réellement de propositions pour réaliser cette intégration au sein d'un système de fabrication complet, prenant en compte tous les aspects de l'entreprise et en particulier le contexte de fabrication. Ce dernier peut faire appel à plusieurs procédés de fabrication dont le standard STEP-NC supporte

l'échange de données. Il n'existe dans ce domaine pas de travaux spécifiques montrant les réels bénéfices de cette approche. Pour finir, de réels efforts d'implémentation et de mise en œuvre de la programmation STEP-NC sur des moyens industriels manquent cruellement à la démonstration et à la diffusion des concepts véhiculés. Le développement d'un tel standard est un projet de longue haleine où l'ensemble des acteurs de la chaîne numérique, universitaires comme industriels, doivent être mobilisés.

Les travaux présentés dans la suite de ce manuscrit vont dans ce sens. Le prochain chapitre, chapitre 3, présente nos propositions pour l'intégration de la programmation basée entités au niveau du DCN et l'amélioration du standard STEP-NC. Nous étendrons ces propositions à un système étendu de fabrication intégré s'appuyant sur la programmation basée entités dans le chapitre 4. Le chapitre 5 se focalisera sur l'intégration à ce système d'un contexte multi-process. L'application et la validation pratique des concepts proposés donneront lieu à l'implémentation d'une plate-forme pour la programmation STEP-NC des MOCN qui sera présentée dans le chapitre 6.

Chapitre 3. Intégration de la programmation basée entités STEP-NC

L'évolution d'un modèle actuel de programmation des MOCN vers une programmation basée entités STEP-NC s'accompagne de changements nécessaires au sein de la chaîne numérique. L'état de l'art nous a permis de mettre en place les principes de base qui serviront de socle à nos propositions pour l'intégration et l'évolution du standard STEP-NC. Nous présentons dans ce chapitre notre conception de l'implémentation de la programmation basée entités sur des moyens industriels, en particulier au niveau de la CN, ainsi que les principes de la migration envisagée. À partir de là, nous serons en mesure de proposer des évolutions du standard STEP-NC pour une programmation plus intelligente des MOCN, en particulier par l'intermédiaire de nouvelles stratégies d'usinage bien adaptées à la programmation basée entités ainsi que la définition d'un modèle fonctionnel des MOCN.

3.1 Problématique et contexte de l'étude

La mise en place de la programmation basée entités n'implique pas seulement l'utilisation d'un standard nouveau de programmation mais a des conséquences directes sur l'organisation de l'ensemble des modules de la chaîne numérique. Pour en tirer tous les bénéfices, des modifications profondes doivent être opérées avec pour objectif l'intégration complète de la chaîne CAO/FAO/CN. La vision actuelle de la commande numérique exécutant une suite d'opérations de bas niveau ne convient plus du tout pour la mise en place des avancées liées à la programmation basée entités et constitue en cela un verrou technologique et idéologique. La première problématique à laquelle nous avons été confrontés concerne ainsi la place et la structure de la CN STEP-NC au sein de la chaîne numérique et mène à l'introduction de la notion de CN étendue. Dans un second temps, nous nous intéresserons à

l'évolution de ce standard émergent en vue de la programmation avancée des MOCN. Nous serons ainsi en mesure de proposer de nouvelles fonctionnalités au standard STEP-NC avec l'implémentation de stratégies d'usinage innovantes et la participation à l'élaboration d'un modèle fonctionnel des MOCN. Cette étude a été menée dans un contexte d'intégration des travaux déjà réalisés au sein de l'équipe MO2P (IRCCyN) à la programmation basée entités ainsi que de notre participation au comité normatif ISO TC184/SC1/WG7 pour la standardisation de STEP-NC ISO14649.

3.2 Place de la CN dans la chaîne numérique STEP-NC

[Laguionie'09a]

Au sein de la chaîne numérique STEP-NC, le contrôleur CN est amené à jouer un nouveau rôle en traitant les informations de haut niveau de STEP-NC pour le pilotage des effecteurs et moyens de fabrication. La place du contrôleur lui donne un accès privilégié aux informations embarquées et temps réel du processus de fabrication, permettant ainsi une adaptation des paramètres de fabrication dans des temps très réduits [Laguionie'08c]. L'interprétation, le traitement et l'exécution des données STEP-NC nécessite une reconception ainsi qu'une redistribution des modules entre la FAO et la CN.

3.2.1 Introduction du concept de CN étendue

La fabrication d'une pièce nécessite la commande des différents éléments de la machine-outil, ce qui implique de traduire les informations de haut niveau orientées objet en informations de plus bas niveau pour l'exécution des tâches. Nous proposons pour ceci d'introduire le concept de CN étendue qui peut être définie comme l'entité regroupant l'ensemble des outils permettant l'exécution optimale de la fabrication à partir des données STEP-NC. Celle-ci intègre ainsi une grande partie de l'intelligence qui est reportée de la FAO traditionnelle vers la CN, en particulier la génération des trajectoires, l'intégration du modèle fonctionnel de la machine, la simulation et l'optimisation de l'usinage (Figure 29).

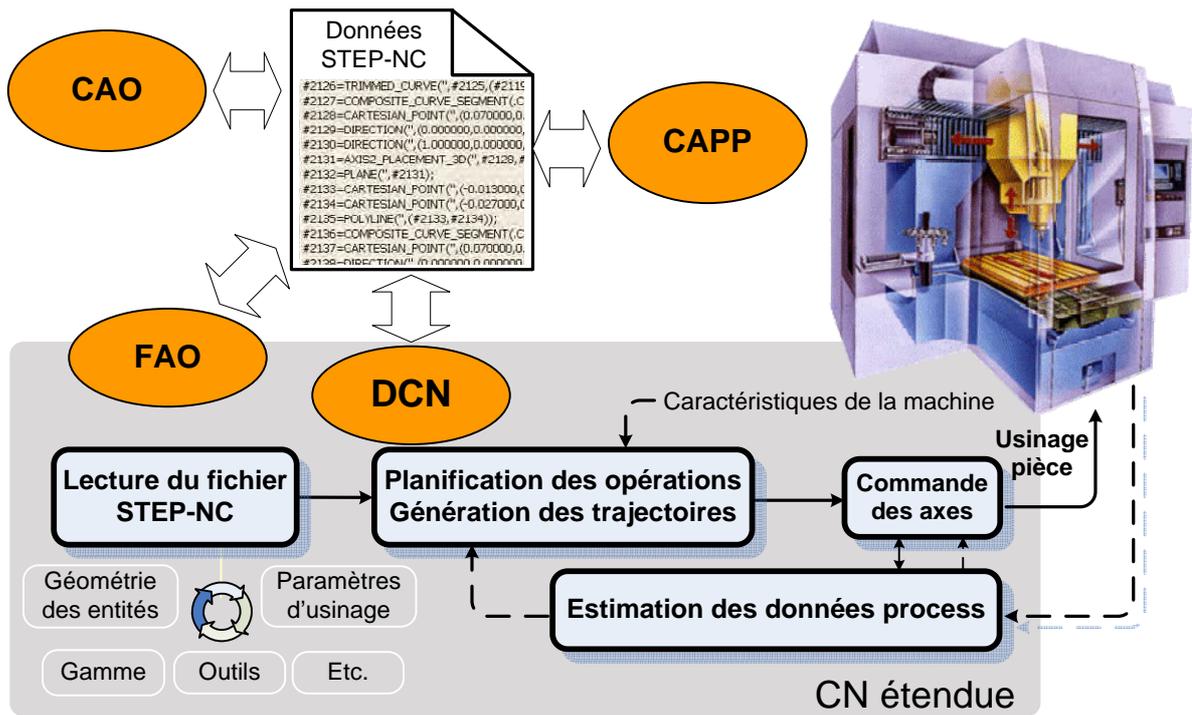


Figure 29 : Place de la CN étendue dans la chaîne numérique STEP-NC

Les différentes couches matérielles et logicielles ne sont pas nécessairement situées physiquement au pied de la machine mais s'intègrent au sein d'un système de fabrication complet qui sera proposé et détaillé au chapitre 4 de ce manuscrit. Ce système de fabrication présente une architecture permettant de s'adapter aux besoins et à la structure des différentes entreprises. Il en va de même pour la CN étendue. Concrètement, une PME fabriquant des pièces unitaires ou petites séries pourra privilégier l'autonomie de l'opérateur avec l'ensemble des outils pied-machine alors qu'un grand constructeur automobile nécessitera une programmation hors ligne robuste avant la mise en production définitive et seulement quelques corrections pied-machine mineures à effectuer par la suite.

La redistribution proposée des outils de simulation, d'interprétation et mise en œuvre des opérations de fabrication permet d'intégrer la CN étendue comme un unique système au sein de la chaîne numérique. Elle implique une réelle mutation des frontières avec l'élimination de la frontière FAO/CN par regroupement au sein de la CN étendue. Un échange bidirectionnel des données est alors possible entre les modules CAO/CAPP/CN étendue. D'un point de vue industriel, cette proposition compense le manque d'interopérabilité actuel des différents modules éditeurs associés

l'usinage les modules de génération intelligents pour l'adaptation en ligne des trajectoires et paramètres de fabrication.

3.2.2 Vers la programmation avancée des MOCN

L'implémentation de la programmation avancée STEP-NC des MOCN est difficilement réalisable en une seule étape car elle implique des changements profonds dans la manière d'aborder la programmation des MOCN. Cette migration doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- *Contraintes liées au coût* : l'investissement matériel et humain (formation, etc.) pour l'évolution des équipements des MOCN peut engendrer des coûts élevés pour l'entreprise. Il est de même difficile ou impossible de mettre à niveau l'ensemble d'un parc machines en une seule fois.
- *Contraintes technologiques* : les contrôleurs STEP-NC actuels ne présentent pas une maturité suffisante pour l'implémentation dans un contexte industriel. Très peu d'entre eux permettent d'atteindre des niveaux de robustesse et de performance suffisants, en particulier dans le cas de l'usinage cinq axes.
- *Contraintes idéologiques* : l'évolution de notre façon d'aborder les problèmes prend parfois plus de temps que celle de la technologie. Les entreprises industrielles ne sont aujourd'hui pas encore prêtes à abandonner une manière traditionnelle de programmer qu'elles maîtrisent. Elles ont acquis un savoir-faire pour pallier les manques du code G qui leur permet d'usiner des pièces conformes dans une grande majorité des cas. L'exemple du standard STEP, aujourd'hui largement utilisé pour l'échange des données CAO, illustre bien l'échelle temporelle de l'évolution des standards dans le milieu industriel : il a fallu plus d'une dizaine d'années pour sa démocratisation alors que les évolutions nécessaires au sein de la chaîne numérique demeurent mineures.

Il est donc nécessaire de proposer un certain nombre d'étapes pour l'évolution de la programmation actuelle structurée code G vers la programmation avancée STEP-NC. Dans un premier temps, le standard STEP-NC doit être intégré graduellement dans la chaîne numérique pour permettre la familiarisation des utilisateurs avec les concepts et possibilités offertes. Il est aussi important d'envisager une transition sans arrêt prolongé des activités de production. Notre proposition dans ce sens s'appuie sur une méthode en trois étapes : la programmation STEP-NC Interprétée, la programmation STEP-NC Intégrée et la programmation STEP-NC Avancée.

3.2.2.1 Programmation STEP-NC Interprétée

Ce premier niveau s'appuie sur les contrôleurs CN code G actuels. Les données STEP-NC sont interprétées pour générer les trajectoires outils et les paramètres de fabrication. Il est nécessaire de convertir ces données en code CN (code G) pour l'exécution directe sur des CN industrielles actuelles. Cette conversion est transparente pour l'utilisateur et constitue un moyen simple à mettre en place pour communiquer avec les effecteurs de la MOCN (Figure 31).

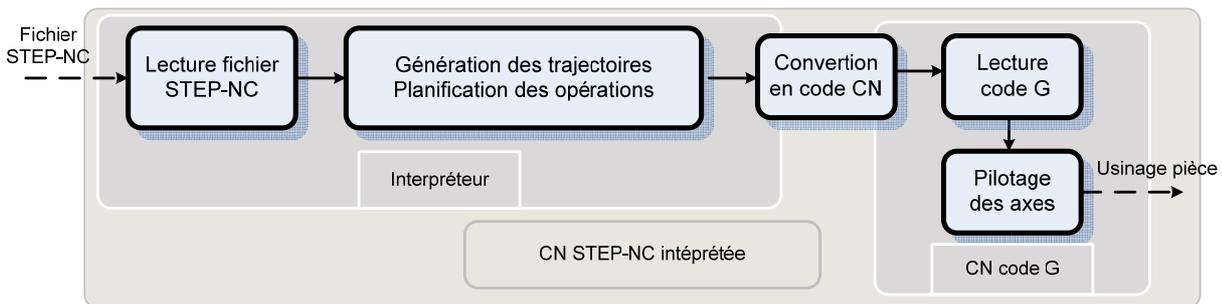


Figure 31 : Programmation STEP-NC interprétée

À ce niveau les investissements nécessaires sont limités à un logiciel de CFAO permettant la génération de données STEP-NC ainsi qu'un interpréteur CN STEP-NC. Les principaux apports de la programmation STEP-NC interprétés sont :

- utilisation du standard générique STEP-NC pour l'échange de données process entre logiciels de FAO, entre CN et au sein de la boucle FAO-CN,
- un programme pièce peut être usiné directement sur différentes machines,
- feed-back des modifications pied-machine possibles vers la CFAO,
- faible investissement et mise en œuvre rapide sur des moyens de production industriels actuels.

L'utilisation du code G restreint cependant encore les possibilités d'un tel système et limite l'exploitation intelligente et autonome des données STEP-NC associée au feed-back en ligne interne à la CN.

3.2.2.2 Programmation STEP-NC Intégrée

La programmation STEP-NC intégrée appelle à l'utilisation de CN nouvelle génération permettant l'usinage à partir des données STEP-NC sans l'utilisation du code G. Les caractéristiques machines (architecture, espace de travail, capacité cinématiques et dynamiques, etc.) et outils sont pris en compte directement au sein

du DCN. Des données externes, comme l'inspection embarquée, peuvent être pris en compte dans le processus de génération des trajectoires et des paramètres de fabrication (Figure 32).

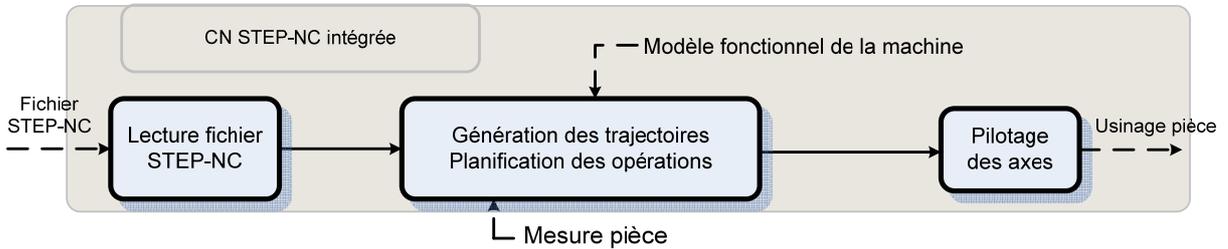


Figure 32 : Programmation STEP-NC intégrée

D'un point de vue utilisateur, il n'existe pas de différence importante avec la programmation STEP-NC interprétée. D'un point de vue développement, cette étape ouvre la voie à de nouveaux domaines de réflexion en vue de la programmation STEP-NC avancée.

3.2.2.3 Programmation STEP-NC Avancée

A partir de la programmation STEP-NC intégrée sans code G, la CN étendue est capable d'évaluer les données process en ligne. Les données collectées permettent une optimisation temps réel des trajectoires et paramètres de fabrication (Figure 33).

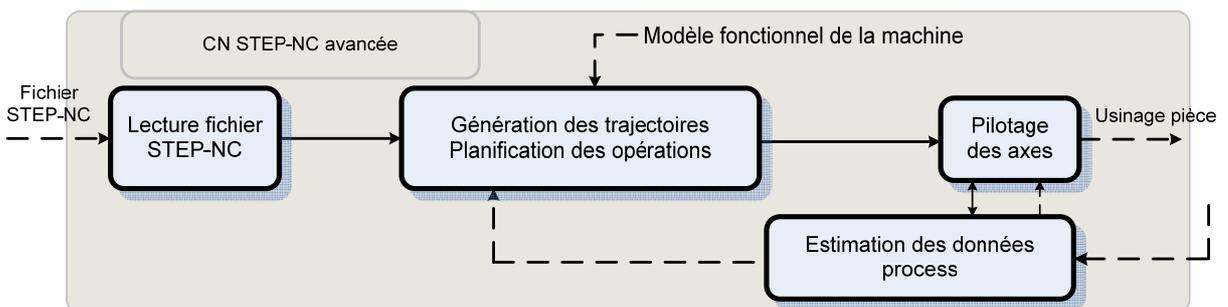


Figure 33 : Programmation STEP-NC avancée

La programmation STEP-NC avancée ouvre un large champ d'investigation quant aux libertés laissées à la machine, à l'intégration de la notion de validation par l'opérateur et à l'autonomie relative des DCN intelligents. Beaucoup de travaux restent à faire dans ces différents domaines. La programmation STEP-NC avancée telle que nous la décrivons est en accord avec les prérequis du concept de « Nouveau Contrôle Intelligent » tel que décrit par Suh et al. dans [Suh'03].

3.3 Contributions à l'évolution du standard STEP-NC

Les contributions pour l'évolution vers la programmation STEP-NC avancée peuvent être de deux natures :

- *contributions à l'évolution du standard STEP-NC en lui-même* : STEP-NC est un standard jeune (première édition de l'ISO 14649 en 2002) et nécessite certaines améliorations, tant dans son contenu syntaxique actuel que pour l'intégration de nouvelles parties (procédés de fabrication, modèles fonctionnels de la machine et des outils, etc.). Ces travaux sont principalement menés par le groupe de travail sept du comité ISO TC184/SC1. Une seconde édition de STEP-NC ISO 14649 est par exemple en cours d'élaboration et de standardisation.
- *contributions par la mise en œuvre du standard STEP-NC* : c'est une étape importante pour mettre en avant les possibilités de la programmation basée entités et permettre le retour d'expérience en vue de l'amélioration du standard. Les travaux comportent des aspects conceptuels et démonstratifs présentant la valeur ajoutée de l'approche basée entités à partir du standard STEP-NC dans son état actuel. Nos travaux réalisés dans ce cadre seront détaillés dans les chapitres suivants (chapitres 4, 5 et 6).

Dans le cadre de notre participation au groupe de travail ISO, nous avons pu présenter plusieurs contributions pour l'évolution du standard STEP-NC. Dans un premier temps, nous présentons dans ce chapitre une proposition d'intégration de stratégies d'usinage innovantes bien adaptées à une description de haut niveau basée entités. Dans un second temps, nous décrivons les apports de notre participation à l'élaboration d'un modèle fonctionnel des machines à commande numérique en cours de standardisation (ISO 14649 Part110).

3.4 Intégration de stratégies d'usinage innovantes au standard STEP-NC [Laguionie'08a]

Jusqu'à présent, peu de développements liés à STEP-NC ont porté sur la génération des trajectoires outils. Au-delà des stratégies d'usinage basiques disponibles dans la norme ISO 14649, la description orientée objet des données STEP-NC permet d'envisager l'implémentation de nouvelles méthodes de description des parcours outils. Nous proposons dans cette partie une méthode d'intégration de la description par

trajectoires à motifs de stratégies d'usinage innovantes comme le tréflage ou l'usinage trochoïdal.

3.4.1 Les stratégies d'usinage actuelles dans la norme STEP-NC

Dans le cas du fraisage, la norme ISO 14649 Part11 spécifie l'ensemble des classes, entités et attributs permettant la description du process. Parmi eux, la classe *Two5DMillingStrategy* regroupe la description des stratégies d'usinage 2½ axes. Les principales stratégies proposées sont les suivantes (Figure 34) :

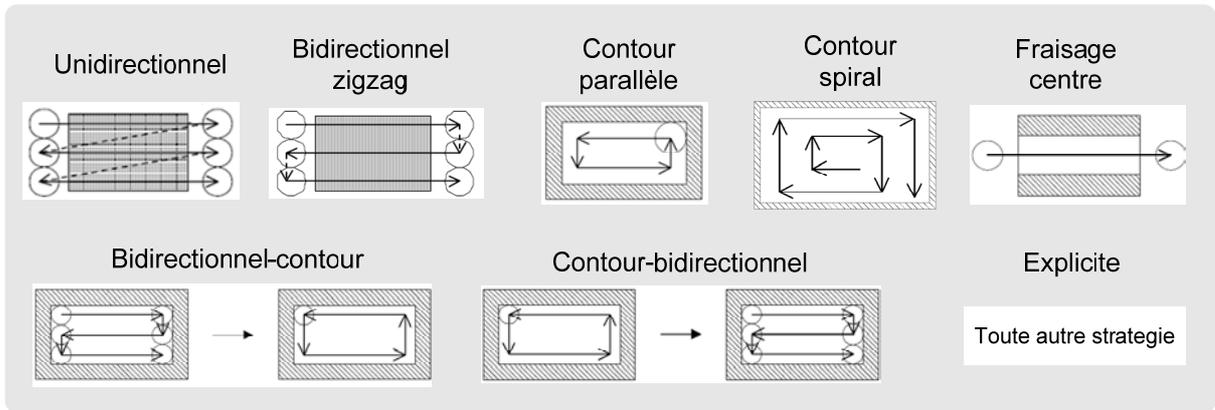


Figure 34 : Stratégies d'usinage disponibles dans STEP-NC

- Les quatre stratégies d'usinage de base : *Contour Spiral*, *Contour Parallèle*, *Unidirectionnel* et *Bidirectionnel* (zig-zag),
- Deux stratégies « composées » : *Contour-Bidirectionnel* : il s'agit de réaliser un contour de la poche avec une stratégie *Contour parallèle* puis usiner la matière restante en Zig-zag (*Bidirectionnel*). La seconde stratégie *Bidirectional-Contour* est l'inverse de la précédente : stratégie zig-zag en premier lieu puis *Contour Parallèle*,
- *Center_Milling* permet l'usinage au centre d'une entité (souvent utilisé dans le cas de rainures),
- *Explicit Strategy* regroupe toutes les stratégies qui ne peuvent pas être décrites par les stratégies précédentes. Elle nécessite alors l'entière définition de tous les parcours.

La description des attributs de ces stratégies d'usinage est fournie par le graphe EXPRESS-G de la fonction *Two5DMillingStrategy* (Figure 35) :

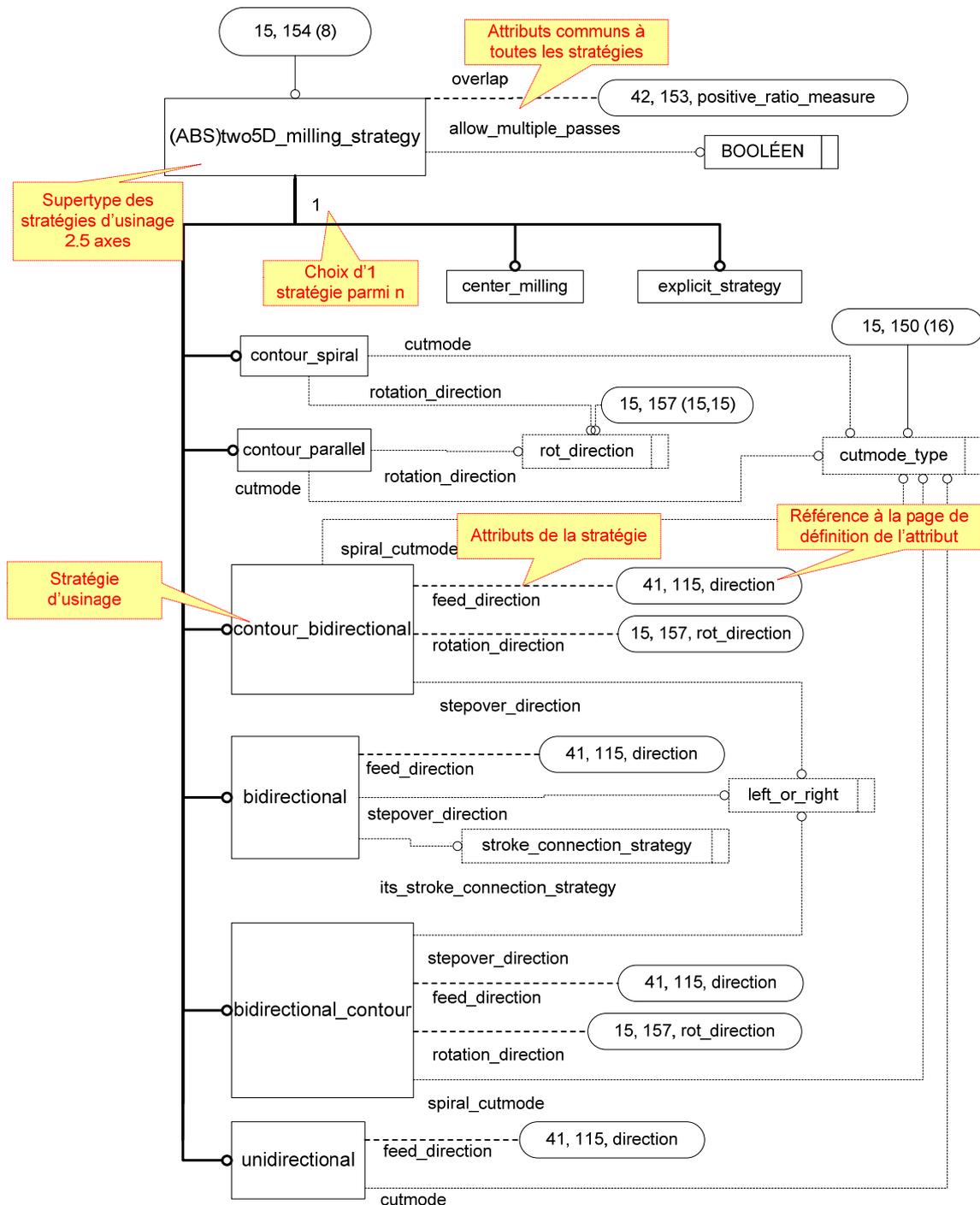


Figure 35 : Stratégies d'usinage et attributs associés dans STEP-NC

Suivant le type de stratégie, nous retrouvons les attributs suivants :

- *Cutmode* : spécifie si l'usinage se déroule en avalant ou en opposition. Par défaut, l'usinage en avalant est sélectionné,
- *Feed_direction* : c'est la direction d'avance exprimée par un vecteur dans le repère lié à la pièce. L'attribut *Cutmode* est prioritaire en cas de conflit,

- *Stepover_direction* : direction de “propagation” de la stratégie zig-zag possible sur la droite ou sur la gauche,
- *Stroke_connection_strategy* : permet de choisir la stratégie à adopter lors des phases de connexion entre les différents trajets : ligne droite, montée-décalage-descente, boucle, descente;
- *Rotation_direction* : sens de rotation en particulier dans le cas de spirales : horaire ou antihoraire. Par défaut, le sens antihoraire (trigonométrique) est sélectionné. L'attribut *Cutmode* est prioritaire en cas de conflit.

La norme STEP-NC ISO 14649 propose ainsi un nombre restreint de stratégies « communes » décrites à partir des attributs présentés. Dans le cas des trajectoires plus compliquées, la seule alternative proposée est la description explicite des positions de l'outil. Nous détaillons par la suite une méthode bien adaptée à la description STEP-NC de trajectoires plus complexes comme l'usinage trochoïdal ou le tréflage partir d'attributs simples.

3.4.2 Présentation des trajectoires à motifs : applications à l'usinage trochoïdal et au tréflage

Les opérations d'ébauche et de vidage de poche ont donné lieu à de nombreux travaux de recherche majoritairement basés sur des stratégies zigzag et contour parallèle [Guillot'in'07a]. L'amélioration des performances des MOCN (cinématique, dynamique, puissance des DCN, etc.) permet aujourd'hui de considérer de nouveaux types de trajectoires restées marginales jusqu'à présent, en particulier pour des questions de productivité. Le tréflage et l'usinage trochoïdal font partie de ces stratégies d'usinage innovantes dont le domaine d'application initial était souvent cantonné à l'usinage des matériaux durs.

3.4.2.1 Présentation de l'usinage trochoïdal

L'usinage trochoïdal consiste à la description par l'outil de coupe d'une courbe trochoïdale (combinaison d'un mouvement circulaire uniforme et d'un mouvement linéaire uniforme) de courbure continue évitant ainsi le travail pleine matière (Figure 36). Il est ainsi possible de contrôler l'engagement axial de l'outil pour une meilleure gestion des efforts de coupe. C'est en cela qu'il est bien adapté aux usinages difficiles, en particulier de matériaux durs.

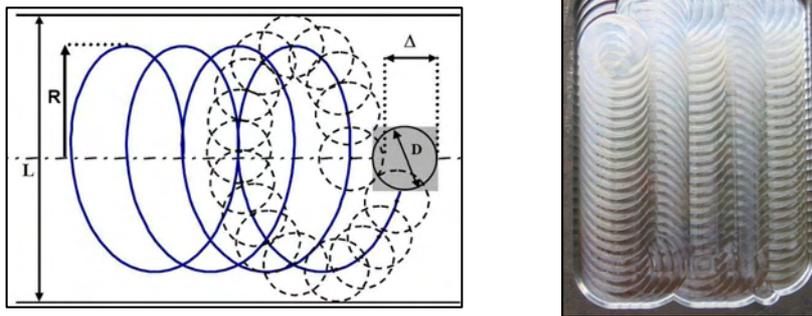


Figure 36 : Trajectoire outil trochoïdale et pièce usinée

La construction traditionnelle de trajectoires trochoïdales est souvent approximée dans les logiciels de FAO par une succession de trajectoires circulaires (G2 en code G) reliées par des segments de droite (G1). Le problème de cette méthode vient de la discontinuité en accélération qu'elle entraîne au début de chaque arc de cercle. Cela peut poser des problèmes au niveau des discontinuités lors de l'usinage (claquements). Les travaux réalisés dans l'équipe MO2P par Rauch et al. proposent la génération de trajectoires optimisées à partir d'une seule et unique trochoïde sans discontinuité géométrique pour l'usinage d'une poche complète [Rauch'09a]. Cette définition s'appuie sur la répétition d'un motif trochoïdal le long d'une courbe guide.

3.4.2.2 Présentation du tréflage

L'opération de tréflage (en référence aux empreintes en forme de trèfles laissées par l'outil sur la pièce) consiste en une succession de plongées axiales (Figure 37). Le principal avantage du tréflage est le travail de l'outil suivant son axe, c'est-à-dire suivant sa configuration la plus rigide. Cela permet de limiter la flexion d'outil ainsi que le broutement.

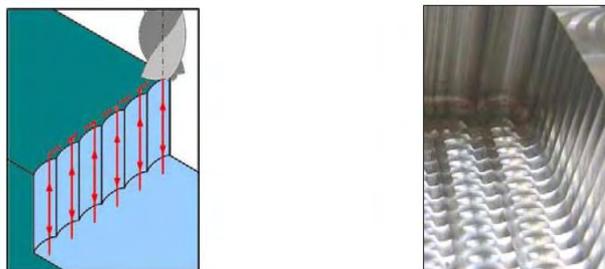


Figure 37 : Trajectoire outil de tréflage et pièce usinée

RAUCH et al. montrent que l'application du tréflage dans le cas de l'usinage d'alliages d'aluminium peut présenter des gains de productivité conséquents pour des machines à dynamique élevée et DCN puissants par rapport à des stratégies zigzag ou contour parallèle [Rauch'07]. La construction des parcours outils de tréflage peut, de façon similaire à l'usinage trochoïdal, s'appuyer sur la répétition d'un motif de plongée le long d'une courbe guide.

3.4.2.3 Description par trajectoires à motifs

Les trajectoires à motifs peuvent être définies comme des trajectoires construites par répétition d'un motif le long d'une courbe guide. Une définition mathématique vectorielle de la trajectoire (Eq. 1) est proposée (d'autres définitions, comme la composition de fonctions, peuvent être utilisées mais sont moins appropriées pour nos cas d'usage):

$$\overrightarrow{OM} = \vec{C}(t) + \vec{M}(t)$$

\overrightarrow{OM} : Point courant de la trajectoire
 $\vec{C}(t)$: Mouvement associé à la courbe guide
 $\vec{M}(t)$: Mouvement associé au motif

Eq. 1 : Définition vectorielle générale d'une courbe à motifs

L'usinage trochoïdal et le tréflage se prêtent bien à ce type de description mais d'autres applications peuvent aussi être envisagées (ponçage [Pessoles'09], perçage, etc.). Le principal avantage de la description par trajectoires à motifs est de pouvoir générer des trajectoires complexes à partir d'un nombre réduit de paramètres. La courbe guide est construite à partir de la géométrie de l'entité de fabrication alors que le motif se base uniquement sur des critères technologiques. Ainsi les modifications géométriques d'une entité n'affectent que la définition de la courbe guide, le motif étant indépendant. Cette approche permet de simplifier la construction et la modification des trajectoires.

Dans le cas de l'usinage trochoïdal et du tréflage, la définition de la courbe guide est similaire. Cette courbe, liée à la géométrie de l'entité de fabrication, peut être définie par des stratégies communes comme le zigzag, le contour parallèle, etc. Seuls les paramètres du motif diffèrent :

- Pour l'usinage trochoïdal, le motif choisi est constitué d'une seule révolution trochoïdale, définie par son rayon $R_{\text{trochoïde}}$ et son pas S_{tr} . La valeur du rayon peut

être obtenue directement à partir d'une gamme d'outils et de la largeur de la rainure trochoïdale.

- Dans le cas du tréflage, le motif choisi inclut l'ensemble des mouvements de plongée. Les paramètres régissant sa définition sont la hauteur de garde h_{garde} (hauteur du plan de sécurité par rapport à la surface supérieure de la pièce), la valeur du décalage lors de la remontée $D_{remontée}$, le rayon de fond de plongée R_{fond} , le pas radial P_{radial} ainsi que le rayon de liaison $R_{liaison}$ entre deux plongées.

La Figure 38 schématise et synthétise les attributs retenus pour la définition des motifs de tréflage et d'usinage trochoïdal :

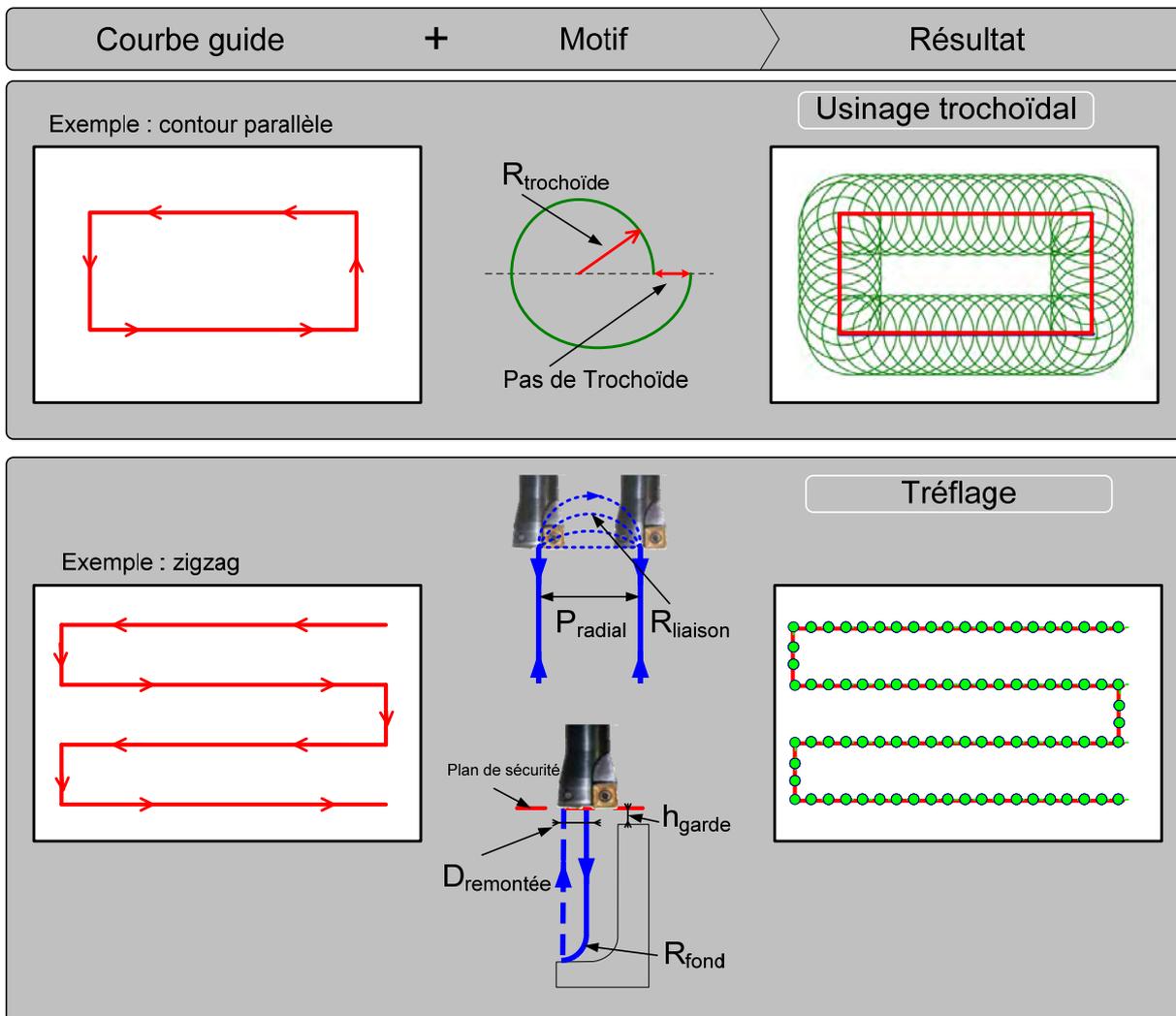


Figure 38 : Attributs de construction par stratégies à motifs de l'usinage trochoïdal et du tréflage

À partir de ces seules données, il est possible de reconstruire l'ensemble de la trajectoire. Les trajectoires à motifs proposent donc une description simple, à partir d'un nombre réduit d'attributs, de stratégies d'usinage dont les parcours finaux sont relativement complexes. Nous nous proposons dans la suite d'intégrer cette description au standard STEP-NC.

3.4.3 Proposition d'intégration au standard STEP-NC

L'intégration des stratégies à motifs est proposée au sein de la classe « *Two5DMillingStrategy* ». Nous effectuons un découplage en sous-entités pour la description de la courbe guide (guide curve) et celle du motif (pattern). Ce dernier est décrit à partir d'un certain nombre d'attributs technologiques. La courbe guide est, quant à elle, construite à partir de la géométrie de l'entité d'usinage. Nous avons choisi de nous appuyer sur les stratégies déjà existantes dans la norme STEP-NC pour définir les paramètres des courbes guide. Ces stratégies « communes » répondent dans la majorité des cas aux besoins de description des courbes guide. L'intégration générale des stratégies à motifs dans le standard STEP-NC est présentée sous la forme suivante (Figure 39) :

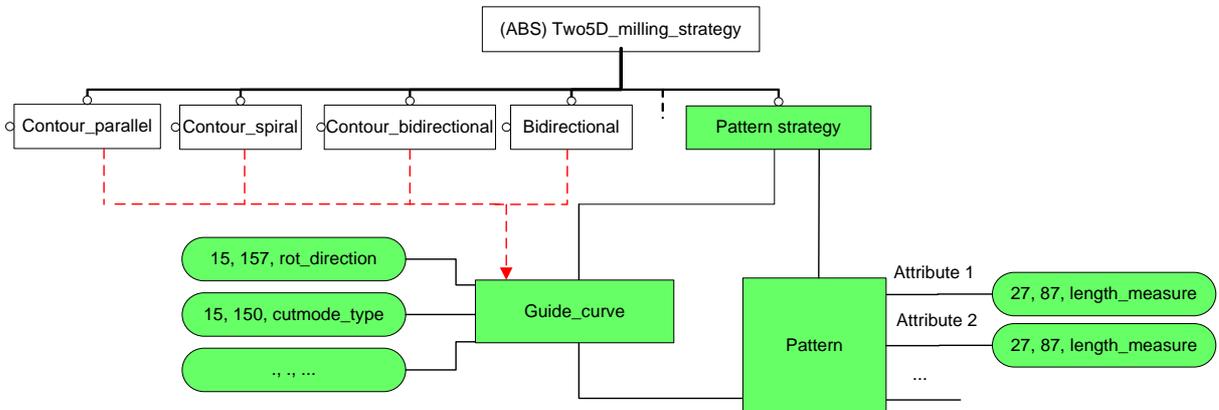


Figure 39 : Intégration des stratégies à motifs dans le standard STEP-NC

La proposition d'intégration sous forme EXPRESS-G est présentée Figure 40 dans le cas de la description par trajectoires à motifs du tréflage et de l'usinage trochoïdal :

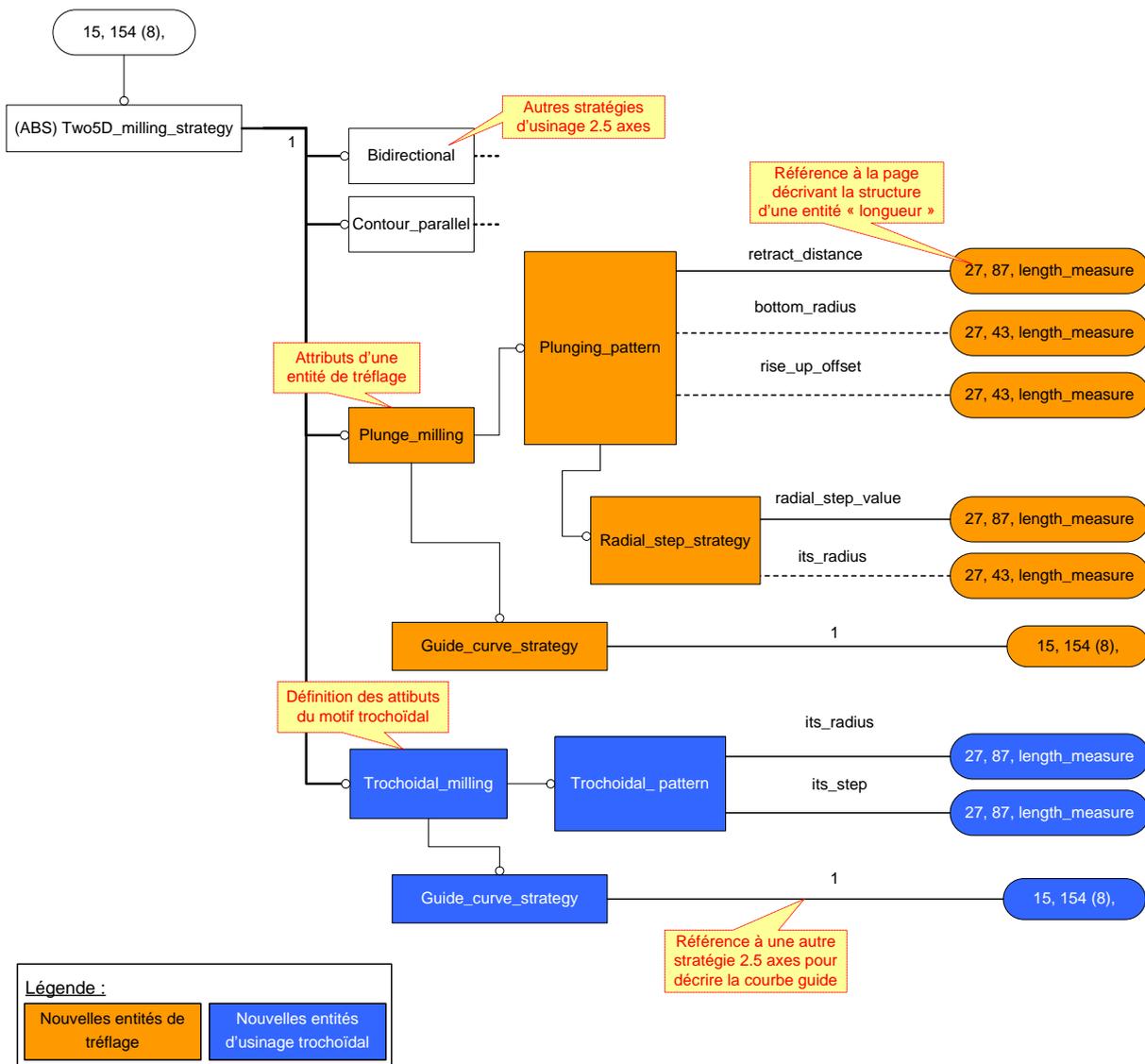


Figure 40 : Intégration EXPRESS-G des stratégies à motifs dans STEP-NC

Concrètement, cela se traduit par la syntaxe STEP-NC suivante :

#Réf=STRATEGY(overlap, allow_multi_passes, #courbe_guide, attributs motif)

- #Réf : fait référence à la ligne dans le programme STEP-NC,
- overlap et allow_multi_passes sont les attributs communs à toutes les stratégies,
- #courbe_guide : renvoie à la ligne faisant référence à la courbe guide ainsi que ses attributs.

Ce renvoi à une ligne différente pour définir la courbe guide présente l'avantage de mieux distinguer les paramètres liés au motif et ceux qui permettent de définir la courbe guide. La ligne pointée sera construite sous la forme suivante :

#Réf_courbe_guide=STRATEGY(attributs de la courbe guide)

- attributs de la stratégie : renvoie aux différents attributs de la courbe guide sélectionnée à partir des stratégies déjà présentes dans STEP-NC.

Nous disposons donc de l'ensemble des informations nécessaires à l'implantation des stratégies à motifs dans un modèle STEP-NC : les paramètres et attributs de chacune des stratégies et la syntaxe dans le programme STEP-NC. Afin de montrer la faisabilité de nos propositions d'implantation des stratégies à motifs dans STEP-NC, nous proposons une démarche de validation et de mise en œuvre de la programmation STEP-NC de trajectoires à motif.

3.4.4 Validation de la proposition et mise en œuvre [Laguionie'08b]

Nous avons mis au point une démarche applicative pour la mise en œuvre de la programmation STEP-NC intégrant les stratégies à motifs. Pour cette application, nous nous sommes restreints au cas de l'usinage trochoïdal. Dans un premier temps, nous avons implémenté notre proposition pour l'intégration des stratégies à motifs dans le logiciel coréen PosSFP [Suh'03] qui permet, à partir du modèle CAO, de reconnaître les entités de fabrication, de sélectionner les paramètres et stratégies d'usinage et de générer les données STEP-NC. Dans un second temps, le développement d'un interpréteur STEP-NC permet, à partir des données STEP-NC générées à l'étape précédente, de construire des trajectoires outils qui peuvent être directement exécutées par la MOCN. Plusieurs pièces tests ont pu être usinées avec des courbes guides et des attributs différents.

3.4.4.1 Génération de programmes STEP-NC intégrant les stratégies à motifs : implémentation dans le logiciel PosSFP

Le logiciel de programmation orientée atelier PosSFP (Shop Floor Programming) a été initialement développé par l'équipe du Prof. Suh au laboratoire de POSTECH (université de Pohang, Corée du sud) [Suh'03]. Ce logiciel permet :

- la reconnaissance automatique ou manuelle des entités d'usinage à partir d'un fichier CAO Parasolid ou STEP,
- la définition des opérations, des stratégies et des paramètres de fabrication associés aux entités de fabrication,
- la génération des données STEP-NC de la pièce.

La Figure 41 reprend les différentes étapes de la construction d'un fichier STEP-NC à partir du modèle CAO avec le logiciel PosSFP :

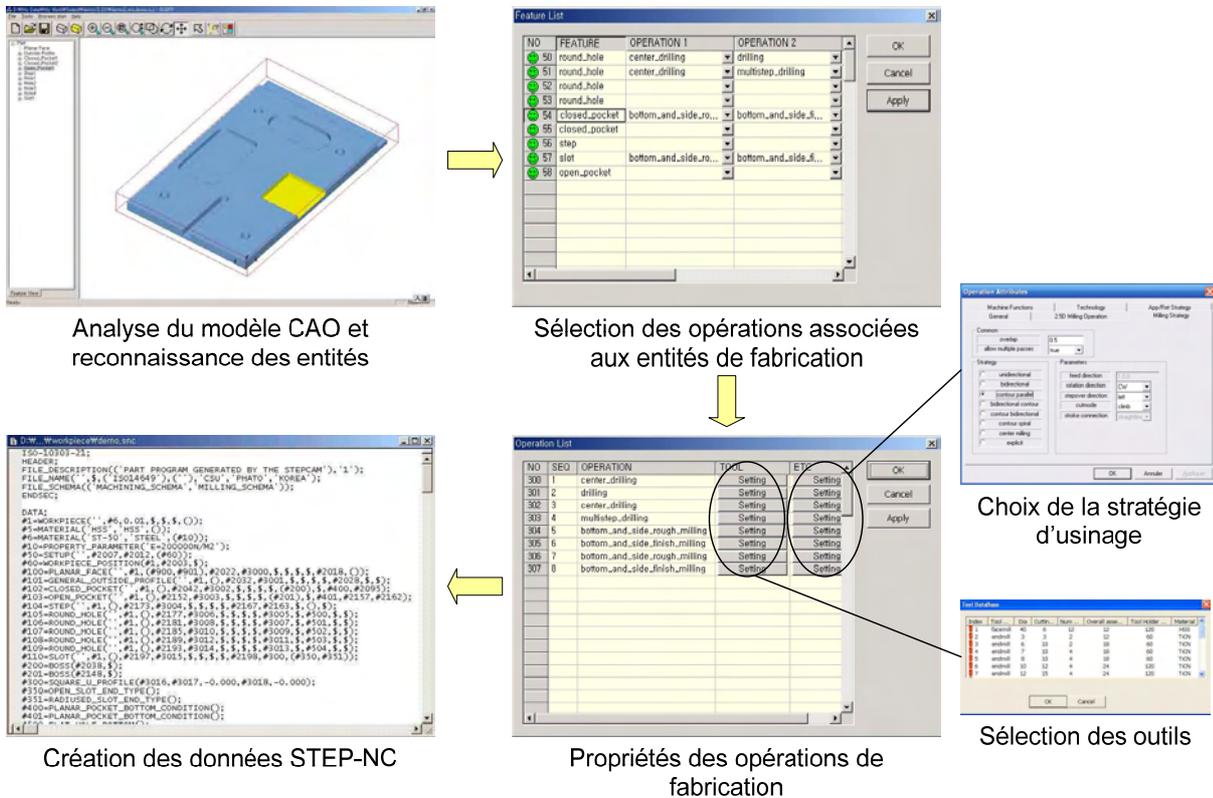
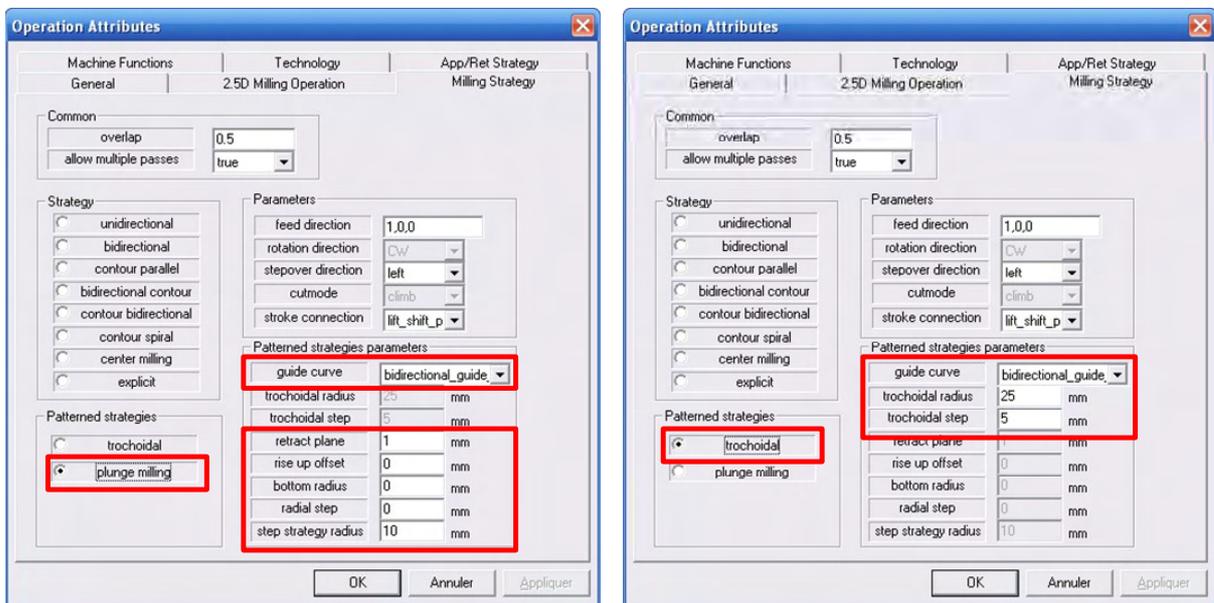


Figure 41 : Etapes de fonctionnement du logiciel STEP-NC

Ce logiciel n'a pas pour but principal d'être commercialisé mais a été créé dans une optique de développement de la chaîne numérique STEP-NC. Il s'enrichit au fur et à mesure des travaux coréens et ici, de nos travaux. Nous avons ainsi eu l'opportunité, par l'intermédiaire d'une collaboration avec l'équipe du Prof. Suh, d'implémenter la définition des trajectoires à motifs de tréflage et d'usinage trochoïdal afin de disposer rapidement d'une interface fonctionnelle proposant cette nouvelle approche pour la génération des données STEP-NC. L'architecture de PosSFP se base sur une programmation orientée objet en C++ ainsi que sur l'utilisation de MFC (Microsoft Function Class). Ces dernières sont des bibliothèques de classes en C++ et permettent un rendu graphique inspiré du motif de conception modèle-vue-contrôleur de Windows. L'utilisation du logiciel Microsoft Visual C++ est la plus appropriée dans notre cas car elle est bien adaptée pour traiter les MFC. L'espace de travail permettant le développement du logiciel est constitué de fichiers source, de fichiers « header », de fichiers Ressources ainsi que de dépendances externes. L'utilisation

des MFC entraîne que l'ensemble des classes fenêtres est une encapsulation des contrôles Windows de base. Les classes forment une hiérarchie et il existe un ensemble de classes pour l'architecture de l'application, la gestion des fenêtres, des fichiers, des menus, etc.

L'intégration des trajectoires à motifs a donc consisté à ajouter de nouveaux objets (motifs, courbe guide, attributs, etc.) aux fonctions existantes pour définir une nouvelle version du logiciel PosSFP. PosSFP V4 intègre donc le choix de stratégies à motifs dans le cas de l'usinage trochoïdal et du tréflage. La Figure 42 montre la fenêtre de choix des stratégies d'usinage ainsi que les attributs associés aux stratégies à motifs implémentées :



Sélection des attributs de la stratégie tréflage

Sélection des attributs de la stratégie usinage trochoïdal

Figure 42 : Fenêtres de choix des attributs des stratégies à motifs implémentées

Après avoir sélectionné les paramètres des stratégies, PosSFP est en mesure de générer le fichier STEP-NC. Celui-ci peut être exporté dans divers formats dont le format texte. L'exemple suivant montre le résultat de la génération d'un programme STEP-NC intégrant des stratégies à motifs (Figure 43).

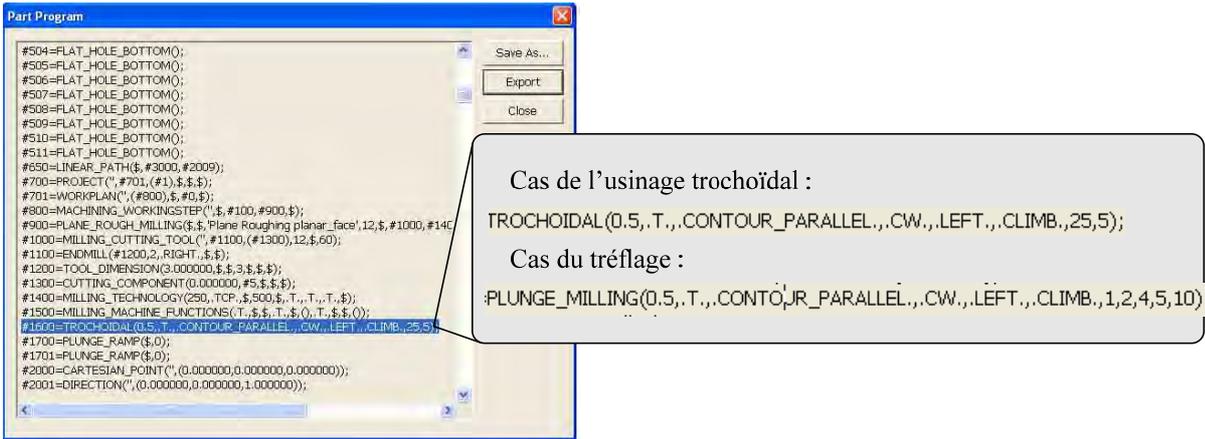


Figure 43 : Données STEP-NC intégrant les stratégies à motifs

Cet outil de génération des données STEP-NC implémenté des stratégies à motifs constitue la première étape de mise en œuvre de notre proposition. Dans un second temps, il est nécessaire d'avoir un retour sur la manière d'interpréter ces données STEP-NC contenant des stratégies à motifs au sein du DCN.

3.4.4.2 Mise au point d'un interpréteur

Nous avons développé notre propre interpréteur afin de pouvoir poursuivre l'intégration de notre approche jusqu'à la pièce usinée (Figure 44).

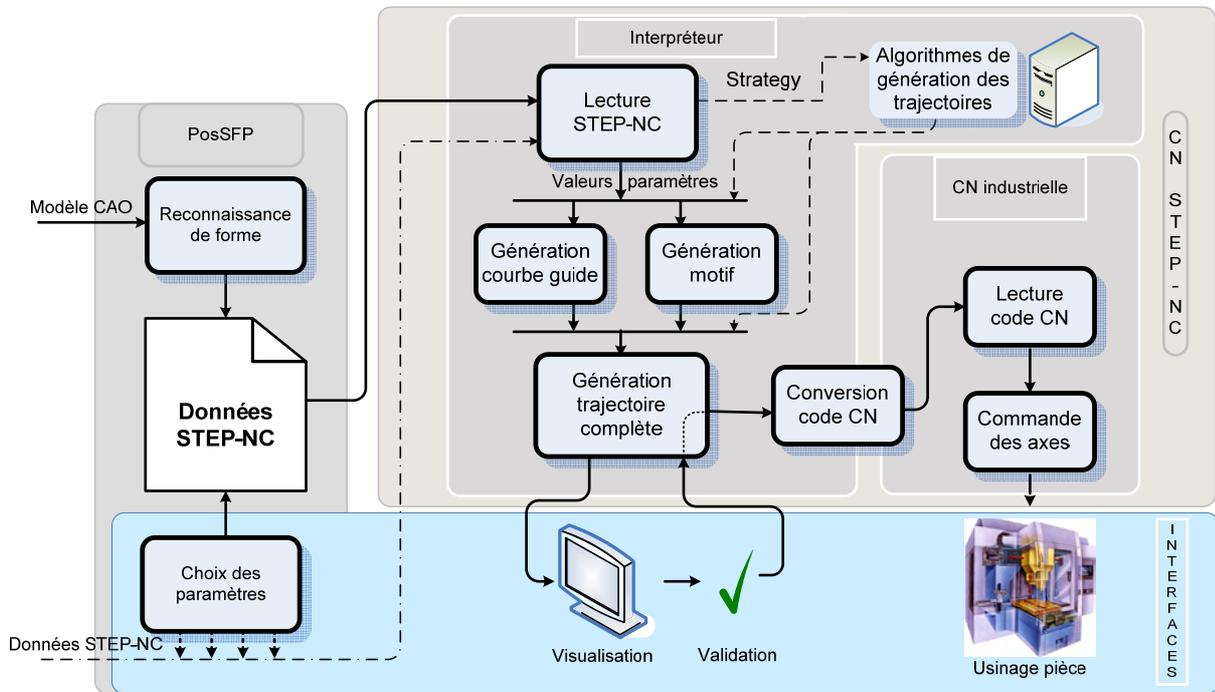


Figure 44 : Chaîne interprétée STEP-NC proposée intégrant les stratégies à motifs

Cet interpréteur, développé sous Matlab, permet la lecture du fichier STEP-NC généré par PosSFP ainsi que la génération et visualisation des trajectoires outil. Il est constitué de deux modules. A partir des données de géométrie de l'entité à usiner, des caractéristiques de l'outil et des paramètres des stratégies à motifs, le premier module est en mesure de générer la trajectoire par construction successive de la courbe guide et répétition du motif. Il renvoie en sortie un fichier de points de passage de l'outil qui peut être visualisé et validé par l'opérateur. Le second module traite le fichier de points pour permettre la lecture et l'exécution des trajectoires par le moyen de production. Concrètement, celui-ci génère, de manière transparente pour l'utilisateur, le code CN (code G) permettant l'exécution sur MOCN industrielle.

La mise au point de cet interpréteur a été réalisée dans le cas d'opérations de vidage de poche 2D½ en usinage trochoïdal. La génération des trajectoires trochoïdales est réalisée à partir des données STEP-NC pour la construction de la courbe guide et du motif en appliquant la définition paramétrique de la stratégie à motifs (Eq. 2).

$$\xrightarrow{\text{OM}} \begin{cases} x = \underbrace{[X_0 + V_x \times (t - t_0)]}_{\text{Courbe guide}} + \underbrace{[R \times \cos(\omega \times t)]}_{\text{Motif}} \\ y = \underbrace{[Y_0 + V_y \times (t - t_0)]}_{\text{Courbe guide}} + \underbrace{[R \times \sin(\omega \times t)]}_{\text{Motif}} \end{cases}$$

Eq. 2 : Equation paramétrique de la trajectoire trochoïdale

La courbe guide est une suite de segments définis localement par un vecteur directeur ($V_x; V_y$, la norme de V représente ici directement le pas de trochoïde pour $\omega = 2\pi$ et R le rayon de trochoïde) et un point de départ $M_0 (X_0; Y_0)$ correspondant à la valeur t_0 du paramètre t . L'incrément par défaut du paramètre t est lié aux capacités d'interpolation optimales du DCN. Il est donc choisi directement au sein du DCN. Les calculs pour la construction de la courbe guide sont détaillés dans [Laguionie'07]. Suite à la génération des parcours, une visualisation est possible au moyen d'une fenêtre graphique. La Figure 45 propose ainsi deux exemples de trajectoires générées à partir des informations contenues dans les données STEP-NC :

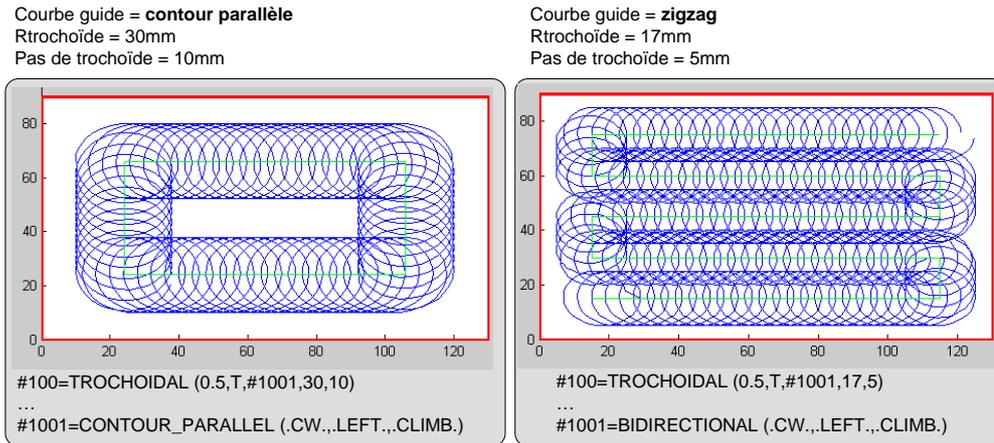


Figure 45 : Exemples de trajectoires générées par l'interpréteur STEP-NC

Suite à une validation par l'opérateur, le code CN est envoyé au DCN pour exécution de l'usinage.

3.4.4.3 Mise en œuvre pratique

Les outils développés ont finalement été soumis à une validation expérimentale menée sur la MOCN à structure parallèle FATRONIK Verne [Terrier'05b] du laboratoire. L'objectif est ainsi de vérifier la faisabilité de notre approche lors d'un cycle de fabrication complet, du modèle CAO jusqu'à la pièce usinée. La démarche employée est détaillée sur la Figure 46 :

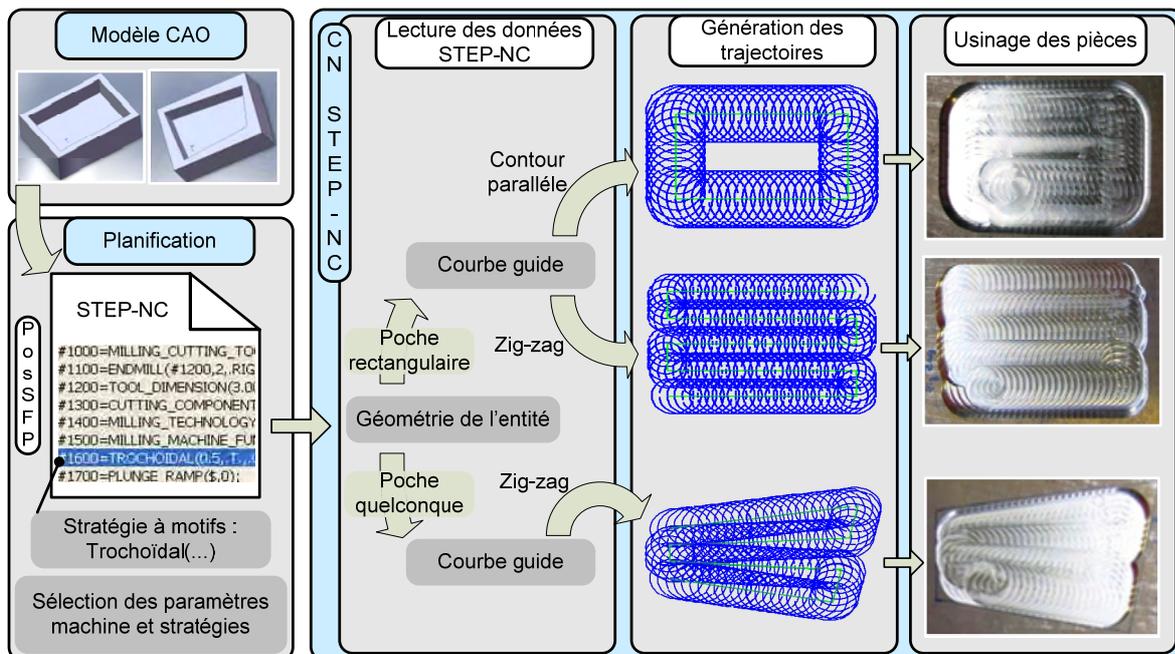


Figure 46 : Usinage trochoïdal d'entités poches avec STEP-NC

En pratique, plusieurs poches ont pu être usinées en testant plusieurs géométries, plusieurs motifs trochoïdaux et plusieurs types de courbes guides. La mise en œuvre de la démarche sur des pièces test, de la CAO à la pièce usinée, a permis de valider l'adaptabilité des outils développés en évaluant leurs réponses suite des modifications de géométrie des entités usinées ainsi que des paramètres technologiques. Elle a aussi permis un premier retour d'expérience quant à la mise en œuvre pratique de la programmation STEP-NC interprétée. Ces premiers développements ont permis de mettre en avant :

- Simplicité et rapidité des changements pied-machine : la modification par exemple d'un diamètre outil entraîne le recalcul de toute la trajectoire. Il n'est plus nécessaire pour l'opérateur de remettre en œuvre l'ensemble de la chaîne FAO/post-process/transfert machine, ce qui constitue un gain de temps non négligeable dans le cas de petites séries ou de réglage de la production.
- Feed-back de l'information possible de la CN vers la CFAO pour des modifications pied-machine (géométrie ou paramètres de fabrication).
- Nécessité de validation par l'opérateur. Le standard STEP-NC permet une meilleure interopérabilité et l'automatisation de certaines tâches de mise en œuvre des modules de simulation/optimisation/génération des trajectoires mais l'utilisateur doit rester maître de l'exécution. L'objectif n'est pas de tendre vers l'exécution d'une gamme automatique mais de fournir à l'utilisateur l'ensemble des outils interopérables et interconnectés d'aide à la décision, de simulation et d'optimisation.
- Le recours à la programmation interprétée, avec l'utilisation du code G, n'est pas gênant, dans un premier temps, pour mettre en place et démontrer certains concepts de base de la programmation STEP-NC sur des moyens industriels.
- Les démonstrations et applications sont très importantes par leur impact. Il est nécessaire de mettre au point une base solide sur laquelle implémenter les futures applications scientifiques. Pour ceci, il faut envisager le développement d'outils d'implémentation et de validation plus robustes que de simples routines Matlab pour des poches quadrilatères. Nous détaillerons, au chapitre 6, le développement d'une plate-forme STEP-NC IRCCyN intégrant ces retours d'expérience.
-

3.4.5 Conclusion

Les développements détaillés dans cette partie ont permis de proposer une méthode d'intégration des stratégies à motifs au sein du modèle STEP-NC. Simplicité de construction, rapidité des modifications, et définition à partir d'un nombre restreint de paramètres font des stratégies à motifs une nouvelle manière de programmer, apportant un réel intérêt et une compatibilité particulière avec le standard STEP-NC. Cette proposition a été appliquée avec l'implémentation de stratégies innovantes comme l'usinage trochoïdal ou le tréflage dans le logiciel PosSFP pour la génération des données STEP-NC. Un interpréteur STEP-NC a ensuite été développé pour permettre le lien entre les données STEP-NC et le contrôleur de la MOCN industrielle. Plusieurs pièces test ont permis de mettre en œuvre et de valider les principes de la chaîne numérique STEP-NC ainsi créée, de la CAO jusqu'à la pièce usinée.

Un autre aspect du développement du standard STEP-NC est la mise au point de nouvelles parties de la norme dans le but de proposer un environnement STEP-NC complet supportant l'ensemble des données nécessaires à la mise en œuvre des MOCN. Au sein de la CN étendue, les données STEP-NC génériques sont traitées pour être exécutées de manière optimale sur des moyens spécifiques. Les caractéristiques machines sont alors prises en compte lors des différentes simulations et optimisations au sein de la CN étendue. Pour ceci, il est nécessaire de disposer d'un modèle fonctionnel de la MOCN. Nous présentons, dans le paragraphe suivant, notre contribution à l'élaboration du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN en cours de standardisation.

3.5 Elaboration d'un modèle fonctionnel des MOCN : ISO 14649 Part 110 [Laguionie'09d]

L'élaboration du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN s'inscrit dans le cadre des activités du comité ISO TC184/SC1. Nous détaillons dans un premier temps les modèles fonctionnels déjà existants ainsi que des travaux sur lesquels s'appuie la construction d'un tel modèle. Nous nous intéresserons ensuite aux différentes étapes de construction et détaillerons nos propositions et contributions.

3.5.1 Nécessité d'un modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN

La majorité des travaux de recherche considère la ressource MOCN comme une partie d'un modèle plus global de ressources de fabrication [Molina'99]. Plusieurs approches sont présentées par Yang et al. [Yang'07]. Certaines ont donné lieu à des normes pour la représentation des performances de la machine-outil (ASME B5.59-1), la spécification des propriétés machine (ASME B5.59-2), les modèles de données pour le process planning (ISO 10303 Part 240), l'interchangeabilité entre les composants des machines-outils (travaux du sous-comité ISO TC39/SC2), etc. Il s'avère cependant qu'aucun modèle ne convienne réellement pour supporter la fabrication basée STEP-NC [Yang'07]. Certains modèles (ASME, ISO, NIST [Jurrens'95], etc.) sont élaborés spécifiquement pour les vendeurs et utilisateurs des MOCN mais ne conviennent pas pour des applications comme la planification du processus de fabrication. D'autres modèles (comme ISO 10303 Part 240, etc.) ne sont pas complètement compatibles avec les standards STEP-NC. Il est donc en cela nécessaire de proposer un modèle qui puisse supporter la fabrication basée entités STEP-NC.

Au-delà des standards présentés, beaucoup de systèmes logiciels propriétaires utilisent leurs propres modèles pour leurs applications de process planning, de simulation des opérations de fabrication, d'estimation des coûts de fabrication, de programmation des MOCN, etc. Des logiciels comme Delmia VNC [Delmia'10], VERICUT [Vericut'10], ESPRIT [Esprit'10] permettent de représenter des ressources MOCN et d'opérer la simulation et l'optimisation de leur programmation. Cependant, très peu d'entre eux permettent de modéliser la cellule de fabrication automatisée dans son ensemble. Mazak [Mazak'10] propose pour ceci certaines applications réservées cependant aux machines de la marque. Outre les problèmes d'interopérabilité et d'échangeabilité des modèles, la génération des données ressources dans différents formats éditeurs entraîne une redondance du stockage des données. Il existe donc un réel intérêt à proposer un format neutre et unifié de représentation des ressources MOCN [Nassehi'09; Vichare'09]. C'est l'objet du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN (MTFM ou Machine Tool Functional Model).

3.5.2 Construction et normalisation du MTFM

Cette nécessité d'un modèle de représentation STEP-NC de données des ressources MOCN a été introduite par Suh en 2007 [Funchal'07] où un nouveau projet de travail

(NWIP ou New Work Item Proposal) a pu être proposé : modèle de données des machines-outils pour les procédés généraux de fabrication. Cette partie du modèle de données des machines-outils a pu être enregistré comme standard STEP-NC ISO 14649 part 110. Il est actuellement normalisé à l'état de projet au stade 10-99, stade dont nous nous proposons de détailler la signification.

L'élaboration d'une norme internationale est le résultat d'un accord entre les comités membres de l'ISO. Les normes internationales sont élaborées par les comités techniques (TC) et sous-comités (SC) de l'ISO selon un processus comportant six étapes [ISO'10] :

- *Stade 1 - Stade proposition* : consiste à confirmer qu'il existe un besoin pour la norme internationale en question.
- *Stade 2 - Stade préparatoire* : préparation d'un avant-projet, élaboration d'une solution technique.
- *Stade 3 - Stade comité* : enregistrement du projet de comité (CD pour Committee Draft) au secrétariat central de l'ISO, diffusion pour observation.
- *Stade 4 - Stade enquête* : le projet de norme internationale (DIS pour Draft International Standard) est distribué pour vote et observations puis approuvé en tant que projet final de norme internationale (FDIS pour Final Draft International Standard).
- *Stade 5 - Stade approbation* : le FDIS est distribué pour vote final par Oui ou par Non.
- *Stade 6 - Stade publication* : le texte final est publié.

L'ensemble des différents stades et sous-stades de l'élaboration des normes internationales ISO sont regroupées dans le tableau suivant (Figure 47) :

	00 Enregistrement	20 Début d'action principale	60 Fin d'action principale	92 Répéter une phase antérieure	93 Répéter la phase actuelle	98 Abandon	99 Approbation
00 Stade préliminaire	00.00 Proposition de nouveau projet reçue	00.20 Proposition de nouveau projet mise à l'étude	00.60 Clôture de l'examen			00.98 Proposition de nouveau projet abandonnée	00.99 Approbation de la mise au vote de la proposition de nouveau projet
10 Stade proposition	10.00 Proposition de nouveau projet enregistrée	10.20 Mise au vote du nouveau projet	10.60 Clôture du vote	10.92 Proposition renvoyée à l'auteur pour plus de précisions		10.98 Nouveau projet rejeté	10.99 Nouveau projet approuvé
20 Stade préparation	20.00 Nouveau projet enregistré au programme de travail du TC/SC	20.20 Mise à l'étude du projet de travail (WD)	20.60 Clôture de la période des observations			20.98 Projet annulé	20.99 WD approuvé pour enregistrement comme CD
30 Stade comité	30.00 Projet de comité (CD) enregistré	30.20 Mise à l'étude/au vote du CD	30.60 Clôture du vote/ de la période des observations	30.92 CD renvoyé au Groupe de travail		30.98 Projet annulé	30.99 CD approuvé pour enregistrement comme DIS
40 Stade enquête	40.00 DIS enregistré	40.20 Mise au vote du DIS: <i>5 mois</i>	40.60 Clôture du vote	40.92 Rapport complet diffusé: DIS renvoyé au TC ou SC	40.93 Rapport complet diffusé: décision pour nouveau vote sur le DIS	40.98 Projet annulé	40.99 Rapport complet diffusé: DIS approuvé pour enregistrement comme FDIS
50 Stade approbation	50.00 FDIS enregistré pour approbation formelle	50.20 Mise au vote du FDIS: <i>2 mois.</i> Epreuve envoyée au secrétariat	50.60 Clôture du vote Epreuve retournée par le secrétariat	50.92 FDIS renvoyé au TC ou SC		50.98 Projet annulé	50.99 FDIS approuvé pour publication
60 Stade publication	60.00 Norme internationale en cours de publication		60.60 Norme internationale publiée				

Figure 47 : Système harmonisé des stades pour l'élaboration des normes

Ainsi, dans le cas du STEP-NC MTFM, le nouveau projet a été approuvé au stade proposition (stade 10-99). Il est donc actuellement dans un stade de préparation où des solutions techniques sont présentées par l'ensemble des participants au groupe de travail. Cette étape a donné lieu à la réflexion autour de cas d'utilisation (Use Cases) qui ont ensuite pu être implémentés lors de la modélisation EXPRESS-G du modèle fonctionnel. Notre contribution a pu être apportée à travers certains cas d'utilisation liés aux domaines de compétences de l'équipe MO2P dans le cadre de la simulation et l'optimisation de la programmation des MOCN ainsi que pour les spécificités liées au

MOCN à structures parallèles. Nous présentons dans la suite les principaux cas d'utilisation proposés ainsi que leur contribution au modèle fonctionnel.

3.5.3 Cas d'utilisation proposés et intégration au modèle

Le modèle des machines-outils proposé par STEP-NC regroupe en réalité deux sous-modèles : le modèle fonctionnel et le modèle de conditions requises (requirement model). Le modèle de conditions requises a pour objectif d'être inclus dans le programme STEP-NC lors des différentes étapes du process planning pour spécifier les propriétés nécessaires de la machine-outil pour la réalisation des opérations. À partir de ces données STEP-NC, le choix de la machine peut-être effectué. Le modèle fonctionnel, quant à lui, peut être assimilé à un catalogue machines avec une description fonctionnelle de la machine. Le modèle fonctionnel permet de répondre aux exigences des données STEP-NC du modèle de conditions requises pour le choix du moyen de production. Le choix a été fait, dans un premier temps, de regrouper ces deux sous-modèles et de les traiter de front au sein du même modèle de la norme ISO 14649 Part 110. Les cas d'utilisation proposés constituent une base de réflexion pour l'intégration de données de conditions requises ou fonctionnelles au modèle unifié. Deux grands axes ont pu être proposés avec les cas d'utilisation nécessitant des données de la machine-outil pour la simulation de l'usinage et ceux liés aux spécificités fonctionnelles des machines à structure parallèle (Figure 48). Ils ont ensuite pu être intégrés au modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN (MTFM) en accord avec le modèle d'activité (AAM).



Figure 48 : Etapes d'intégration des cas d'utilisation au modèle fonctionnel

3.5.3.1 Cas d'utilisation liés à la simulation de l'usinage

Cas d'utilisation 1 : Le premier cas d'utilisation proposé concerne la simulation des opérations d'usinage grande vitesse en prenant en compte le comportement de la machine et du DCN. Dans le cadre de la mise en œuvre du concept d'atelier virtuel à l'IRCCyN, un simulateur UGV a été développé [Dugas'02]. Les simulations du

comportement réel de la MOCN se basent sur une modélisation de la machine outils, du contrôleur et des outils [Dugas'03]. Ce simulateur permet d'évaluer l'avance réelle, les efforts de coupe, la déflexion outils, l'erreur de poursuite, etc. (Figure 49). A partir des résultats, il est possible d'adapter les conditions de coupe programmées (en particulier l'avance) pour minimiser les erreurs. Ces travaux ont pu être étendus à la simulation de l'usinage sur machines à structures parallèles [Terrier'05a].

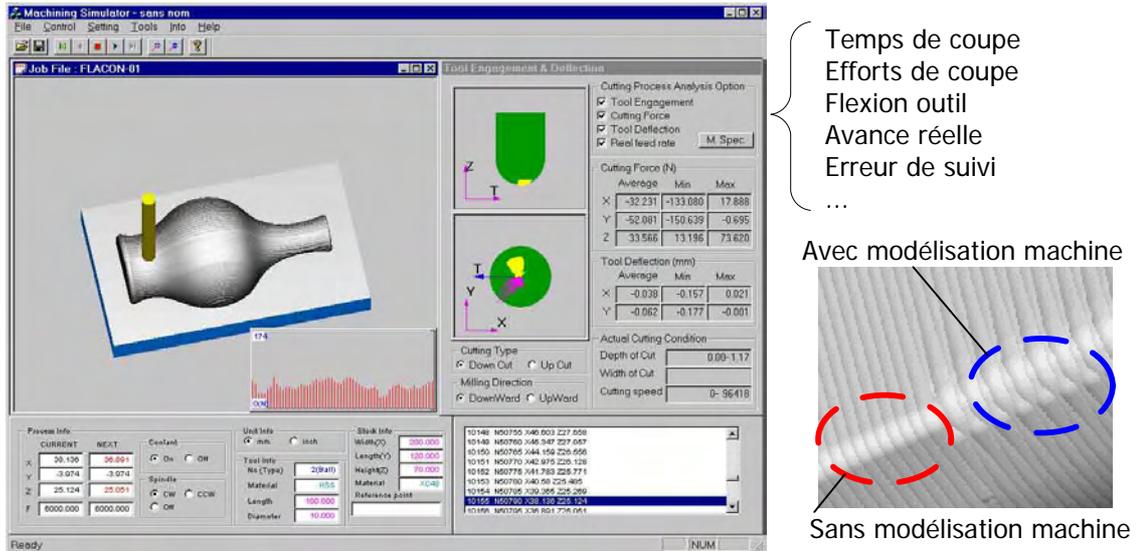


Figure 49 : Simulateur UGV développé à l'IRCCyN

Ce cas d'utilisation de simulation du comportement de la machine nécessite la spécification de certains paramètres de la machine et du contrôleur :

- le modèle cinématique de la machine, vitesses, accélérations, décélérations, jerks,
- le modèle géométrique de la machine (erreurs de transformations géométriques pour les machines à structures parallèles par exemple),
- les propriétés du contrôleur (look Ahead, capacités de calcul, etc.),
- propriétés de l'outil pour l'estimation des efforts de coupe et de la déflexion outil.

Cas d'utilisation 2 : le second cas d'utilisation reprend les besoins en termes de modèle fonctionnel de la machine de la méthode ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) [Rauch'07] déjà introduite au paragraphe §3.2.1. Cette méthode permet une optimisation de la programmation grâce à une évaluation des données process disponibles dans la CN. Cette optimisation permet une adaptation temps réel des paramètres et des trajectoires d'usinage. Dans le cas de l'approche ICAM, certaines applications ont pu être mises en œuvre à l'IRCCyN comme l'optimisation

temps réel des paramètres de coupe (avance, etc.). Dans cette application, l'estimation des efforts de coupe est réalisée à l'aide des données disponibles dans la CN (couples mesurés dans les servomoteurs, positions articulaires, etc.). Une validation expérimentale dans le cas d'une rainure divisée en cinq zones a permis de mettre en évidence les résultats de l'estimation des efforts avec les mesures relevées par une platine dynamométrique (Figure 50). A partir de cette estimation, une optimisation et modification temps réel des paramètres de coupe comme l'avance a été programmée.

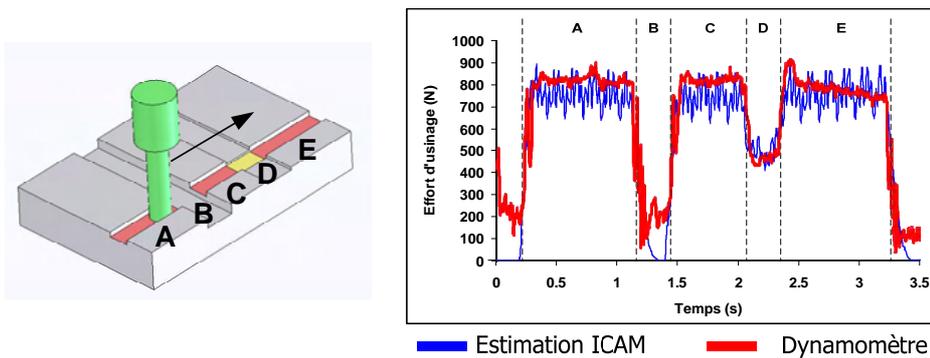


Figure 50 : Mise en œuvre de la méthode ICAM

Dans le cas de cette application, il est nécessaire d'avoir accès aux données suivantes :

- le modèle géométrique de la machine (modèle géométrique inverse et algorithmes de résolution pour les machines à structures parallèles),
- les caractéristiques des servomoteurs (puissances maximum, intensités, etc.),
- les types de données accessibles en ligne dans la CN,
- les caractéristiques de calcul de la CN, puissances, mémoire, temps d'échantillonnage,
- l'équipement de la machine en capteurs.

Cas d'utilisation 3 : le troisième cas d'utilisation concerne la génération des trajectoires d'usinage. Les travaux récents menés à l'IRCCyN sur des stratégies de vidage de poches comme le tréflage [Rauch'07] ou l'usinage trochoïdal [Rauch'09a] ont montré que les caractéristiques dynamiques de la machine (et en particulier le jerk) ont un impact important pour le choix de telles stratégies par rapport à des stratégies plus communes comme le zigzag. Par exemple, le tréflage peut être privilégié pour obtenir de réels gains de productivité dans le cas de machine-outil à fortes capacités dynamiques. Un simulateur de trajectoires dédié au tréflage a pu être développé dans

le cadre du projet UGV Alu-Composite et intègre les capacités de la machine comme la vitesse, le jerk, etc. [Rauch'08]. Pour le choix de telles stratégies il est nécessaire de connaître les caractéristiques de la machine et en particulier :

- les possibilités dynamiques, vitesses, accélérations, décélérations, jerk,
- propriétés de structure de la machine, rigidité, déformations,
- propriétés de la CN pour l'interpolation de trajectoires complexes.

Dans l'ensemble de ces 3 cas d'utilisation, nous pouvons remarquer la redondance des données nécessaires au niveau du contrôleur CN. Les caractéristiques de ce dernier entrent pleinement en compte dans des domaines liés à la simulation et à l'optimisation de l'usinage. Il est donc réellement nécessaire de l'intégrer au modèle fonctionnel de la machine. De plus, il n'existe pas, à ce jour, de modèle proposant les caractéristiques fonctionnelles génériques des contrôleurs CN industriels courants.

3.5.3.2 Spécificités fonctionnelles des machines à structure parallèle

Cas d'utilisation 4 : les machines à structures parallèles (PKM pour Parallel Kinematic Machine tool) présentent des intérêts industriels, en particulier pour leurs propriétés dynamiques [Terrier'04]. Plusieurs études ont été menées à l'IRCCyN et permettent un feed-back de l'expérience de programmation de ces machines à structures innovantes. La machine du laboratoire, Fatronik Verne équipée d'une CN Siemens 840D, présente une structure hybride (module parallèle 3 bras et association série plateau et berceau) [Terrier'05b] (Figure 51).



Figure 51 : Machine à structure parallèle Fatronik Verne

En pratique, il existe de réelles différences avec les machines à structures sérielles qui doivent être prises en compte lors de la simulation et de l'optimisation de la programmation. Pour ceci, il est nécessaire d'avoir accès au :

- modèle géométrique, modèle géométrique inverse et algorithmes de résolution,
- points singuliers,
- modèles de déformations structurelles,
- espaces de travaux et comportements associés (le comportement statique et dynamique peut dépendre de la situation de l'outil dans l'espace de travail [Chanal'09]).

3.5.3.3 Intégration au modèle

Les quatre cas d'utilisation précédents ont été proposés pour une intégration au modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN. Ceux-ci sont alors détaillés et classés au sein des différentes activités du processus de fabrication (F1, F2, F3 et F4 de la Figure 52).

Manufacturing Activities		Swiss							France				Korea	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	F1	F2	F3	F4	K1	
Scope of ISO 14649 Part 110	Capture Machining Design Feature (A1)	●	●			●								●
	Create Process Plan for Machining (A2)	●	●	●	●	●		●			●			●
	Examine Tolerances in Product Definition Data (A21)													
	Classify Machining Features (A22)													
	Design Machining Process(es) (A23)	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙		⊙						
	Generate Workingsteps (A24)													
	Generate and Verify NC Program (A3)					●			●	●	●			●
	Generate Tool Path (A31)					●			●	●	●			●
	Simulate Tool Path (A32)					●			●	●				●
	Optimize Tool Path (A33)								●	●				●
	Optimize Tool Path Parameters (A34)									●	●			
	Optimize Tool Path Patterns (A35)									●	●			
	Generate NC Program (A36)									●	●			
	Machine Mechanical Parts (A4)									●				
	Prepare Machine Tool (A41)									●				
	Operate Machine Tool (A42)									●				
	Inspect Machined Part (A43)									●				
	Model Manufacturing Technology (A5)					●			●	●				●
	Model Manufacturing Resource (A6)	●				●	●		●				●	●
	Standardize Machine Tool Data Model (A61)	●				●	●		●				●	●
	Standardize Cutting Tool Data Model (A62)	●				●			●				●	●
	Generate Simulation Model(A63)					●			●	●				●
	Design Fixture (A7)													
	Manufacture Fixture (A8)													
Etc.	Eco-evaluation, Machine tool purchase													

Figure 52 : Cas d'utilisation au sein des activités de fabrication [Suh'09]

À partir de l'ensemble des cas d'utilisation recensés et classifiés, le modèle d'application (AAM ou Application Activity Model) permet de mettre en avant les liens entre les différentes activités de fabrication et le modèle fonctionnel de données des MOCN. Le diagramme suivant de niveau A0 reprend ses différentes activités (Figure 53).

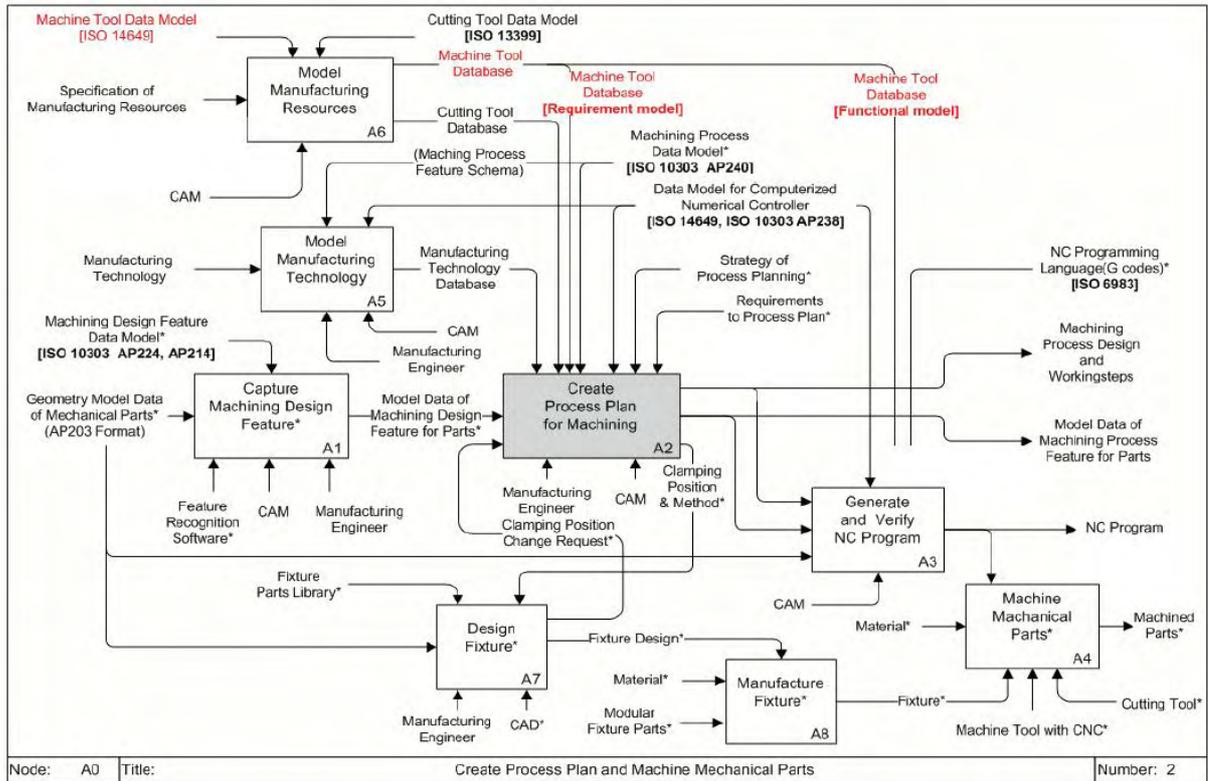


Figure 53 : Modèle d'application et d'activité du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN [Suh'09]

En parallèle de cette modélisation, les modèles proposés à travers les cas d'utilisation sont intégrés à un modèle global. La représentation du modèle est réalisée en EXPRESS-G. La Figure 54 propose un exemple d'intégration de données au MTFM suite aux cas d'utilisation proposés, en particulier dans le cas des informations CN et cinématiques nécessaires pour nos cas d'application.

Dans le cas des modèles cinématiques des MOCN, plusieurs modèles sont en cours de discussion. Il a été retenu une méthode de description s'appuyant sur l'ISO 10303-105 [ISO10303-105'96] associée à une représentation des éléments avec l'ISO 10303-41,42 [ISO10303-42'03; ISO10303-41'05].

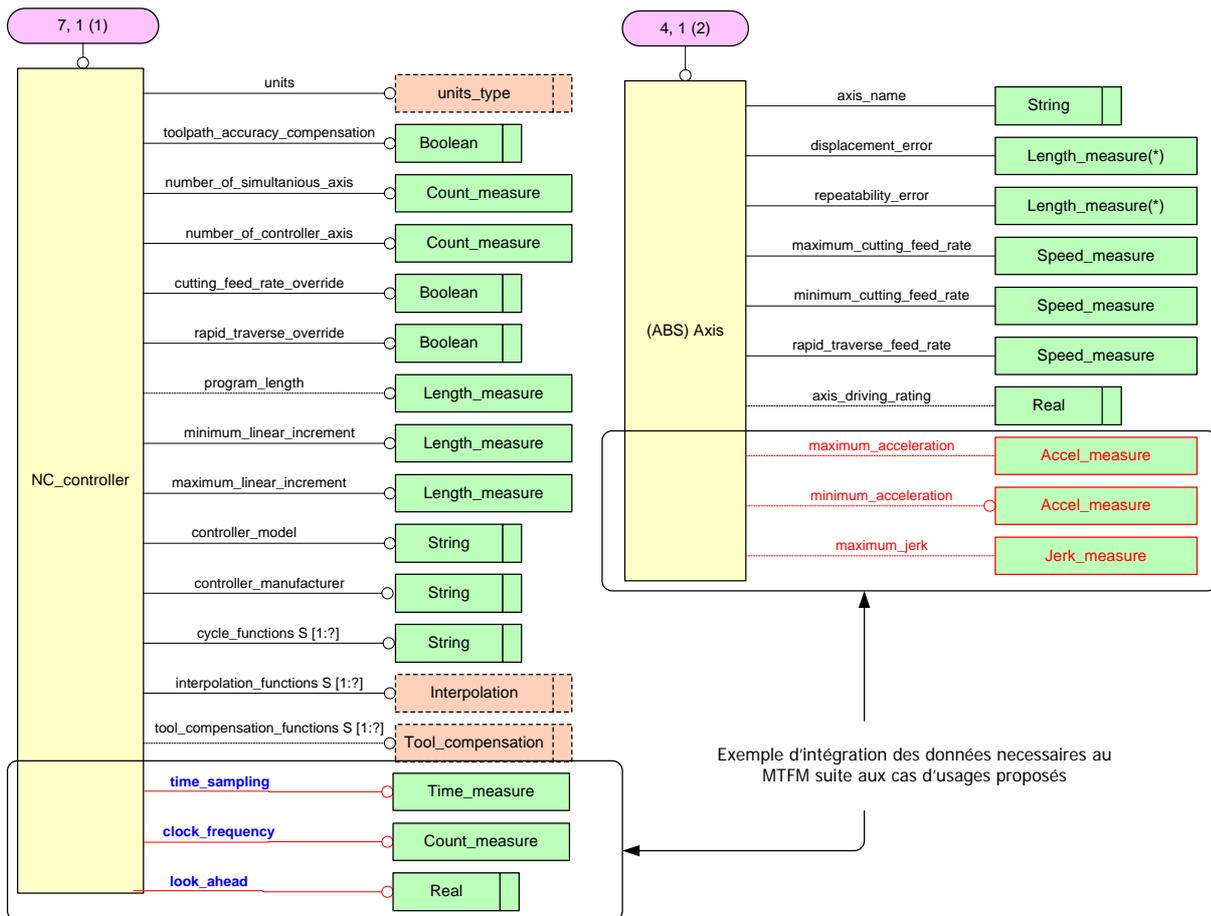


Figure 54 : Exemple d'intégration des cas d'utilisation au MTFM

3.5.4 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie des différentes étapes de la construction du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN ainsi que nos contributions avec l'intégration des cas d'utilisation propres à l'IRCCyN au modèle. Celui-ci demeure aujourd'hui dans cette phase de discussion et d'implémentation des spécificités des moyens de production modernes, ainsi que des données nécessaires à la mise en œuvre de l'ensemble des modules de la chaîne numérique STEP-NC. Suite à cette période de réflexion et de construction du modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN, un ensemble d'étapes de votes/corrections/approbations permettra la publication de l'ISO 14649-110 courant 2012.

3.6 Conclusions et discussions

Ce chapitre a permis d'introduire notre point de vue de la chaîne numérique STEP-NC avec la présentation du concept de CN étendue ainsi que l'évolution proposée vers la programmation avancée des MOCN. Cette évolution s'appuie sur la programmation basée entités dont le standard le plus mature à ce jour est STEP-NC. Il demeure cependant un standard émergent en cours de normalisation par le comité ISO TC184/SC1. Notre participation au groupe de travail ISO nous a permis d'engager ou de participer aux travaux pour l'enrichissement du standard STEP-NC en lui-même. Nos principales propositions sont l'intégration de nouvelles stratégies d'usinage au standard STEP-NC ainsi que la mise au point d'un modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN bien adapté à nos cas d'utilisation. La proposition d'intégration des stratégies à motifs dans le standard STEP-NC est particulièrement bien adaptée à la description orientée objet de trajectoires complexes comme l'usinage trochoïdal ou le tréflage. Cette proposition a pu être validée par le développement et la mise en œuvre une chaîne numérique STEP-NC intégrant les stratégies à motifs, du modèle CAO jusqu'à la pièce usinée. La contribution au développement du modèle fonctionnel des MOCN a pu être effectuée par l'intégration des spécificités propres aux domaines de compétences de l'IRCCyN. L'ensemble des données disponibles dans le modèle fonctionnel des MOCN permet de n'introduire les caractéristiques machines qu'au sein de la CN étendue. Le choix du moyen de production peut ainsi être repoussé en gardant une généricité des données STEP-NC jusqu'à la CN étendue. À partir de là, les données fonctionnelles disponibles permettent de mettre en œuvre les outils de simulation pour une production optimale sur un moyen spécifique. L'ensemble des étapes et l'architecture du système de fabrication ainsi remanié est un point clé pour la mise en œuvre de la chaîne numérique STEP-NC. Les outils, standards et modèles fonctionnels sont aujourd'hui disponibles pour mettre en place un système de fabrication STEP-NC complet présentant une nouvelle vision de l'échange des données de fabrication. Peu de travaux présentent cependant un point de vue global intégrant l'ensemble de la chaîne numérique STEP-NC au système de fabrication. Le chapitre suivant détaille nos propositions dans ce domaine.

Chapitre 4. Système étendu de fabrication intégrée

La programmation basée entités des MOCN offre de nouvelles possibilités de gestion des données et c'est l'ensemble de la chaîne numérique de fabrication qui se voit remanié avec l'introduction de la notion de CN étendue. Nous avons présenté dans le chapitre précédent notre conception de l'évolution de la programmation actuelle vers une programmation avancée basée entités ainsi que les principales étapes de cette migration. L'étude du standard STEP-NC et notre participation au comité ISO normatif ont permis l'émergence de plusieurs propositions en vue de l'amélioration du standard en lui-même. À partir de là, des travaux de mise en œuvre et d'exploitation des nouvelles possibilités offertes par STEP-NC ont pu être menés. Nous présentons dans ce chapitre l'intégration de la programmation basée entités dans le système de fabrication complet ainsi que l'échange des informations de fabrication au sein de ce système.

4.1 Problématique

L'échange des données au sein des systèmes de fabrication est un point clé pour l'intégration et l'interopérabilité des modules s'appuyant sur la chaîne numérique de fabrication. Dans ce contexte, les travaux de la communauté STEP et STEP-NC ont permis de fournir un ensemble de standards, d'outils et de concepts permettant d'améliorer l'échange des données. Les propositions demeurent cependant encore majoritairement basées sur une vision descendante de la chaîne CAO/FAO/CN. Il existe peu de travaux présentant une vision globale du système de fabrication bien adaptée à la programmation émergente STEP-NC et permettant ainsi d'exploiter tout les bénéfices. La problématique de ce chapitre concerne donc les évolutions du système de fabrication dans son intégralité pour bénéficier de l'ensemble des avancées proposées par la programmation basée entités et ainsi prendre en compte les exigences d'interopérabilité et de portabilité d'un système à l'autre. Pour répondre à

cette problématique, nous serons en mesure de proposer un système étendu de fabrication intégrée (XMIS pour eXtended Manufacturing Integrated System) s'appuyant sur les concepts de CAO étendue et CN étendue. Nous étudierons en particulier l'échange et la gestion des données de fabrication au sein de ce système.

4.2 Présentation du système étendu de fabrication XMIS

Après avoir situé le contexte d'entreprise dans lequel s'inscrivent ces travaux, nous présentons le système étendu de fabrication intégrée proposé ainsi que les différentes unités qui le composent.

4.2.1 Contexte d'entreprise

Dans un environnement de plus en plus compétitif avec la mondialisation des échanges, l'entreprise doit s'adapter en temps réel à la demande du client, à des normes de qualité et environnementales draconiennes en perpétuelles évolutions, tout en maintenant une pression forte pour la diminution des prix. L'externalisation des différentes activités de développement, de production et de support technique font de l'entreprise un ensemble d'organisations souvent disséminées dans différents pays. Dans ce contexte, la gestion et l'échange de données offre un champ considérable d'activités de recherche et de développement. Les processus internes et externes de l'entreprise ainsi que des caractéristiques intrinsèques du produit peuvent être représentés par 3 principaux axes d'intégration [Fortin'10]. Cette vue d'ensemble (Figure 55) peut schématiser une vision des systèmes de développement des produits, des procédés et de l'entreprise étendue au sein du PLM (Product Lifecycle Management) [Stark'04]. Celui-ci a pour finalité, à terme, de couvrir l'ensemble des cycles de vie du produit en intégrant aussi les systèmes de maintenance et d'analyse du cycle de vie (recyclage, etc.).

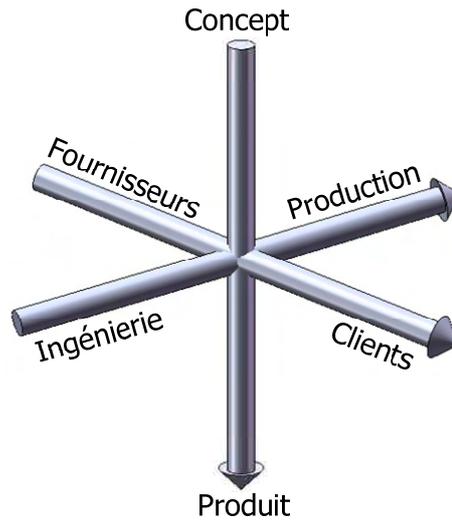


Figure 55 : Vue schématisée des principaux axes du PLM

Notre point de vue des principaux axes PLM concernant la production au sein de l'entreprise permet de situer les travaux présentés dans ce chapitre ainsi que le point de vue adopté pour la mise en place et la description du système de production proposé. Ces trois axes, ainsi que les principaux outils qui les composent, sont détaillés ci-dessous :

- Le premier axe *concept-produit* concerne les caractéristiques intrinsèques du produit avec la réalisation physique d'un artéfact. Le concept CIM (Computer Integrated Manufacturing) permet de regrouper l'ensemble des outils informatisés pour l'automatisation de la production de la pièce, de l'idée jusqu'à la pièce réalisée [Mikell'07]. Il intègre des outils propres à l'innovation (CAI ou Computer Aided Innovation) [Leon'09], à la conception et fabrication (CFAO), à la planification du processus de fabrication (CAPP ou Computer Aided Process Planning), à la réalisation des opérations de fabrication (DCN), au contrôle (CAIPP ou Computer Aided Inspection Process Planning), etc.
- Le second axe *ingénierie-production* s'intéresse à la prise de décision et à la gestion globale interne de l'entreprise. Il balaye l'ingénierie de conception [Roucoules'06], l'ingénierie de production [LeDuigou'10] et la production. La gestion des données techniques (GDT) entend couvrir le cycle de vie tant des données que des documents, de la création à l'archivage en passant par la diffusion [Bacha'02]. Cette GDT repose sur deux systèmes distincts qui couvrent les principaux champs d'application de l'entreprise manufacturière sur l'axe ingénierie-production. Le premier est le PDM (Product Data Management) qui

supporte la définition du produit et du process lors de son cycle de vie. Le second est l'ERP (Enterprise Resource Planning) / MRP (Manufacturing Resources Planning) qui supporte les processus relatifs à la gestion et à l'allocation des ressources de production [Umble'03]. Une différence majeure entre ces deux systèmes réside dans la nature même des sous-processus. Dans le cas de l'ERP, les sous-processus appartiennent au domaine de l'exploitation et sont courts et rigides, nécessitant un suivi rigoureux des procédures. Le PDM appartient au monde de l'ingénierie où les sous-processus sont fondamentalement longs. Il est alors possible de les paralléliser (ingénierie simultanée [Bourdichon'94]) et de mettre en œuvre des stratégies d'ingénierie collaborative [Kamrani'08]. En bout de chaîne, le système d'exécution de la production (MES ou Manufacturing Execution System) regroupe la gestion de l'ensemble des tâches «atelier» comme l'allocation des ressources, la mise en œuvre de la production, la gestion des données CN, l'inspection, etc. [Van Dyk'06].

- Le troisième axe *fournisseur-client* concerne la logistique globale et les processus externes à l'entreprise. Il intègre la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM ou Supply Chain Management) [Chauhan'03] ainsi que celle des relations clients (CRM ou Customer Relationship Management) [Brown'06].

Le système de fabrication que nous proposons a pour objectif de regrouper l'ensemble des outils permettant le passage du concept au produit en intégrant les contraintes liées à l'ingénierie, à la production, aux fournisseurs et aux clients. Dans le cas de notre étude, nous adopterons le point de vue de l'axe concept-produit pour décrire le système XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System) et mettre en avant les évolutions proposées par la programmation basée entités au sein des outils CIM (CFAO, CAPP, CN, etc.) (Figure 56). Cet axe d'études concerne directement la mise en œuvre de la chaîne numérique de fabrication et l'échange des données entre les différents outils et acteurs qui la composent. Nous pouvons ainsi proposer, démontrer et valider des applications concrètes de la programmation basée entités STEP-NC au sein des outils de la chaîne numérique.

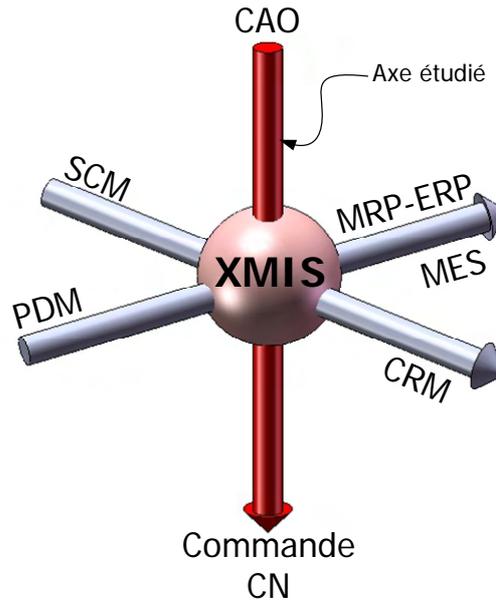


Figure 56 : Domaine d'étude du système XMIS au sein des outils PLM

4.2.2 Présentation du système étendu de fabrication intégrée (XMIS)

Le système étendu de fabrication intégrée proposé se base sur la définition de plusieurs unités orchestrées par l'unité de projet de production (PPU ou Production Project Unit). L'objectif de ce système est de gérer l'ensemble des outils de fabrication de la conception jusqu'à la production, en intégrant les étapes d'ingénierie manufacturière, de validation des processus de production, de validation de la qualité des produits manufacturés et de production. Il s'intègre au sein des différents pôles de l'entreprise constituant l'architecture de gestion complète des cycles de vie du produit (étude du besoin, planification, sourcing, ingénierie produit, vente et distribution, maintenance, recyclage, etc.). Il est donc amené à traiter, au sein du PLM, l'ensemble des données et informations relatives à la production et à la fabrication du produit (Figure 57).

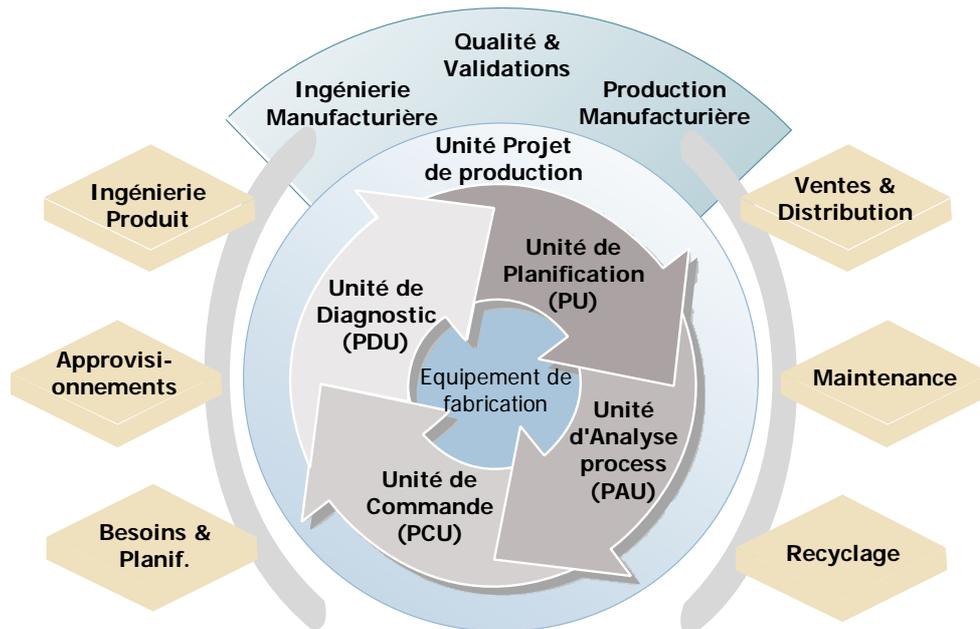


Figure 57 : Vue d'ensemble des domaines d'activité de XMIS au sein du PLM

Ce système vise à l'intégration de l'ensemble des unités au sein d'une même chaîne numérique de fabrication par une collaboration multidirectionnelle supportée par les standards d'échange de données de la programmation basée entités. Il est étendu à l'ensemble des tâches liées à la fabrication du produit et extensible aux besoins spécifiques et évolutions de l'environnement de production de l'entreprise.

4.2.3 Structure et unités intégrées au système XMIS

Nous proposons dans un premier temps une vision globale de la structure du système XMIS avec la description générale des unités qui le composent. Nous étudierons par la suite les liens et standards supports de l'échange des informations entre ces différentes unités, ce qui constitue le cœur de l'apport d'un tel système.

Le système XMIS est ainsi composé des principales unités suivantes (Figure 57) :

- *Unité projet de production (PPU pour Project Production Unit)* : elle permet de gérer l'ensemble des données de haut niveau du projet de production. Elle réalise ainsi le lien avec l'ensemble des autres services de la plate-forme PLM incluant les services de développement produit, le marketing, la maintenance, les approvisionnements, les ventes, etc. Les informations pertinentes peuvent ainsi être partagées via l'unité projet de production de l'entreprise mais aussi avec les intervenants externes (sous-traitants, collaborateurs, clients, etc.). L'unité PPU a

pour rôle la centralisation, le tri et la gestion de la visibilité des données. L'objectif est la disponibilité des bonnes informations au bon endroit pour un besoin spécifique.

- *Unité de planification (PU pour Planning Unit)* : elle permet de traiter les données de design de la pièce (géométrie, matériaux, tolérances, etc.) pour la planification du processus de fabrication. Plusieurs aspects sont considérés en lien avec l'unité PPU. Les gammes et entités de fabrication sont sélectionnées en accord avec les procédés de fabrication choisis, les ressources disponibles, le savoir-faire de l'entreprise et des sous-traitants.
- *Unité d'analyse process (PAU pour Process Analysis Unit)* : suite au choix d'un moyen de production, l'unité d'analyse process met en œuvre les outils de simulation, d'optimisation et de vérification pour la fabrication sur une machine spécifique. Ceci inclut le séquençement des opérations de fabrication, le choix des conditions et des outils, la génération et vérification des trajectoires outils. Cette unité est en lien direct avec des bases de données de fabrication de l'unité PPU et de façon bidirectionnelle (optimisation possible à partir de l'expérience et retour pour capitalisation de l'expérience).
- *Unité de commande (PCU ou Process Control Unit)* : elle permet le pilotage en ligne et la surveillance du moyen de production. Elle exécute l'optimisation, la compensation en ligne, le diagnostic et le contrôle adaptatif sur la machine. Les unités d'analyse process et de commande partagent physiquement, suivant la structure de l'entreprise, des applications embarquées sur les moyens de fabrication, communes à l'ensemble d'un atelier ou centralisées au niveau management de la production.
- *Unité de diagnostic (PDU ou Process Diagnosis Unit)* : elle permet d'exécuter les outils de contrôle et d'analyse de conformité des pièces, et la validation de la qualité de la production. Elle inclut le diagnostic a posteriori du comportement machine et l'analyse des corrections. La capitalisation de l'expérience pied machine peut ainsi être réalisée avec un « feed-back » en direction des autres unités par l'intermédiaire de l'unité projet de production PPU.

Les unités décrites constituent des regroupements d'outils et de modules qui communiquent ensemble avec les standards des technologies d'information et de communication (ICT). Ces standards représentent aujourd'hui un important verrou technologique de l'échange des données de production ainsi qu'une cause directe de

perte d'informations et de manque d'interopérabilité entre applications. Les standards de communication supportés par le système XMIS visent à combler ce manque.

4.3 Échanges des données dans XMIS

Nous présentons dans cette partie les différents standards sur lesquels s'appuie l'échange des informations au sein du système XMIS. Nous focalisons en particulier sur les données nécessaires pour la programmation des machines à commande numérique et introduisons les notions de données CN génériques et de données CN optimisées pour une machine.

4.3.1 Standards ICT, OC et CN

Au sein des technologies de l'information et de la communication (ICT), nous distinguerons les standards de communication ouverts (OC pour Open Communication) et CN dans la manière de les implémenter :

- *les standards propriétaires ICT* sont majoritairement utilisés pour la communication interne au sein des applications. Ils ont souvent des cycles de vie et d'innovation courts et s'appuient sur une évolution permanente des technologies de communication. Ces standards nécessitent un interfaçage au sein du système XMIS pour permettre la communication entre les différentes unités et modules.
- *Les standards de communication ouverts OC* sont développés pour unifier les protocoles de communication entre différents matériels et logiciels. Ils visent à résoudre les problèmes de portabilité et de perte d'information entre différents systèmes. Ils peuvent souvent être étendus pour s'adapter aux besoins réels d'un système et leur durée de vie peut être améliorée car ils ne sont plus tributaires des choix propriétaires. L'implémentation de standards OC est privilégiée dans XMIS. Un exemple de ce type de standards dans le champ d'application des machines-outils est le standard MTConnect [MTConnect'10]. Ce standard, basé sur XML, offre un moyen de communication commun à plusieurs types de capteurs, équipements et applications pour l'interopérabilité des machines outils [Vijayaraghavan'08]. Au sein de XMIS, les données temps réelles machines sont observées en ligne par l'unité de commande (PCU). Un feed-back jusqu'à l'unité d'analyse (PAU), qui peut être basé par exemple sur le standard MTConnect, permet l'extraction des données requises pour l'optimisation de la programmation. Pour finir, ce standard peut être utilisé dans l'unité de projet pour la

capitalisation de l'expérience pied machine ainsi que l'optimisation des paramètres et stratégies de mise en œuvre lors des futurs projets.

- *Les standards de communication CN* sont des standards communs permettant de communiquer les attributs de fabrication aux équipements de fabrication. Ces données doivent être suffisamment génériques pour pouvoir être traitées par un large panel de contrôleurs. Elles doivent aussi être suffisamment détaillées pour supporter l'ensemble des informations nécessaires à l'exécution autonome par la machine. Le niveau de détail est ainsi un compromis difficile à trouver entre la généricité et la spécificité des modèles de données de fabrication pour pouvoir s'adapter à des environnements variés d'entreprise. Actuellement, le standard STEP-NC propose un compromis approprié à ces différents environnements dans la mesure où il permet de couvrir un large champ de données de fabrication, de la CAO jusqu'à la CN. Le système XMIS intègre la programmation basée entités STEP-NC qui constitue le support d'échange des données de fabrication entre les différentes unités de planification (PU), d'analyse (PAU), de commande (PCU) et de diagnostic (PDU).

Nous nous intéressons dans la suite au traitement des données STEP-NC au sein du système ainsi qu'à la notion de données STEP-NC génériques et de données STEP-NC optimisées pour une machine.

4.3.2 Données CN génériques et données CN optimisées pour une machine

Le système XMIS s'appuie sur les standards STEP et STEP-NC pour l'intégration de la fabrication au sein de l'entreprise étendue. Notre vision de l'échange de données de fabrication supportées par STEP-NC mène à la proposition d'une structuration en deux principales couches des données STEP-NC. La première couche consiste en la génération de données STEP-NC génériques, c'est-à-dire indépendantes du moyen de fabrication choisi, à partir des données CAO au cours de l'étape de planification générique du processus de fabrication. À partir de ces informations génériques, une couche de données optimisées pour la production sur un moyen de fabrication choisi est générée lors de l'étape d'analyse process (Figure 58).

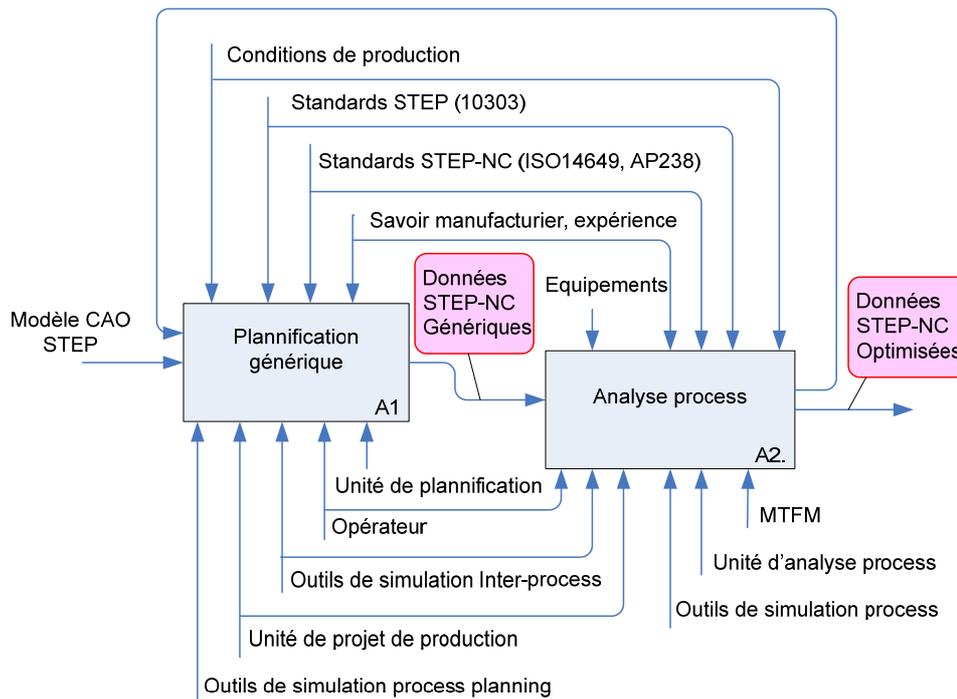


Figure 58 : Données STEP-NC génériques et optimisées pour une machine dans XMIS

Au sein du système XMIS, l'unité de planification (PU) est sollicitée pour traiter la planification générique du processus de fabrication dans un contexte multi-process. L'environnement d'entreprise et les prérequis de production mènent à considérer en premier lieu la production d'une pièce avec des procédés de fabrication privilégiés. Les entités et la gamme de fabrication sont choisies en lien étroit avec le procédé de fabrication retenu. La planification générique a ainsi pour but de converger vers une gamme d'opérations de fabrication par bouclage avec les outils de simulation multi-process planning (liés à la planification de la production dans un contexte multi-process) et inter-process (liés aux relations entre les procédés) de l'unité de planification. L'organisation et les relations entre les différents outils de simulation (process, inter-process et multi-process planning) feront l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre suivant de ce manuscrit (chapitre 5). Les résultats sont implémentés au sein des données STEP-NC génériques qui ne dépendent alors que du choix du procédé. Lors de cette étape, ces données sont totalement indépendantes d'une machine ou d'un moyen de fabrication particulier.

L'analyse process permet ensuite de mener le choix du moyen de fabrication adapté ainsi que des paramètres de mise en œuvre optimisés pour la machine sélectionnée.

L'unité d'analyse process (PAU) permet d'effectuer ces choix à l'aide des outils de simulation spécifiques process et inter-process (cf. chapitre 5). Ceux-ci sont liés avec le modèle fonctionnel (MTFM) des moyens de fabrication sélectionnés. Des données STEP-NC optimisées pour une machine sont ainsi obtenues en prenant en compte les prérequis de production de l'entreprise. L'ensemble de ces choix est effectué en lien avec les autres départements et systèmes d'information de l'entreprise (ERP, etc.) dont le flux d'informations est géré par l'unité projet de production (PPU). Un feedback de l'unité d'analyse process vers la planification générique permet d'éventuelles modifications de la gamme de fabrication. L'utilisation du standard STEP-NC est bien adaptée au bouclage entre la planification et l'analyse process dans la mesure où il supporte un large panel de données orientées objet, des données de géométrie des entités de fabrication jusqu'aux paramètres de fabrication et au modèle fonctionnel de la machine.

Le standard STEP-NC sert donc de support pour les données génériques et optimisées machine au sein du système XMIS. L'ensemble des échanges entre les différentes unités et, au sein des unités, entre les différents modules est géré par l'unité projet de production. Pour ceci, nous introduisons dans le paragraphe suivant la notion de pipeline d'échange des informations de fabrication pour une communication multidirectionnelle entre les différents acteurs du projet.

4.4 Gestion de données de production

La gestion des données de production s'appuie sur les standards d'échange d'informations présentés précédemment et nécessite une structuration permettant aux données issues des différentes simulations et optimisations d'être disponibles aux différents niveaux de la chaîne numérique. Le pipeline d'échange des informations de fabrication (MIP pour Manufacturing Information Pipeline) est proposé pour représenter le support permettant un échange multidirectionnel des informations dans un souci d'interopérabilité des différentes unités et modules de XMIS.

4.4.1 Pipeline d'échange des données de fabrication (MIP)

Une vue d'ensemble du système XMIS intégrant le pipeline d'échange des informations de fabrication (MIP) supportant la communication entre les différentes unités (PPU, PU, PAU, PCU et PDU) est schématisée Figure 59.

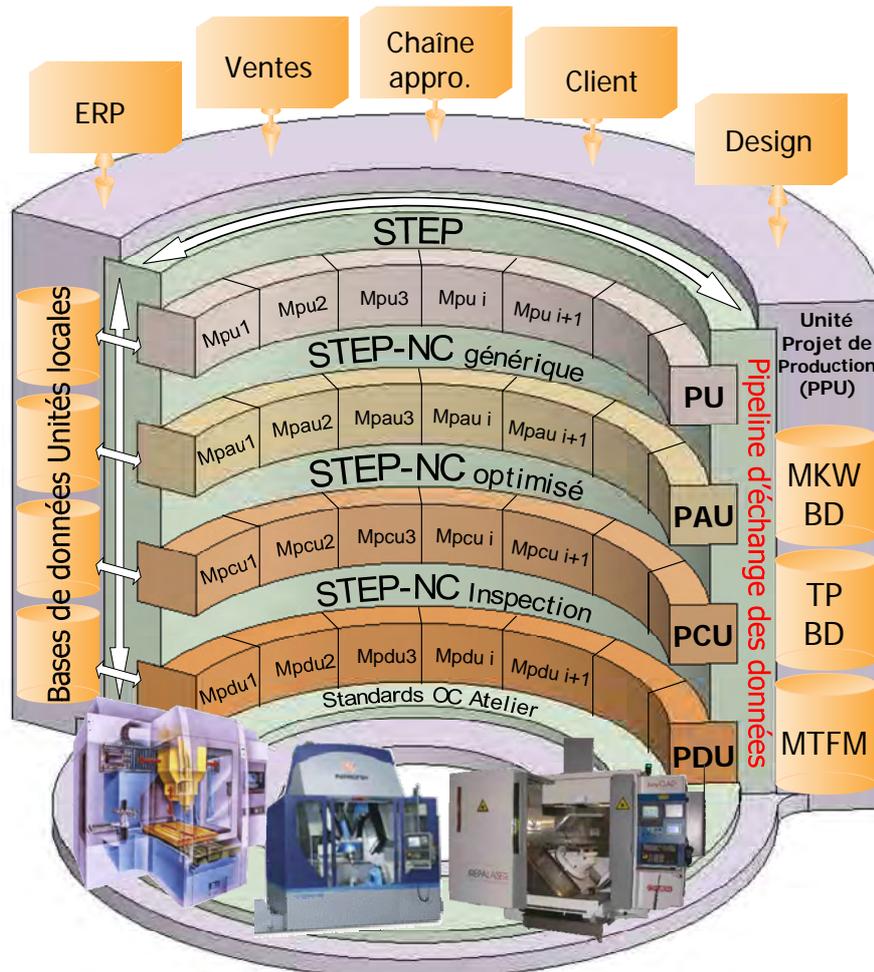


Figure 59 : Echange des données au sein de XMIS

Le MIP permet un échange multidirectionnel de données entre les unités et leurs modules constitutifs. Une conception modulaire de l'architecture des unités est proposée pour permettre l'adaptation du système aux besoins spécifiques de l'entreprise. Les modules appropriés (Mui) sont intégrés aux unités de manière « plug and play ». Un interpréteur est dédié, au sein de l'unité, à la gestion des résultats de simulations en lien avec les bases de données de l'unité projet de production.

Les bases de données locales d'unités regroupent les données de calcul internes aux unités dans le standard natif des différents modules. Ces données sont ensuite interprétées dans des standards non propriétaires pour l'échange des données inter-modules. Dans ce cadre, l'utilisation de standards comme STEP ou STEP-NC fournit un support commun et standardisé pour l'échange des données entre modules et unités. L'unité projet de production (PPU) gère aussi des bases de données partagées entre les différentes unités. Ainsi, le modèle fonctionnel des machines (MTFM), l'entrepôt de connaissance de fabrication (MKW ou Manufacturing Knowledge Warehouse) ou la base de données des trajectoires outils (TPDB ou Tool Paths Data Base) sont amenées à être utilisées par plusieurs unités. La gestion des droits d'accès et d'écriture ainsi que la visibilité des données au regard des unités sont gérées au niveau du PPU pour permettre un accès aux informations appropriées. Pour ceci, des principes de gestion collaborative des données [Debaecker'04] peuvent être mis en place. Celui-ci fait aussi le lien avec l'ensemble des acteurs PLM au sein de l'entreprise (design, vente, approvisionnements, etc.) et externes (consommateur, collaborateurs, sous-traitants, etc.).

Le parc machines et l'ensemble des équipements atelier sont totalement intégrés dans la chaîne numérique présentée et le MIP supporte l'échange des données de pilotage et de monitoring des équipements de fabrication à partir de l'unité de commande de la production (PCU). À partir des données STEP-NC optimisées machine, l'unité PCU permet de piloter directement des équipements machine par l'intermédiaire de la CN étendue. L'utilisation de CN industrielles propriétaires est aussi rendue possible par une adaptation des trajectoires outils et des paramètres de fabrication en code CN propriétaire. La qualité de la production et la conformité des pièces manufacturées est contrôlée et validée par l'unité de diagnostic (PDU). L'inspection embarquée ou sur machines à mesurer tridimensionnelles est supportée par STEP-NC ISO 14649 Part16 [ISO14649-16'04] communément appelée « STEP-NC inspection ». Le retour d'informations de la machine (capteurs, etc.) en direction des unités de commande et de diagnostic peut être supporté par des standards de communication OC comme MTConnect. La gestion des données et la capitalisation de l'expérience sont ainsi possibles de la conception jusqu'en aval de la chaîne de production et la pièce usinée. Ainsi, le MIP s'appuie sur des formats ouverts, communs et standardisés permettant l'amélioration de l'interopérabilité à chaque étape de la chaîne numérique de fabrication.

4.4.2 Usine numérique de production avec le système XMIS

Le concept d'usine numérique propose de regrouper l'ensemble des moyens numériques en vue de concevoir le processus de fabrication d'un produit [Kuhn'06]. Elle se base sur des architectures de données permettant la prise de décisions globales de la conception jusqu'à la fabrication et la maintenance, permettant ainsi de réduire les temps et coûts de conception et d'industrialisation. D'après les paradigmes émergents de production manufacturière numérique (Digital Manufacturing) [Mahesh'07], d'usine numérique (Digital Factory) [Bracht'05], ou encore de production manufacturière intégrant des technologies numériques illustrées par l'ubiquité (Ubiquitous Manufacturing) [Suh'08b], un modèle d'information universel doit être capable d'intégrer les applications au niveau ingénierie de production (PLM, ERP, etc.), au niveau atelier (systèmes d'exécution manufacturière (MES), qualité, etc.) jusqu'aux plus bas niveaux d'automatisation et de commande des moyens de production (programmation automates, monitoring, inspection, etc.). Le système XMIS est une nouvelle étape en vue de l'usine numérique de production manufacturière et offre des possibilités pour l'intégration de la production intra-entreprise et extra-entreprise dans un contexte globalisé.

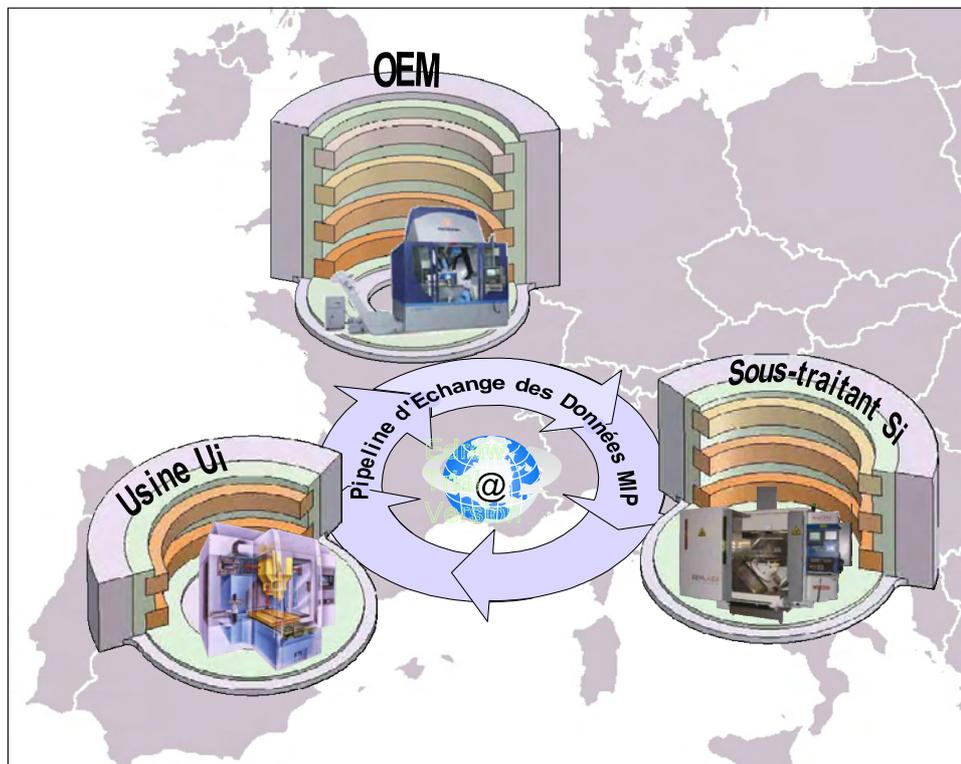


Figure 60 : Projet collaboratif de production avec XMIS

Au sein du paradigme « concevoir n'importe où, produire n'importe où, offrir un support n'importe où » (concept DA-BA-SA pour « Design Anywhere, Build Anywhere, Support Anywhere »), le système XMIS est centré sur l'intégration de la production manufacturière et vise à la mise en œuvre du concept « produire n'importe où » (Figure 60). Le pipeline d'échange des informations de fabrication (MIP) proposé s'étend au lien entre les différents départements de l'entreprise et les ateliers locaux, mais aussi avec les usines de fabrication distantes, les sous-traitants et fournisseurs. Cette collaboration à travers un réseau d'entreprises liées par le MIP offre des possibilités nouvelles pour l'amélioration des performances en termes de coût et de qualité de la production. Les supports de données standardisés non propriétaires (STEP et STEP-NC dans XMIS) offrent un support d'échange de données commun et une amélioration de l'interopérabilité. Ceci répond à un réel besoin d'échange et de coopération entre grandes entreprises et sous-traitants, non seulement au niveau ingénierie de conception mais aussi sur le plan de la production. Ainsi, il est proposé une implantation modulaire du système XMIS. Seules les unités XMIS nécessaires sont localement implémentées au niveau usine de production ou sous-traitance selon leurs propres noyaux de compétences. Par exemple, la distribution multi-sites (France, Espagne, Allemagne, etc.) des usines de production d'un grand constructeur aéronautique européen (OEM pour Original Equipment Manufacturer) peut être réalisée par implémentation locale des outils numériques des unités de commande et de diagnostic de la production. La planification de la production et l'analyse process peuvent être menées au technocentre en France et partagées à partir du MIP. Le retour des données niveaux atelier permet le management en temps réel de la production à chaque niveau. L'intégration des sous-traitants dans ce modèle, avec le respect des impératifs de confidentialité et de propriété intellectuelle assurée par l'unité de projet PPU, ouvre de nouvelles voies de collaboration pour l'amélioration de la qualité, des coûts et des délais de production. Pour conclure, la connexion temps réel des machines, équipements et personnes à partir d'Internet et des supports numériques adaptés est proposé par le système XMIS.

4.4.3 Conclusion, apports et discussion

Le système étendu de fabrication intégrée XMIS proposé rassemble plusieurs unités liées par un pipeline d'échange des informations de fabrication MIP permettant de mener à bien les tâches liées à la production au sein du management global des cycles de vie de produit. Ces unités permettent d'assister la production de la conception

jusqu'à la pièce réalisée conforme. Le principal apport du système proposé réside dans le fait que la programmation des moyens de fabrication n'est plus unidirectionnelle descendante comme dans la chaîne numérique actuelle. L'échange multidirectionnel des données entre modules et applications permet de mettre en œuvre des corrections préventives et adaptatives et d'offrir de nouvelles possibilités d'optimisation et de simulation en interaction avec les décisions humaines. Ceci est rendu possible par l'utilisation des standards de programmation basés entités STEP et STEP-NC couvrant l'ensemble des données nécessaires à la planification et mise en œuvre de la production. Il est aussi intéressant de mettre en avant les apports du système XMIS :

- *Modularité* : le système XMIS n'est pas un système rigide et permet une adaptabilité de sa structure aux besoins et évolutions de l'entreprise par l'intermédiaire des modules qui le composent.
- *Interopérabilité* : avec l'interprétation des données dans un format neutre, l'ensemble des applications peuvent communiquer entre elles en diminuant les problèmes de compatibilité [Rauch'09d]. Ainsi, les données peuvent être facilement exploitées d'une application à l'autre. Cette portabilité des données de fabrication offre un support d'échange pour la mise en œuvre de collaborations étendues.
- *Visibilité des données* : l'unité projet de production PPU du système XMIS est dédiée à la gestion des données et de leur visibilité. L'objectif est ainsi de permettre la visibilité du bon type de données par les bonnes personnes/applications au bon moment et de la bonne façon. Cette problématique constitue en elle-même un vaste champ d'investigation. Plusieurs travaux ont été menés dans ce domaine et offrent certaines pistes pour la mise en œuvre des concepts associés [Jeong'04].
- *Intégration numérique de l'ensemble des activités de fabrication* : Certaines activités, souvent cantonnées à l'atelier (commande numérique, inspection, etc.), ont l'opportunité du retour possible de l'information en direction des couches supérieures de planification et d'analyse de la fabrication. Ceci offre de nouvelles possibilités de simulation et d'optimisation en ligne de la production. Le modèle de l'usine numérique virtuelle peut alors être mis à jour en temps réel et la capitalisation de l'expérience est améliorée.
- *Longévité et intégrité des données* : l'utilisation de standards neutres permet de s'affranchir des fluctuations propriétaires de versionning et les évolutions des différents standards sont normalisées et publiques. Ainsi, l'intégrité des données permet leur maintenance et la réduction des pertes d'une version à l'autre.

- *Ouverture à l'e-manufacturing* : la structure d'échange des données dans le pipeline MIP permet le partage des données entre services via les réseaux intranet mais aussi Internet. Les protocoles et standards, en particulier le STEP et STEP-NC dans leurs versions XML, facilitent les échanges entre applications et proposent des interfaces accessibles à tous par Internet. Il s'agit donc d'un cadre favorable à la mise en place de projets de travail collaboratifs et de commande à distance des moyens de production. Des travaux dans le domaines de l'e-manufacturing ont été réalisés à l'IRCCyN [Hascoet'05]. Ils offrent un environnement intégré pour le contrôle à distance des machines repris à travers les concepts proposés par le pipeline d'échange d'information MIP.

De plus, au sein du système de production, la place de l'humain a évolué. Plutôt qu'exécuter physiquement les opérations de fabrication, les ingénieurs et opérateurs capturent maintenant des idées, développent du savoir et transfèrent des informations. Les frontières entre les différents départements de l'entreprise (initialement spécialisés dans l'utilisation des différents outils CAO, CAPP, FAO et CN) sont aujourd'hui révolues et un système de production totalement intégré est plébiscité. Les concepts véhiculés par le système XMIS répondent à ces nouvelles prérogatives et permettent une meilleure flexibilité là où les protocoles étaient très rigides et exclusivement réservés à des experts cloisonnés. La mise en œuvre concrète du concept de système étendu de fabrication intégrée XMIS nécessite de remettre à plat notre vision actuelle de la chaîne numérique CAO/CAPP/FAO/CN. Dans la mesure où le système XMIS a pour objectif d'éliminer les frontières entre les différents maillons de cette chaîne numérique et de mieux intégrer la fabrication au sein de ces composantes, nous introduisons un point de vue étendu de la chaîne numérique avec la CAO étendue et la CN étendue.

4.5 CAO étendue et CN étendue

Après avoir présenté la décomposition envisagée pour la mise en œuvre du système XMIS, nous décrivons le contenu opératif de la CAO étendue (XCAD ou eXtended Computer Aided Design) et de la CN étendue (XCNC pour eXtended Computer Numerical Controller) ainsi que les apports liés à ces deux grandes étapes en vue de la fabrication du produit.

4.5.1 Intégration du système étendu de fabrication

L'objectif de notre proposition est de remplacer la vision commune unilatérale descendante de la mise en œuvre des outils de fabrication par une extension convergente des maillons extrêmes de la chaîne numérique (Figure 61). Ainsi les possibilités de la CAO, en lien avec le modèle, et de la CN, en lien avec la pièce réelle, sont étendues pour intégrer plus de possibilités, d'intelligence et converger dans un but de conformité de la pièce réelle au modèle. Ceci se traduit par la remontée des informations de production XCNC pour une véritable convergence avec le modèle.

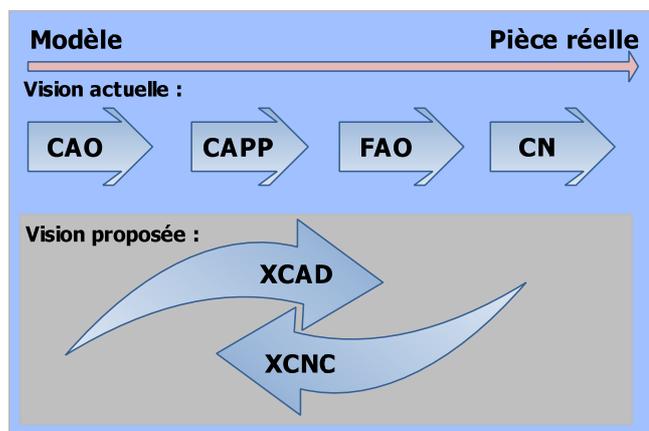


Figure 61 : Vision actuelle et vision proposée de la chaîne numérique

Au sein du système XMIS, cette approche se traduit par un découplage des tâches de planification du processus de fabrication au sein de la CAO étendue et des tâches liées à la mise en œuvre de la production au sein de la CN étendue (Figure 62).

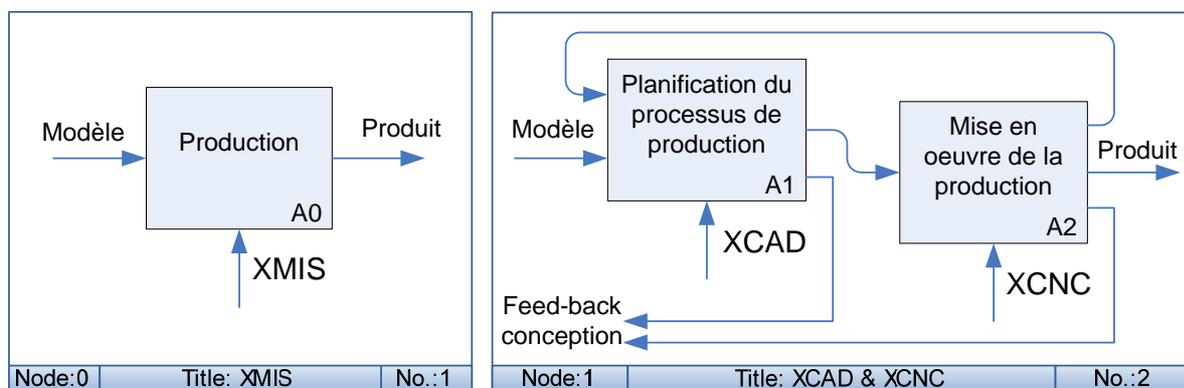


Figure 62 : XCAD et XCNC au sein du système XMIS

Les domaines respectifs de XCAD et XCNC sont complémentaires et en interaction forte avec un retour de l'information de XCNC en direction de XCAD. Ainsi, certaines décisions ou simulations intrinsèques à XCAD appellent la mise en œuvre de XCNC, et réciproquement. La distinction entre CAO étendue et CN étendue permet de délimiter conceptuellement les activités liées au modèle et à la pièce réelle. Pratiquement, ces deux entités sont intégrées au même système XMIS. Nous détaillons dans la suite des aspects concrets d'intégration de la CAO étendue et de la CN étendue.

4.5.2 CAO étendue (XCAD)

XCAD regroupe l'ensemble des outils intégrés de conception, de simulation, DFM (Design for Manufacturing) et planification générique de la production. Elle s'inscrit comme une extension des modules CAO actuels au système de production. Elle permet de supporter le lien actuellement manquant entre les activités de conception et de fabrication. Au niveau de la planification du processus de fabrication, la CAO étendue intervient pour la reconnaissance des entités de fabrication, la génération de la pré-gamme de fabrication en accord avec les spécifications de conception, et de l'ensemble des activités nécessaires à la génération des données STEP-NC génériques. La conception bénéficie des retours suite aux premières étapes de planification de la production ainsi que des modifications possibles de géométries, tolérances, spécifications, etc. Une estimation des coûts de production est alors rapidement possible en collaboration avec l'environnement de l'entreprise (ventes, chaîne d'approvisionnement, sous-traitants, etc.). Au sein de XMIS, XCAD intègre l'unité de planification (PU) et supporte en particulier les échanges de données STEP et STEP-NC. Les données de sortie de XCAD en direction de XCNC sont supportées sous forme de données STEP-NC génériques.

Toutes les opérations de mise en œuvre de la production, du choix du procédé adapté jusqu'à la validation de la qualité des pièces produites sont gérées au sein de la CN étendue, qui constitue réellement le cœur de notre étude. XCAD et XCNC sont liées bidirectionnellement à travers l'échange des données supportées par STEP-NC.

4.5.3 CN étendue (XCNC) [Laguionie'10]

Les contrôleurs CN actuels sont dédiés à l'exécution des opérations et à la mise en action des éléments de la machine sans aucune opportunité d'intégration et de partage des données en retour vers les couches supérieures du système de production. La proposition d'une CN étendue supportant des standards de programmation basés sur des entités comme STEP-NC permet de rassembler, au sein d'une même unité, l'intelligence nécessaire à la mise en œuvre d'une production conforme sans pertes de données, de dégradation de l'information et en permettant un retour de celles-ci des couches de niveau les plus bas vers les couches de niveau supérieur. Les principales données d'entrée de XCNC sont les données STEP-NC génériques issues de XCAD. Physiquement, la CN étendue n'est plus exclusivement un élément pied machine. Suivant les besoins de l'entreprise, une distribution interne et externe à la cellule de fabrication est plébiscitée. Ainsi, de la même manière qu'il est tout à fait possible de mettre en place un transfert de l'intelligence physique de la FAO en direction de l'unité de commande pied machine, il peut s'avérer parfois plus adapté d'opérer dans le sens inverse. La CN étendue est ici proposée de manière globale et se veut d'être adaptable aux besoins spécifiques de chaque entreprise. Concrètement, le système XCNC gère l'ensemble des analyses en vue de la fabrication, de la simulation, de l'optimisation, de l'exécution et du contrôle de la production en s'intégrant dans l'environnement de l'entreprise (Figure 63).

La CN étendue XCNC présentée se base sur une intégration multidirectionnelle de l'ensemble des modules et des principaux composants de la chaîne numérique de fabrication. Le contrôleur CN est ainsi enrichi d'une grande partie de l'intelligence nécessaire à la fabrication, ainsi que d'une puissance de calcul et un pouvoir de décision. La CN étendue constitue donc un élément central de la chaîne numérique de fabrication. Par son intégration dans le système de fabrication, il n'existe plus de rupture de données, entre les départements de conception, de planification de la production et l'atelier. Le pipeline multidirectionnel de transfert des données (MIP) lie étroitement les aspects production avec le reste de l'entreprise. XCNC est basé sur l'extension de l'intelligence CN avec une possibilité d'ajout de modules (par exemple pour l'utilisation à la demande de procédés spécifiques comme le fraisage, tournage, fabrication par Ajout de Matière (AM), etc.) pour une adaptation aux besoins et aux évolutions de production de l'entreprise.

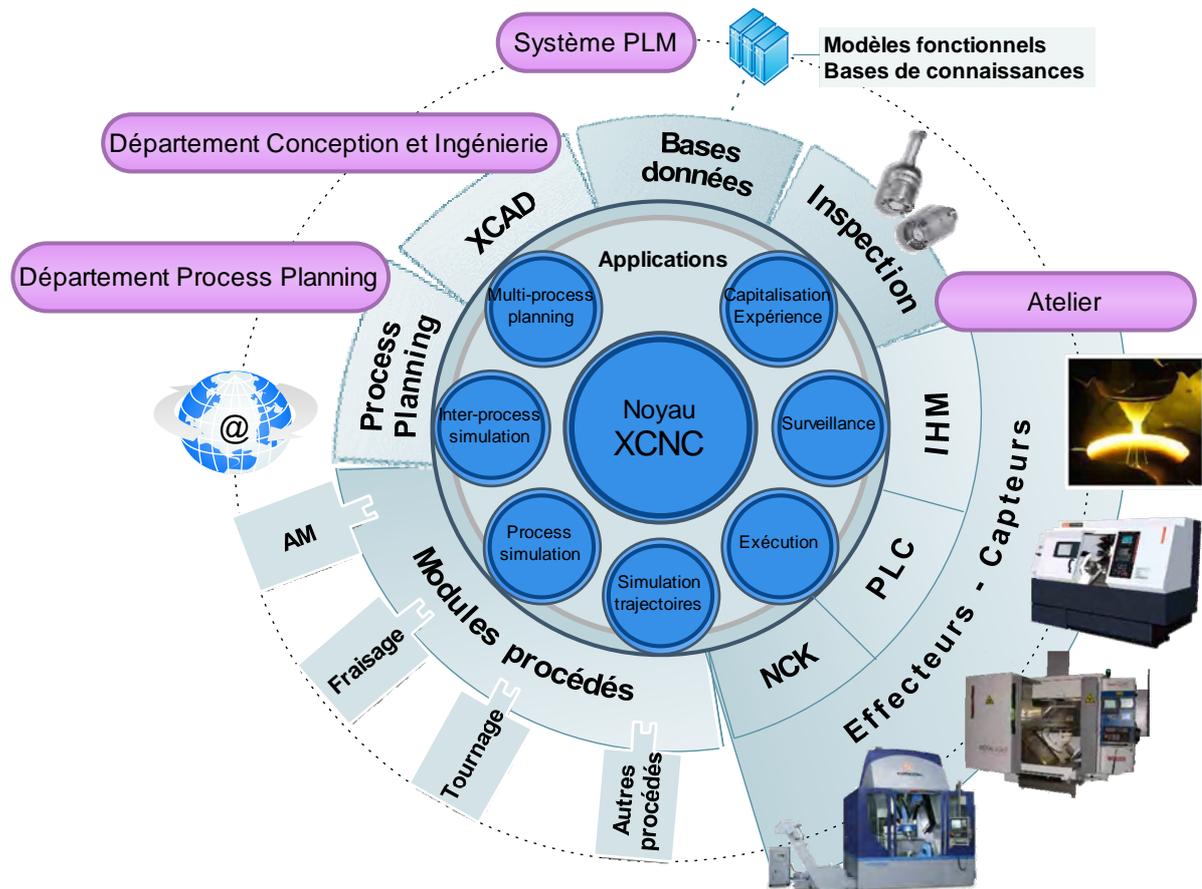


Figure 63 : Vue d'ensemble de la CN étendue XCNC

Au sein du système XMIS, le noyau de XCNC fait partie intégrante de l'unité de projet de production (PPU). Il permet de gérer une couche d'application rassemblant les modules des unités d'analyse (PAU), de commande (PCU) et de diagnostic (PDU). Ces modules peuvent être classés en plusieurs sous catégories incluant des modules de simulation procédé, process-planning et inter-process dans un environnement multi-process [Laguionie'09c]. Les modules internes pour l'exécution des opérations de fabrication sont liés par le MIP : noyau de commande numérique (NCK pour Numerical Control Kernel), automate programmable machine (PLC pour Programmable Logical Controller), interface homme-machine (IHM), mise en œuvre de l'inspection embarquée et sur machine à mesurer tridimensionnelle, etc.

La CN étendue, en tant que sous système de XMIS dédié aux opérations de mise en œuvre de la production, est un élément clef de notre étude supportant les propositions et applications présentées dans les parties suivantes.

4.6 Intégration de XCNC dans un contexte industriel et apports

Le point de vue adopté précédemment pour la présentation de la CN étendue est un point de vue général qui est adaptable pour répondre aux besoins des différentes entreprises manufacturières. Celles-ci ont toutes des besoins différents, mais nous distinguons dans la suite trois grandes catégories d'entreprises pour illustrer la mise en œuvre et les apports de la CN étendue XCNC :

- Entreprises manufacturières dans le domaine de l'automobile : avec des lignes dédiées à la production d'une pièce ou à la réalisation d'une opération de fabrication, les cadences très élevées nécessitent une optimisation poussée du temps de cycle en amont de la mise en production. Les grands constructeurs automobiles sont partenaires de tout un réseau d'entreprises sous-traitantes délocalisées des technocentres, tant pour la production de pièces que pour la réalisation des lignes dédiées de production. L'échange bidirectionnel des données de fabrication constitue donc un point clé pour la réduction des temps de mise en production.
- Entreprises manufacturières dans le domaine de l'aéronautique : avec les cadences de production plus faibles mais des pièces à très forte valeur ajoutée, les entreprises aéronautiques ont un réel besoin de maîtriser le processus de fabrication. Les simulations et optimisations amont sont complétées par une forte surveillance et adaptation en temps réel du processus de fabrication. Il existe, de même que pour les entreprises du domaine de l'automobile, un besoin d'échanges d'informations de fabrication entre sites distants et sous-traitants.
- Petites et Moyennes Entreprises (PME) mécaniciennes : avec la réalisation de pièces unitaires, petites ou moyennes séries, les entreprises PME mécaniciennes nécessitent une grande flexibilité dans la mise en œuvre des moyens de production. L'opérateur pied machine joue alors un rôle important dans la mise au point de la production et nécessite une autonomie accrue.

La réalisation de la CN étendue au sein des trois exemples types d'entreprises cités ci-dessus nécessite une mise en œuvre différente adaptée aux besoins de chacune d'elles (Figure 64).

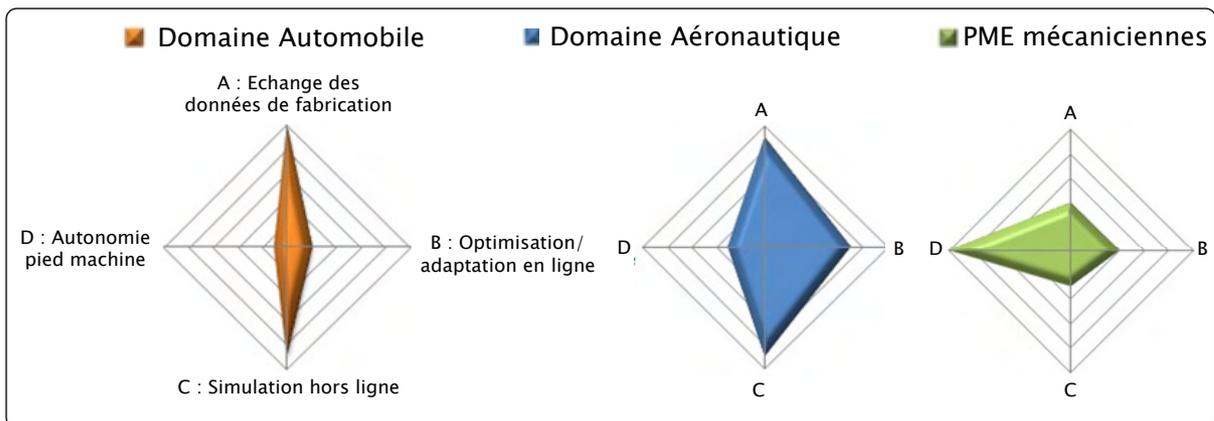


Figure 64 : Axes d'implémentation privilégiés au sein de la CN étendue

Ainsi, les principaux apports liés à l'adaptation de la CN étendue au contexte d'entreprise se traduisent de la manière suivante :

- Cas des entreprises du domaine de l'automobile : l'apport se situe principalement dans la mise en place de nouvelles possibilités d'échanges de données de fabrication entre les technocentres, les différentes usines et sous-traitants. Pour ceci, le pipeline étendu d'échange des données de fabrication permet, avec les standards neutres de programmation basée entités STEP NC, de mettre en relation directe les différentes structures de conception, de planification et d'analyse du processus de production des différentes entités. L'axe d'implémentation privilégié se situe donc dans la mise en place de modules adaptés pour la gestion de ces informations au sein de l'unité projet de production (PPU) pour la gestion de la visibilité des données. Un autre apport de la CN étendue réside dans les possibilités offertes pour le développement et l'implémentation de modules de simulation hors ligne au sein de l'unité d'analyse. La portabilité des données offerte par le standard STEP-NC permet une collaboration entre les différents modules d'analyse est ainsi entre les différents acteurs du projet.
- Cas des entreprises du domaine de l'aéronautique : de la même façon que les entreprises du domaine de l'automobile, deux principaux apports se situent dans l'échange des données par le pipeline MIP et dans les possibilités offertes en termes de simulation hors ligne. Un autre apport peut être mis en avant avec les possibilités de suivi et d'adaptation en temps réel du processus de fabrication. Dans ce cas, le développement des unités de commande et de diagnostic constitue

l'axe d'implémentation privilégié à travers les modules de simulation et optimisation temps réel processus de fabrication.

- Cas des entreprises PME mécaniciennes : l'apport de la CN étendue se situe principalement dans l'autonomie laissée à l'opérateur si celle-ci est directement implémentée pied machine. Dans ce cas, l'ensemble des unités de planification, d'analyse, de commande et de diagnostic sont directement accessibles au niveau atelier. Ainsi l'opérateur, à partir des données génériques issues de XCAD, est en mesure de mettre en œuvre le processus complet de production tout en permettant un retour des données et de l'expérience.

Une plate-forme d'application de la programmation basée entités STEP-NC a été développée pour la mise en œuvre et la validation du concept de CN étendue. Cette plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) intègre l'ensemble des apports de la CN étendue au sein du système XMIS et a été implémentée sur des moyens de production industriels (Figure 65).



Figure 65 : Plate-forme SPAIM intégrée sur une CN industrielle Siemens 840D

L'étude détaillée de la construction et des tests menés à partir de cette plate-forme est proposée au chapitre 6.

4.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble de propositions pour l'évolution du système de fabrication en vue de l'intégration des possibilités de la programmation basée entités. Dans un premier temps, l'introduction du système étendu de fabrication intégrée XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System) s'appuie sur un ensemble d'unités modulaires communiquant à partir d'un pipeline d'échange des informations de fabrication. L'ensemble des échanges entre les différents modules est géré par une unité projet de production supportant les standards de programmation basée entités STEP et STEP NC. Les principaux apports d'un tel système ont pu être mis en avant en termes d'interopérabilité, de portabilité et d'intégration de l'ensemble des activités de fabrication. Dans un second temps, une vision applicative du système a pu être présentée par l'introduction de la CAO étendue XCAD (XCAD ou eXtended Computer Aided Design) et de la CN étendue (XCNC pour eXtended Computer Numerical Controller). Une distinction a aussi pu être faite entre les données STEP-NC génériques issus de XCAD et les données STEP-NC optimisées pour une machine traitées par XCNC. Nous avons pu voir, dans le cas de l'adaptabilité de la CN étendue aux différentes structures d'entreprise, la réelle nécessité d'intégration des outils de simulation, d'optimisation et d'adaptation de la fabrication au système de production. Dans ce cadre, le standard STEP-NC offre de nouvelles opportunités avec l'intégration d'un langage commun de programmation à différents procédés. Nous nous intéressons, dans le chapitre suivant, aux relations et à la manière d'aborder l'ensemble des étapes de simulation et d'optimisation, du modèle jusqu'à la pièce conforme, dans un contexte de programmation basée entités STEP-NC multi-process.

Chapitre 5. Intégration du contexte multi-process

L'étude de l'évolution de la programmation actuelle vers la programmation basée entités a permis de faire émerger plusieurs propositions d'amélioration du standard STEP-NC ainsi que l'introduction d'un système de fabrication adapté à la mise en œuvre de ce type de programmation émergente. Pour exploiter au mieux l'ensemble des possibilités offertes par le standard STEP-NC, nous avons mis en place une conception modulaire de la construction d'un tel système avec un échange multidirectionnel des données entre les différentes unités le constituant. Le regroupement du traitement des données génériques liées au modèle au sein de la CAO étendue, et des données optimisées machine au sein de la CN étendue permet d'envisager de façon plus concrète l'implémentation d'un tel système à partir d'outils préexistants ou nouveaux. Avec le système présenté, ces outils de modélisation, simulation, optimisation et adaptation de la production possèdent un socle commun pour leur réelle intégration au sein de la chaîne numérique de fabrication. Nous nous intéressons, dans ce chapitre, aux nouvelles possibilités offertes par la programmation basée entités dans un contexte multi-process au sein du système de fabrication ainsi que des avancées offertes de simulation et d'optimisation du processus de fabrication.

5.1 Problématique

La réalisation d'une pièce fait appel à un ensemble d'expertises pour converger vers la construction et la mise en œuvre optimale d'une gamme de fabrication adaptée. Des procédés et processus de fabrication variés peuvent être sollicités pour améliorer la productivité, diminuer les coûts et temps de production ou plus simplement permettre de réaliser la pièce. Chaque procédé de fabrication comporte des spécificités intrinsèques qui résultent actuellement dans des manières différentes d'aborder la programmation des moyens de fabrication. La problématique de ce chapitre concerne donc l'étude et l'exploitation des possibilités d'un support d'échange de données

commun à plusieurs procédés, à travers la construction d'une gamme multi-process STEP-NC et à l'intégration des nouvelles opportunités de simulation multi-process au sein du système de fabrication. Pour répondre à cette problématique, nous proposons dans un premier temps une nouvelle approche pour l'intégration d'une gamme multi-process dans la structure des données STEP-NC. Nous nous intéressons ensuite à la mise en place du concept d'espace de simulation dans un contexte multi-process permettant de modéliser les différents domaines de simulation pour la convergence vers une solution optimale dans un environnement multi-process, ainsi qu'un exemple d'implémentation des outils de simulation multi-process au sein de la CN étendue à partir des outils disponibles à l'IRCCyN.

5.2 Présentation du contexte de l'étude

Après avoir défini notre point de vue du contexte multi-process, nous situons l'étude envisagée par rapport à la programmation actuelle des différents procédés et détaillons les opportunités d'intégration liées à la programmation basée entités. Nous présenterons de même les différents champs de compétences de l'équipe MO2P dans le cadre de la programmation des moyens de fabrication associés à des procédés divers qui constitueront le socle de l'étude pertinente du contexte multi-process.

5.2.1 Définition du domaine d'étude multi-process

Le terme « manufacturing process » désigne, par traduction littérale de l'anglais, le processus de fabrication d'une pièce. Il inclut le procédé de fabrication et l'ensemble des étapes amont et aval de sa mise en œuvre. Suivant le contexte dans lequel il est employé, process peut aussi, de façon implicite, ne renvoyer qu'au procédé de fabrication en lui-même. Nous utilisons volontairement le terme multi-process, issu de l'anglais, pour notre utilisation française dans le but de conserver un terme générique ne limitant pas seulement à l'étude de plusieurs procédés mais de manière générale à l'ensemble des processus associés à la mise en œuvre de ces procédés.

5.2.2 La programmation actuelle des différents procédés

5.2.2.1 Chaîne numérique basée code G actuelle

La plupart des procédés faisant appel à des machines à commande numérique sont programmés à partir des outils de la chaîne numérique conventionnelle CAO/FAO/CN. À partir des données numériques du modèle CAO, les experts en

fabrication sont capables d'extraire de la géométrie globale du modèle, à partir de leur expérience, un ensemble d'entités de fabrication bien adaptées à la mise en œuvre pour un procédé choisi. Beaucoup de facteurs peuvent influencer la sélection du procédé approprié : la fabricabilité d'une pièce, le respect des tolérances, la disponibilité des moyens de fabrication, la maîtrise du procédé au sein de l'entreprise, le coût, les temps de fabrication, mais aussi des critères plus subjectifs et ainsi plus difficiles à modéliser liés à l'expérience des experts. À partir du choix des entités, l'ensemble des outils de simulation FAO lié au procédé est mis en œuvre pour la génération des instructions machine qui, après une étape de post-processing, sont compilés en code CN. Il existe donc une démarche unidirectionnelle descendante pour chacune des gammes liées au procédé qui sont alors considérées indépendamment. Le code CN de bas niveau utilisé ainsi que le cloisonnement des chaînes numériques mises en œuvre n'offrent aucune possibilité de supervision et d'échange des données tout au long de la chaîne numérique et en particulier au niveau de la CN. La Figure 66 schématise la programmation actuelle des MOCN pour la mise en œuvre de procédés différents : fabrication par Ajout de Matière (AM), Electroérosion (EDM), Usinage Grande Vitesse (UGV). Dans ce contexte, il existe un réel besoin d'un standard générique de haut niveau supportant l'échange des données à tous les niveaux de la chaîne numérique.

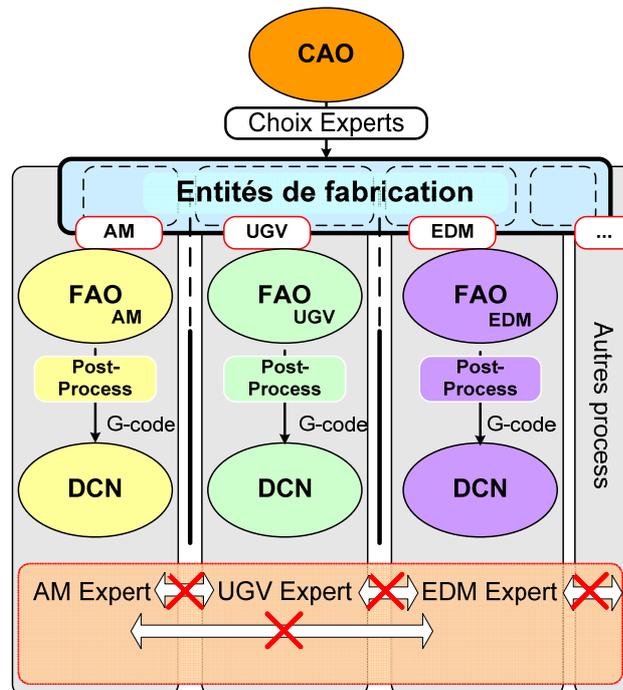


Figure 66 : Programmation actuelle des process de fabrication

Pour rendre cette chaîne numérique efficace, il est nécessaire de mettre en place un échange multidirectionnel des données. Verticalement, il est important d'intégrer l'ensemble du processus de fabrication jusqu'à la pièce réalisée en permettant le retour de l'information de la CN vers les modules de simulation. Horizontalement, l'échange de données entre les différents process de fabrication constitue un point clé pour permettre la collaboration d'experts, assurer une supervision optimale sur l'ensemble de la gamme de fabrication multi-process d'un produit et faciliter les interactions entre procédés. Dans ce domaine, des travaux de recherche sont difficilement réalisables sans un standard commun d'échange de données.

5.2.2.2 Machines multi-process

Avec l'amélioration des technologies, il est aujourd'hui possible de combiner plusieurs procédés de fabrication au sein d'un même équipement. L'utilisation de tours fraiseurs dans l'industrie est un exemple de cette tendance et permettent de réels gains de productivité et de flexibilité. La programmation de ces moyens devient cependant de plus en plus complexe. Les suites logicielles CFAO intègrent alors des modules propriétaires permettant d'améliorer le contrôle des axes et comportant des algorithmes complexes d'évitement des collisions. Les chaînes numériques associées demeurent cependant basées sur des principes d'unidirectionnalité du flux d'informations et il est impossible d'avoir un retour des interactions tournage/fraisage hors des logiciels éditeurs. Pour aller plus loin dans l'approche multi-process embarqué sur un même équipement, certaines machines proposent de regrouper des procédés très différents. Nous pouvons citer par exemple un prototype japonais [Kurita'05] permettant des opérations de fraisage, d'électroérosion et d'usinage électrochimique. Ces configurations sont encore limitées à des applications de micro-usinage mais permettent de montrer que la combinaison de plusieurs procédés lors d'une même phase de fabrication sur un même moyen constitue une solution envisageable pour la réalisation de pièces. Ainsi, l'environnement multi-process dans lequel nous menons notre étude inclut la possibilité d'intégration de telles machines, mais n'en demeure pour autant pas restreint à celles-ci.

5.2.2.3 Discussion

La fabrication multi-process représente un enjeu important pour le futur mais s'appuie encore sur des modes de pensée et de mise en œuvre conventionnels et désuets. L'utilisation de standards propriétaires FAO, de post-processeurs et de codes

CN de bas niveau sont aujourd'hui des verrous pour l'intégration complète de la chaîne numérique de fabrication multi-process. Dans ce contexte, les modèles de données STEP-NC offrent de nouvelles opportunités pour la réalisation d'un environnement de fabrication intégré multi-process.

5.2.3 STEP-NC : un standard commun à différents procédés

Plusieurs procédés sont en cours d'implémentation au sein des standards STEP-NC et permettront un flux multidirectionnel des données entre les différents modules de la chaîne numérique (Figure 67):

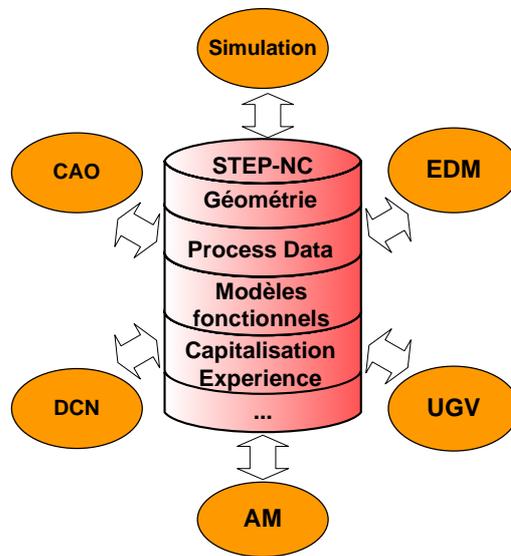


Figure 67 : Chaîne numérique intégrée STEP-NC multi-process

Les travaux de recherche au sein de la communauté STEP-NC ont conduit à l'élaboration de plusieurs parties de la norme ISO 14649 en lien avec les champs de compétence des principaux acteurs du projet [Newman'08]. Nous avons pu voir dans le paragraphe §2.4.2.2 que ceux-ci couvrent aujourd'hui des procédés par enlèvement de matière comme le fraisage, le tournage et l'électroérosion (EDM pour Electro Discharge Machining) et est en cours de développement pour les procédés par ajout de matière (AM). STEP-NC, en supportant un large champ de données orientées objet du modèle jusqu'à la CN, présente toutes les caractéristiques permettant de supporter les relations multi-process au sein d'un standard générique commun. Cependant, très peu de travaux de recherche ont été menés concernant cette approche. Après avoir présenté les principaux domaines de compétence liés aux procédés étudiés au sein de l'équipe MO2P, nous détaillons les grandes lignes de

l'élaboration de la norme STEP-NC pour la fabrication par ajout de matière que nous serons amenés à utiliser.

5.2.4 Domaines de compétence et fabrication par ajout de matière

L'intégration du contexte multi-process au sein de la chaîne numérique STEP-NC nécessite des connaissances approfondies dans les divers domaines d'expertise liés à la mise en œuvre des procédés. Les travaux de recherche effectués s'appuient sur les différents champs de compétence en termes de procédés étudiés au sein de l'équipe MO2P :

- Usinage : c'est historiquement le cœur de métier de l'équipe comportant deux axes principaux avec le fraisage et le tournage. Au sein du fraisage, plusieurs sous-thématiques ont vu le jour avec l'étude de la préparation de la fabrication, la compensation des défauts outils [Seo'98], la simulation de l'usinage grande vitesse [Dugas'02], la génération et l'adaptation des trajectoires [Rauch'07], la surveillance d'usinage [Ritou'06], etc. Les machines à structure parallèle ont aussi fait l'objet d'études concernant leur qualification et capabilité [Terrier'05a], leur programmation spécifique en comparaison avec les machines sérielles [Rauch'07], etc. Certains travaux concernent aussi le procédé de tournage et en particulier les applications sur tours fraiseurs multifonctionnels [Ahmad'10].
- Procédés innovants : le formage incrémental est un procédé de mise en forme qui consiste à déformer progressivement une tôle par repoussages successifs à l'aide d'un outil. La mise en œuvre de ce procédé peut- être effectuée grâce à une machine outil à commande numérique traditionnelle et la programmation actuelle de celle-ci est réalisée avec des outils de CFAO similaires à l'usinage (Figure 68).

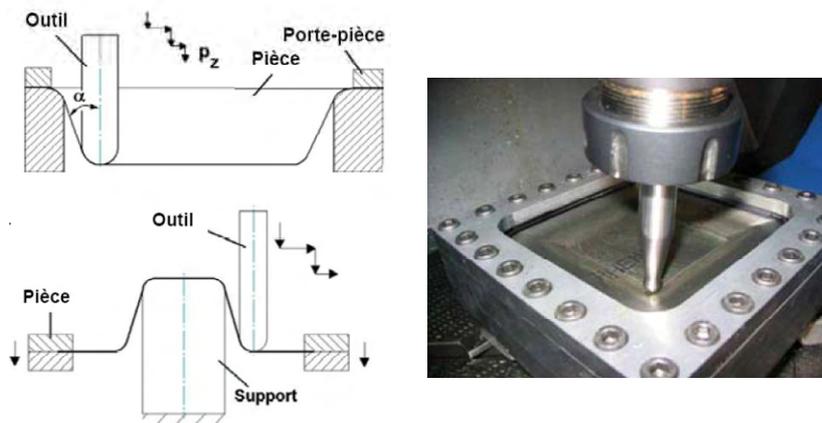


Figure 68 : Principes et mise en œuvre du formage incrémental sur MOCN

Les travaux de l'équipe concernant la génération des trajectoires de formage, le choix des principaux paramètres liés à la programmation de la machine et plusieurs campagnes expérimentales ont pu être menées sur les moyens du laboratoire [Rauch'09b].

- Procédés par ajout de matière : la plupart des techniques de base actuelles sont dites de « fabrication par couches ». Il peut s'agir de couches de résines polymérisées localement, de couches de poudre liées par fusion laser, de couches découpées et collées, de couches soudées, de couches résultant de la projection de matière sur un liant ou de sections construites par dépôt d'un fil fondu. Plusieurs travaux ont mené à l'étude de ces procédés [Kerninon'09] et de leur mise en œuvre dans des cas particuliers comme l'obtention d'outillages rapides [Rivette'07; Kerbrat'09]. L'équipement récent du laboratoire avec une machine 5 axes Huron munit de deux têtes de fusion laser de poudre (une tête « ébauche » permettant un débit élevé de matière et une tête « finition ») ouvre de nouvelles perspectives de recherches expérimentales dans ce domaine.

La fabrication par ajout de matière est en cours d'implémentation dans les normes STEP-NC. L'IRCCyN est un acteur majeur dans ce projet. Initialement, les normes STEP-NC ont été développées pour des procédés d'enlèvement de matière (fraisage, tournage, électroérosion) et ne sont pas directement transposables à des procédés par ajout de matière. Pour ceci, une méthodologie complète a pu être mise en place pour implémenter et valider le modèle STEP-NC pour la fabrication par ajout de matière [Bonnard'08]. La première étape consiste en la description d'un modèle hiérarchisé générique intégrant l'ensemble des technologies des procédés par ajout de matière. Il permet de décrire les machines, les paramètres de fabrication ainsi que des entités nouvelles spécifiques à la réalisation de pièces par ajout de matière. En plus des entités déjà existantes extraites de la norme ISO 10303 AP224, il a pu être introduit des entités comme les canaux conformes ou la création de supports pour la construction par couches (Figure 69).

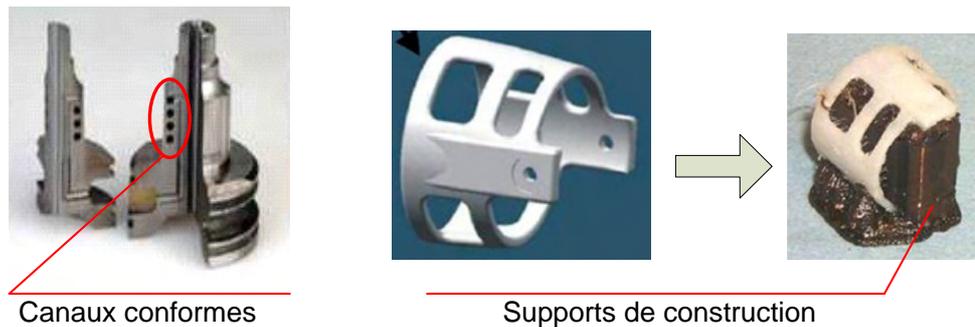


Figure 69 : Exemple d'entités spécifiques aux procédés par ajout de matière

Ces choix ont pu être validés lors des étapes suivantes par intégration de la fabrication par ajout de matière dans le logiciel coréen PosSFP pour la génération des données STEP-NC et implémentés à la plate-forme de démonstration SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing).

L'ensemble des compétences développées au sein de l'équipe MO2P permettent d'envisager la mise en œuvre d'un contexte STEP-NC multi-process intégrant le fraisage, le tournage, le formage incrémental et les procédés de fabrication par ajout de matière.

5.3 Programmation d'entités multi-process STEP-NC

La programmation des données STEP-NC est aujourd'hui réalisée de manière indépendante pour chacun des procédés mis en œuvre. Nous présentons dans cette partie une proposition pour intégrer une gamme multi-process de fabrication d'une pièce au sein des données STEP-NC.

5.3.1 Présentation du concept

Nous proposons de définir un système multi-process intelligent comme un système complet permettant la supervision autonome de plusieurs moyens et procédés de fabrication avec un minimum d'interaction à l'égard de l'opérateur humain. Alors que la chaîne numérique actuelle ne peut se baser que sur les pratiques expertes des utilisateurs, STEP-NC offre de nouvelles possibilités d'intégration d'un support de données complet, du modèle jusqu'à la pièce réelle en supportant plusieurs procédés. En cela, il ouvre la voie à la création de passerelles fortes de communication entre les différents experts avec un langage commun et bien adapté. De plus, il fournit un support pour les simulations et optimisations numériques au sein de la gamme multi-

process. Ainsi, construire un support de données bien adapté est une première étape, s'intéresser à son exploitation et à la génération des données adaptées constitue une seconde étape importante. La vue d'ensemble de ce projet est schématisée Figure 70.

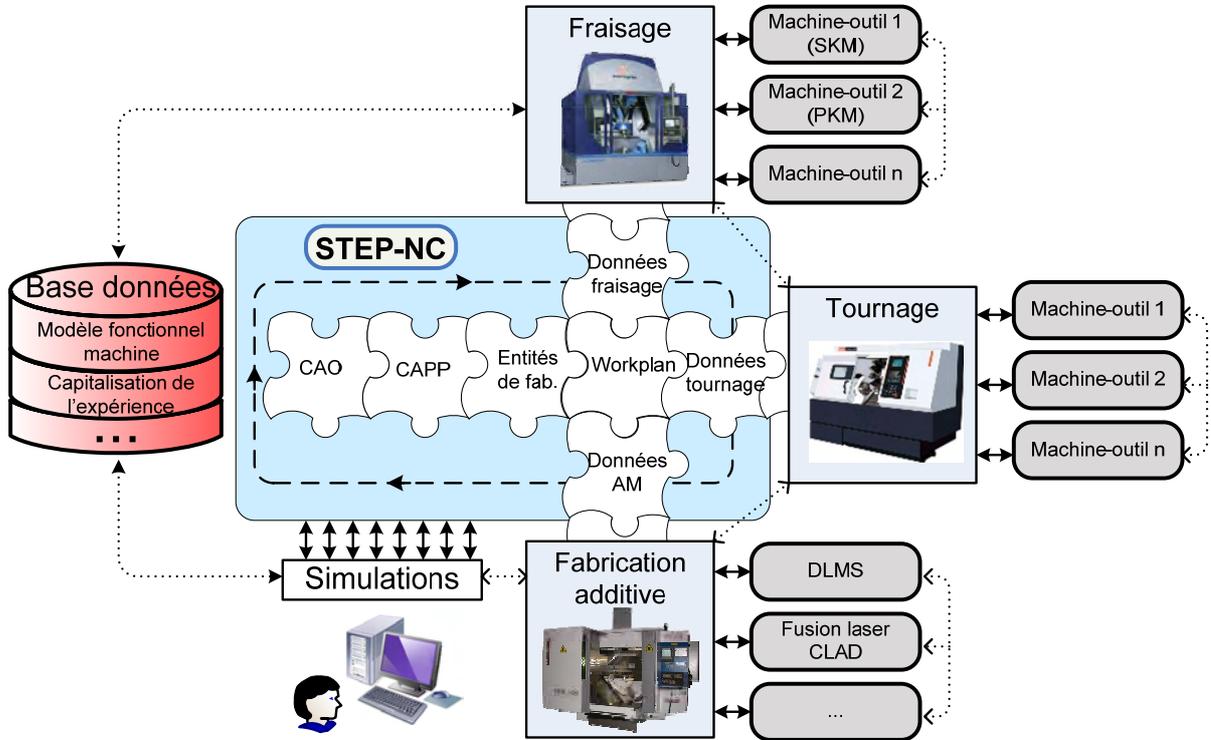


Figure 70 : Chaîne numérique STEP-NC multi-process

Dans un premier temps, l'objectif est de pouvoir intégrer, au sein de la base de données STEP-NC, la possibilité de construction d'une gamme intégrant plusieurs procédés. Ainsi, la séquence des opérations de fabrication (Workplan) peut faire appel, pour chaque entité définie, à un procédé et de manière plus générale à un processus de fabrication particulier. Il est, dans un second temps, envisageable d'intégrer plusieurs procédés pour la réalisation d'une même entité (par exemple en alternant les dépôts de matière par fabrication additive et des reprises en fraisage entre les différentes couches). Une fois cette structure de description STEP-NC des opérations mise en place, l'objectif est de pouvoir aborder la programmation optimale par simulation suivant les besoins de l'opérateur dans ce contexte multi-process complexifiant l'espace des solutions.

5.3.2 Construction de données STEP-NC multi-process

La construction des données STEP-NC multi-process s'appuie sur les normes ISO 14649 existantes. Actuellement, l'élaboration des données STEP-NC est réalisée dans le cas d'un procédé unique en reprenant la hiérarchie détaillée dans les différentes parties de la norme ISO 14649. À partir du modèle géométrique d'une pièce (Workpiece), les entités de fabrication sont extraites et associées à des opérations de fabrication. Leur séquençement permet l'ordonnancement de la gamme de fabrication (Workplan). Les opérations sont ensuite explicitées par la description des technologies, des stratégies, des trajectoires et des outils utilisés. Nous proposons l'adoption d'une méthode de construction analogue pour une gamme multi-process. La Figure 71 reprend les grands axes de la description de données STEP-NC multi-process.

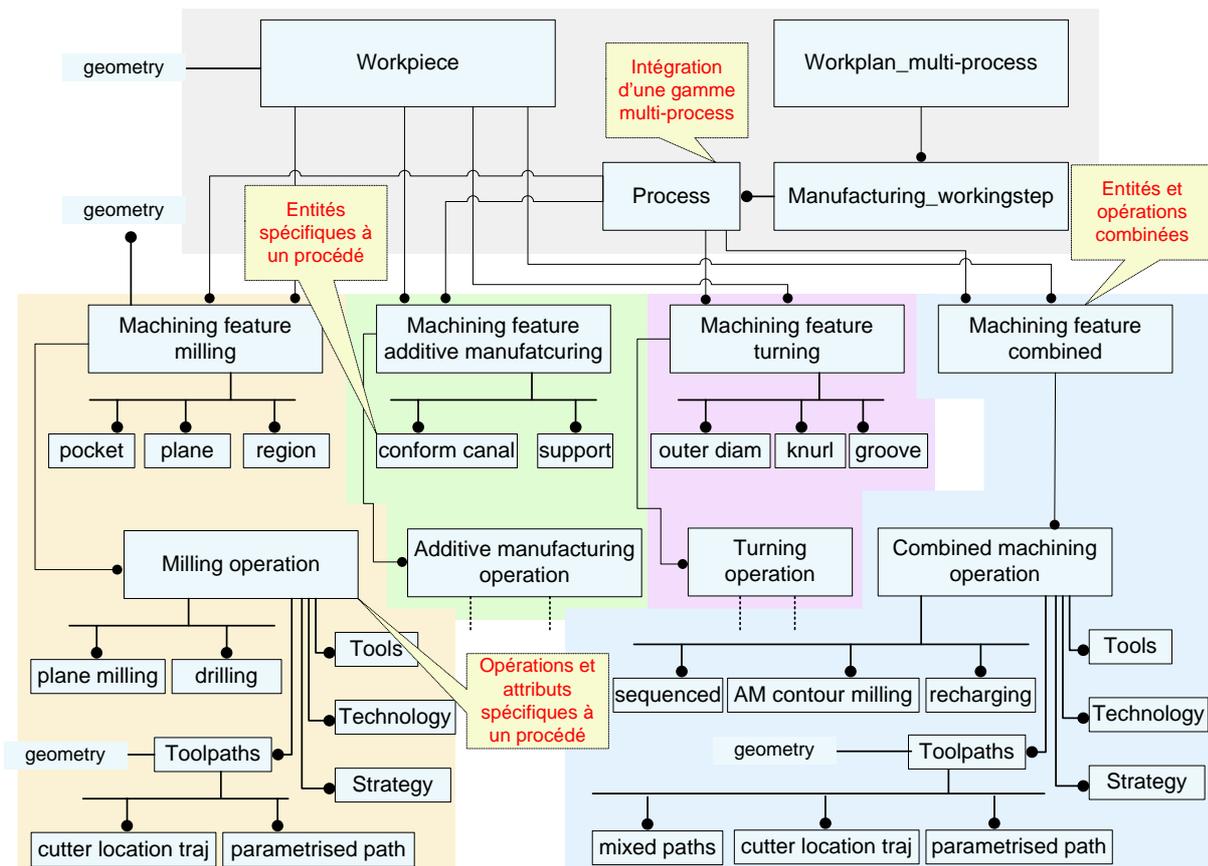
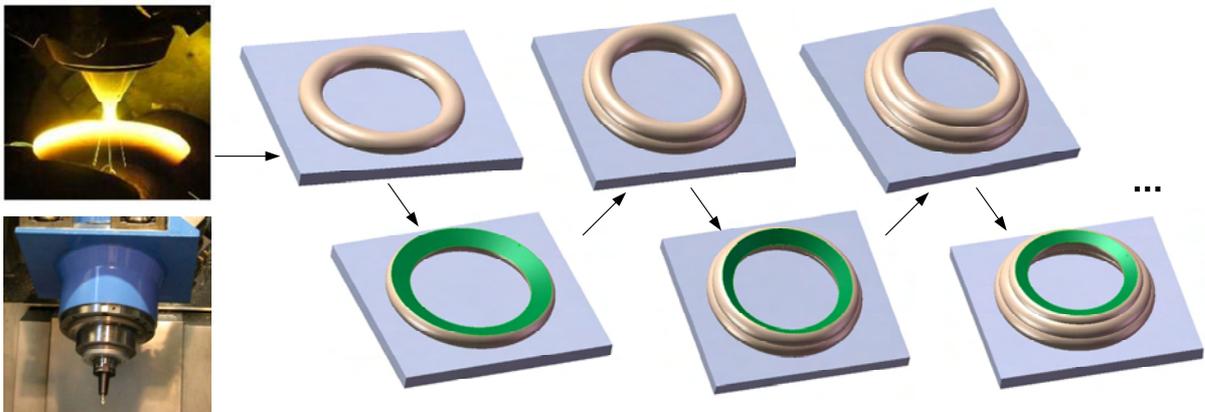


Figure 71 : Intégration du contexte multi-process dans STEP-NC

La gamme de fabrication proposée est composée d'une liste d'opérations réalisées à partir de plusieurs procédés. Il est possible de retrouver l'ensemble des entités de fabrication spécifiques à un procédé (par exemple description de canaux conformes

dans le cas de la fabrication additive). Les opérations spécifiques associées aux entités de fabrication permettent l'accès aux différents attributs (outils, stratégies, trajectoires, etc.) décrits dans les différentes parties de la norme ISO 14649 (Part 11 pour le fraisage, Part 12 pour le tournage, Part 17 pour la fabrication additive, etc.). Nous proposons, au-delà de cela, d'intégrer des possibilités de description d'opérations réalisées par combinaison de différents procédés. Pour ceci, des entités de fabrication combinant des géométries associées à plusieurs procédés peuvent être décrites ainsi que des opérations de fabrication constituées de tâches multi-process. Le séquençement de ses différentes tâches peut être décrit au sein d'une même opération et se traduit par exemple par la génération des trajectoires mixtes faisant intervenir plusieurs procédés. La description d'opérations dédiées à la combinaison de plusieurs procédés permet de regrouper un ensemble de tâches au sein d'une même opération sans avoir à décrire une multitude de géométries intermédiaires pour la réalisation d'une entité de fabrication. L'illustration de telles opérations combinées peut être présentée avec l'exemple de la réalisation d'une pièce par combinaison de fabrication additive par fusion laser de poudre et usinage (Figure 72).

Fabrication par Ajout de Matière (AM)



Usinage

Figure 72 : Séquence combinée fabrication additive et usinage pour la réalisation d'une entité

Deux aspects peuvent être considérés pour la description d'entités et d'opérations combinées :

- *Aspect conformité de la pièce* : comme dans l'exemple de la Figure 72, la réalisation d'une entité de fabrication peut faire appel à une séquence d'opérations élémentaires associées à différents procédés pour permettre ou faciliter la

fabrication conforme la pièce. Dans l'exemple, le dépôt d'une ou plusieurs couches de métal par fusion laser de poudre est suivi d'une reprise en usinage permettant d'accueillir les couches suivantes de fabrication additive. Cette méthode permet une meilleure maîtrise de la construction d'une pièce et offre des opportunités pour la réalisation de la pièce alors impossibles sans l'association multi-process.

- *Aspect fabricabilité* : en associant les capacités et capabilités des différents procédés, il est possible de réaliser des pièces finies impossibles à réaliser sans combinaisons multi-process. Ainsi par exemple, l'intérieur d'une pièce fermée ou semi fermée construite en fabrication additive peut être reprise en usinage finition entre les couches déposées lorsque les surfaces sont encore accessibles par l'outil.

Ces domaines de recherche, concernant la combinaison de plusieurs procédés pour la réalisation d'une entité, sont assez limités aujourd'hui, en particulier lors du recours à la fabrication additive. Il existe cependant de vastes champs d'investigation et les travaux dans ces thématiques demeurent émergents. Cette approche de définition d'entités et d'opérations combinées ouvre la voie à de nouvelles possibilités de fabrication multi-process embarqué mais nécessite un retour d'expérience et une prise de recul. Suite à cela, des propositions plus poussées d'intégration concrètes dans les normes STEP-NC pourront être proposées.

5.3.3 Apports de l'approche basée entités multi-process

Nous synthétisons dans la suite les principaux apports de notre proposition concernant la programmation basée entités multi-process :

- *Une proposition nouvelle* : malgré l'existence d'un standard supportant différents procédés, peu de travaux ont porté sur l'intégration, au sein de STEP-NC, du contexte multi-process. La réalisation d'une gamme comportant plusieurs opérations liées à des procédés différents au sein d'un même environnement logiciel de programmation basée entités a pu être mise en œuvre avec la plate-forme de démonstration SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) développée à l'IRCCyN (Figure 73). Nous détaillerons son architecture ainsi que les pièces test traitées présentant des gammes de fabrication multi-process au chapitre 6 de ce manuscrit.

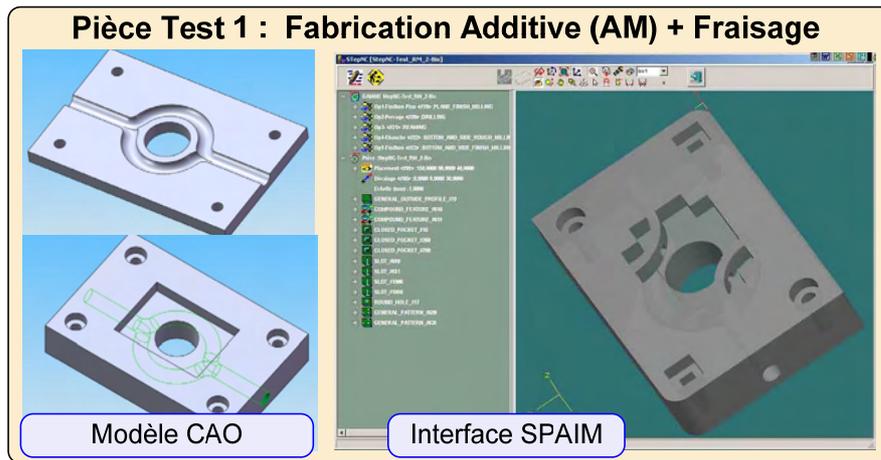


Figure 73 : Pièce multi-process traitée avec la plate-forme d'application STEP-NC

- *Unification de la programmation des procédés* : l'ensemble des procédés faisant appel à des machines à commande numérique bénéficie, avec cette approche, d'une uniformisation de leur programmation. Cela permet directement de mettre en commun un grand nombre d'efforts de développement d'applications ainsi qu'une capitalisation transversale de l'expérience.
- *Regroupement des tâches au sein de la CN étendue* : une conséquence de l'uniformisation de la programmation des procédés est la possibilité d'intégration complète au sein de la CN étendue et, de manière plus générale, au sein du système de fabrication. Cette intégration est alors possible entre les procédés mais aussi à travers les possibilités de retour de l'information de la machine en direction du process planning et de la CAO étendue.
- *Intégration de nouveaux procédés* : à partir de l'expérience acquise avec l'implémentation des procédés déjà existantes au sein des standards de programmation basée entités, l'intégration de nouveaux procédés peut être rapidement proposée par analogie et expérience capitalisée. Nous pouvons par exemple citer le cas du formage incrémental dont les bases d'implémentation peuvent être reprises à partir du fraisage, en ajoutant des spécificités liées à ce procédé (retour élastique de la tôle, stratégies spécifiques, etc.).
- *Support commun et compatible d'échange des données entre procédés* : la programmation basée entités multi-process propose un support d'échange de données permettant aux utilisateurs experts, à travers les différents modules de simulation, de communiquer dans un même langage s'appuyant sur la notion d'entités, commune à un grand nombre de procédés. Il ouvre de plus de nouvelles

possibilités de mise en commun des compétences avec la création d'entités multi-process combinées pour l'association des capacités des différents procédés.

Nous avons, dans ce paragraphe, posé le cadre de la construction d'une gamme STEP-NC multi-process. Nous nous intéressons, dans la suite, à la simulation multi-process des données de la gamme pour une production optimale et intelligente dans un contexte multi-process.

5.4 Concept d'espace de simulation dans un environnement multi-process [Laguionie'09c]

Les échanges de données au même format entre les différents processus ouvrent de nouvelles voies d'investigation pour les simulations au sein de la gamme de fabrication. Nous proposons, dans ce paragraphe, une modélisation des possibilités de simulation avec l'introduction du concept d'espace de simulation dans l'environnement multi-process.

5.4.1 Modélisation d'un environnement global de simulation

L'approche multi-process implique des scénarios de plus en plus complexes et des problématiques nouvelles. Le standard STEP-NC fournit le support de données pour la fabrication intelligente multi-process. Une grande partie de l'intelligence et de la valeur ajoutée d'une telle approche consiste en la simulation, l'optimisation et l'adaptation des données STEP-NC ainsi que leur interprétation au sein de la CN étendue. Il existe en effet un large champ d'action. Il demeure cependant très complexe d'aborder la simulation de l'ensemble des possibilités envisageables au sein de l'environnement multi-process. Il est ainsi d'autant plus difficile de trouver la solution optimale. L'approche présentée a pour but de modéliser notre vision des principaux champs de simulation. Notre proposition se base sur la description de trois principaux espaces de simulation (Figure 74). Un espace de simulation en fabrication peut être défini comme un ensemble ouvert et structuré rassemblant l'ensemble des outils, des méthodes et des approches de simulation et d'optimisation touchant au domaine de la fabrication. La décomposition en espaces de simulation est représentée ici sous forme de cercles aux frontières imaginaires représentant les limites de la connaissance actuelle mais pouvant être indéfiniment étendues.

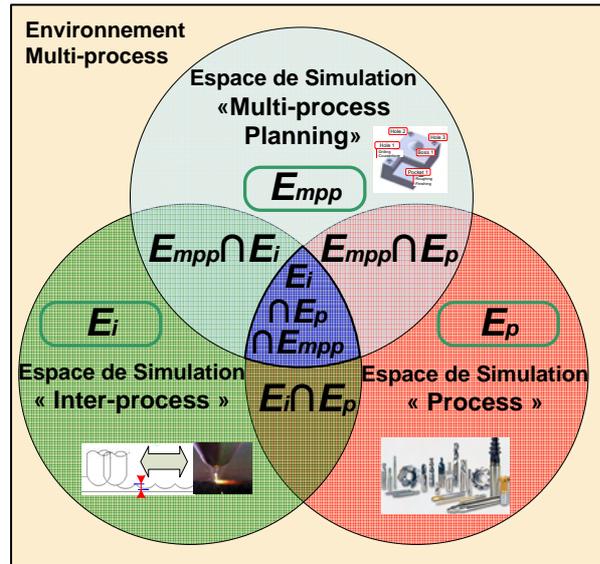


Figure 74 : Modélisation en espaces de simulation

Nous détaillons dans la suite le contenu des espaces de simulation proposés :

- *Espace de simulation « multi-process planning » (E_{mpp})* : regroupe l'ensemble des outils permettant le passage du modèle CAO aux entités de fabrication et au séquençement des opérations. La discrétisation du modèle CAO en entités de fabrication implique plus que la reconnaissance de formes géométriques usuelles. Un grand nombre de travaux ont été menés dans le domaine de la reconnaissance d'entités de fabrication [Babic'08]. Il en résulte que la convergence vers une solution peut être difficilement dissociée des procédés de fabrication utilisés. En d'autres termes, le choix de la géométrie d'une entité de fabrication est directement lié au procédé de fabrication choisi. Ainsi, chaque pièce peut donner lieu à une multitude de décompositions au sein de l'environnement multi-process. Le champ d'investigation de l'espace de simulation « multi-process planning » vise à converger vers une solution optimale de choix des procédés utilisés, des entités de fabrication et de séquençement des opérations de fabrication. Pour situer cet espace dans le contexte du système de fabrication XMIS, celui-ci rassemble par exemple l'ensemble des modules permettant la génération de données STEP-NC génériques au sein de la CAO étendue.
- *Espace de simulation « process » (E_p)* : la gamme de fabrication est composée de plusieurs opérations associées à des entités de fabrication. L'espace de simulation process rassemble l'ensemble des choix effectués pour la mise en œuvre d'une opération avec un procédé et une machine spécifique. Il concerne en particulier le choix des données process, la sélection des paramètres machine optimisés, les

simulations et optimisations en ligne, etc. Au sein de la CN étendue, nous trouvons en grande partie des modules issus de l'espace de simulation process : générateur de trajectoires, simulation des collisions, adaptation temps réel des paramètres de fabrication, monitoring intelligent, simulation à partir des retours capteurs, etc.

- *Espace de simulation « inter-process » (E_i)* : les relations entre les différents procédés prennent une place centrale dans un contexte multi-process. La plupart des outils de simulation actuels n'intègrent pas ces relations fortes et font majoritairement partie des espaces de simulation multi-process planning et process. L'espace de simulation inter-process constitue réellement le lien manquant entre E_{mpp} et E_i dans un contexte totalement intégré multi-process. Il regroupe l'ensemble des outils, au sein de la CAO étendue comme de la CN étendue, qui réellement s'intéressent aux relations entre les procédés. Ainsi, par exemple, l'utilisation d'un procédé comme la fabrication additive par fusion laser de poudre [Kerninon'08a] a des conséquences directes sur les autres opérations de la gamme de fabrication (préparation de la surface pour dépôt de poudre, zone affectée thermiquement, nécessité éventuelle de reprise en usinage avec des paramètres particuliers, etc.) qui sont simulées au sein de E_i .

5.4.2 Interactions entre espaces de simulation

Les différentes zones d'interactions entre les espaces de simulation représentent le lieu des outils et approches liant des domaines de compétences différents :

- *Interactions process et multi-process planning ($E_p \cap E_{mpp}$)* : les interactions entre E_{mpp} et E_p rassemblent les outils de simulation process en lien étroit avec le process planning, et réciproquement. $E_{mpp} \cap E_p$ inclut les relations bidirectionnelles entre chacun des procédés et de la planification du processus de fabrication. Les relations entre les entités de fabrication, le séquençement des opérations et les paramètres process sont importantes. Par exemple, lors du fraisage de finition d'une poche, le diamètre outil est limité par le rayon de congé de l'entité à usiner. Inversement, la caractérisation du process peut avoir une influence directe sur la sélection des entités multi-process planning. Ainsi, l'utilisation d'un foret étagé pour la réalisation d'un trou et d'un lamage a pour conséquence le regroupement de ces deux entités en une seule opération d'usinage.
- *Interactions multi-process planning et inter-process ($E_{mpp} \cap E_i$)* : les contraintes associées à chaque procédé de fabrication doivent être prises en compte lors de la

création des entités et de la gamme de fabrication. Ces interactions sont simulées dans $E_i \cap E_{mpp}$. Par exemple, les effets thermiques de l'utilisation d'un procédé comme la fabrication additive par fusion laser de poudre peuvent contraindre les entités concernées à être réalisées en amont de la gamme de fabrication, avant les opérations de finition en usinage. Réciproquement, le choix des entités de fabrication peut avoir des conséquences directes sur le séquençement d'utilisation des procédés, et ainsi une répercussion sur les relations inter-process.

- *Interactions process et inter-process ($E_p \cap E_i$):* l'espace de simulation process E_p , en lien direct avec le modèle fonctionnel des machines, peut fournir des résultats de simulations associés à la réalisation d'une entité avec un procédé défini. Ces résultats peuvent avoir des conséquences directes quant au choix des paramètres de fabrication liés aux autres procédés dans la gamme de fabrication. Par exemple, les conditions de coupe en fraisage (avance, vitesse de coupe, profondeur de passe, etc.) peuvent être adaptées en fonction des effets thermiques liés aux conditions de fabrication par fusion laser de poudre.
- *Solutions globales et optimisées au sein de l'espace de simulation complet process, multi-process planning et inter-process ($E_{mpp} \cap E_p \cap E_i$):* le but à atteindre est de converger vers des solutions issues de simulation intégrant l'ensemble complet de l'environnement multi-process, c'est-à-dire optimiser au sein des espaces process, multi-process planning et inter-process. Cependant, les simulations au sein de $E_{mpp} \cap E_p \cap E_i$ mettent en jeu des raisonnements et des méthodes complexes.

L'ensemble de ces concepts nécessite la mise en place des possibilités de transfert et d'échange multidirectionnel des données de fabrication pour permettre aux différents outils de simulation une communication intelligente et efficace. Le système XMIS, avec sa structure modulaire et les standards génériques sur lesquels se repose l'échange des données, offre un environnement bien approprié pour la mise en œuvre des concepts de multi-process. Il permet de rassembler au sein d'une même CN étendue le pilotage des différents procédés. Cela ouvre la voie à la gestion en ligne des paramètres de la gamme de fabrication avec la possibilité d'optimisations temps réel de la production intégrant l'ensemble des interactions multi-process.

5.4.3 Apports du concept d'espaces de simulation

Ainsi, les principaux apports de la modélisation en espaces de simulation sont les suivants :

- *Mettre en avant des possibilités inter-process pas ou peu exploitées aujourd'hui.* En effet, il existe peu de travaux s'intéressant réellement aux relations entre les différents procédés (influence des paramètres opératoires d'un procédé sur un autre, intégration complète de la séquence multi-process au sein des outils de simulation, etc.). La combinaison de plusieurs procédés au sein d'un même moyen de production constitue une voie prometteuse pour l'amélioration de la flexibilité, de la fabricabilité des pièces et de la productivité de l'entreprise. Le tournage-fraisage combinés est un exemple de cette association aujourd'hui largement répandu dans l'industrie. L'association d'autres procédés comme la fabrication additive et l'usinage demeure aujourd'hui émergente mais offre des perspectives très intéressantes à l'avenir.
- *Proposer les bases d'une approche globale permettant de structurer la manière d'aborder des problèmes complexes multi-process.* L'introduction de l'espace de simulation inter-process est une première étape dans la prise en compte de l'ensemble des contraintes associées aux simulations multi-process. C'est aujourd'hui un maillon faible de la chaîne numérique de fabrication avec peu d'outils spécialisés.
- *Offrir une vision globale des domaines de simulation.* Avec cette formalisation, c'est un point de vue d'ensemble des possibilités de simulation dans un environnement multi-process qui est proposée. A partir de là, il est nécessaire d'adapter cette vision à la réalité des besoins d'un système de fabrication. C'est ce que nous proposons dans le paragraphe suivant après avoir illustré les relations inter-process par un cas d'étude.

5.5 Mise en œuvre des outils de simulation dans la chaîne numérique STEP-NC [Laguionie'10]

L'approche par les espaces de simulation du contexte multi-process permet de définir un cadre de travail et d'implémentation des outils de simulation process, multi-process planning et inter-process. Nous proposons de nous appuyer sur les développements déjà réalisés au sein de l'équipe MO2P. Nous illustrons dans un premier temps les relations inter-process en étendant le domaine d'application d'outils de simulation permettant de quantifier la complexité de réalisation d'une pièce par un procédé choisi. Par la suite, nous détaillons les principaux outils de simulation

disponibles ainsi que leur implémentation au sein du système de fabrication s'appuyant sur la chaîne numérique STEP-NC.

5.5.1 Illustration des relations inter-process par un cas d'étude

La prise en compte des relations inter-process constitue un point clé pour l'intégration complète de l'environnement multi-process au sein des outils de simulation. Pour illustrer ces relations, nous proposons l'étude d'une pièce initialement traitée dans la thèse de doctorat d'Olivier Kerbrat comme application d'une méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basés sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication [Kerbrat'09]. Les outils de simulation process développés permettent d'estimer, à partir de la géométrie de la pièce, la complexité de fabrication associée à un procédé par évaluation quantitative à partir d'indices globaux et locaux associés à un procédé de fabrication. Une cartographie de la complexité de fabrication d'une pièce est ainsi disponible avec différents procédés comme le fraisage ou la fabrication par ajout de matière. De tels outils peuvent permettre d'initier une réelle réflexion inter-process, comme illustré Figure 75.

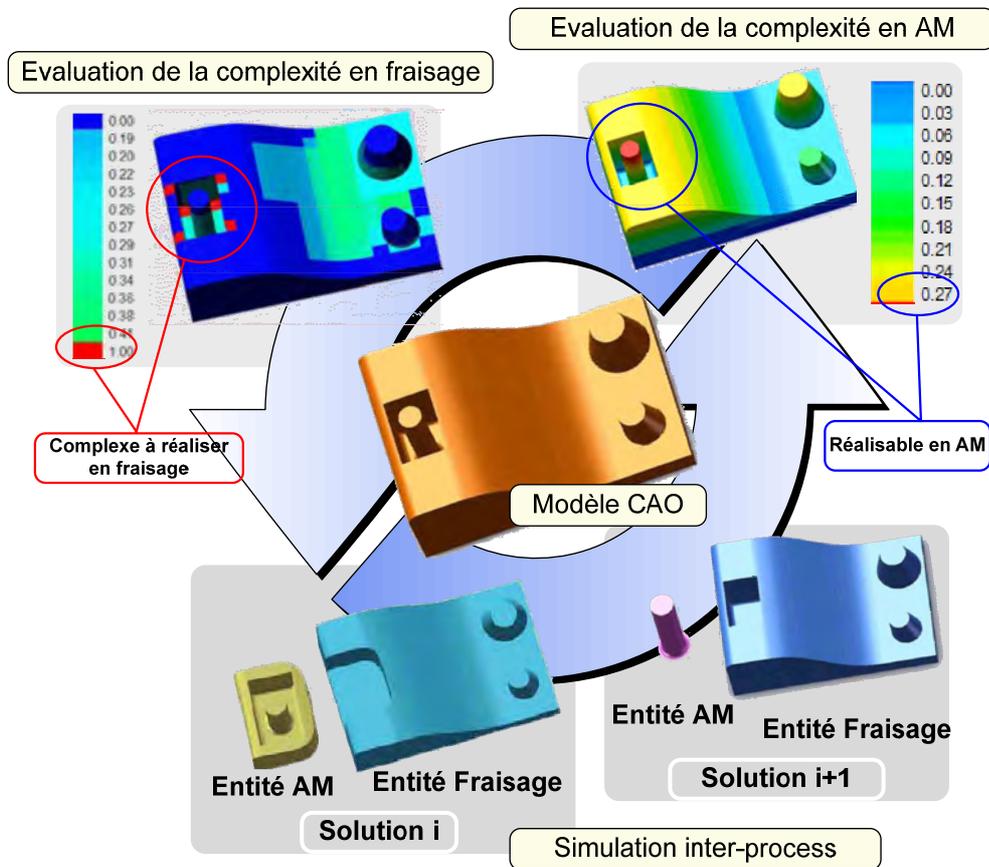


Figure 75 : Evaluation de la complexité de fabrication et réflexion inter-process

Le modèle CAO de la pièce proposée est tout d'abord traité par l'outil de quantification de la complexité d'usinage en fraisage. Celui-ci révèle une zone difficile ou impossible à usiner (échelle de 0 à 1, avec 1 indice de complexité maximale). Le fraisage n'est donc pas le procédé approprié pour la réalisation de l'entité rectangulaire concernée. Une évaluation de la complexité en fabrication par ajout de matière est alors menée et montre que l'entité en question est facilement réalisable par ce procédé. À partir de ces analyses process, il est possible d'envisager la réalisation de la pièce en faisant appel aux deux procédés cités, ce qui entraîne une décomposition en entités de fraisage et de fabrication additive. La mise en jeu de ces procédés différents appelle à la prise en compte des relations et interactions entre ces différents procédés par l'intermédiaire de simulations inter-process. La décomposition en entités de fabrication pour chaque procédé offre un panel de solutions (solutions i , $i+1$, etc.). Les simulations inter-process permettent de converger vers le choix d'entités mais aussi de paramètres de mise en œuvre optimaux.

À ce jour, il existe peu d'outils réellement dédiés aux simulations inter-process, la plupart étant des outils de simulation process au multi-process planning. Dans notre exemple, le choix de décomposition en entités des solutions i ou $i+1$ a été réalisé à la main suivant notre expérience des différents procédés mis en jeu. Elles ne sont certainement pas optimales parmi l'ensemble des solutions et privilégier l'une d'entre elles est difficile sans outil d'aide à la décision inter-process. Il existe aujourd'hui un réel manque de propositions dans ce domaine. Cet exemple permet cependant de bien illustrer les interactions entre l'espace de simulation inter-process et les espaces de simulation process et multi-process planning (Figure 76).

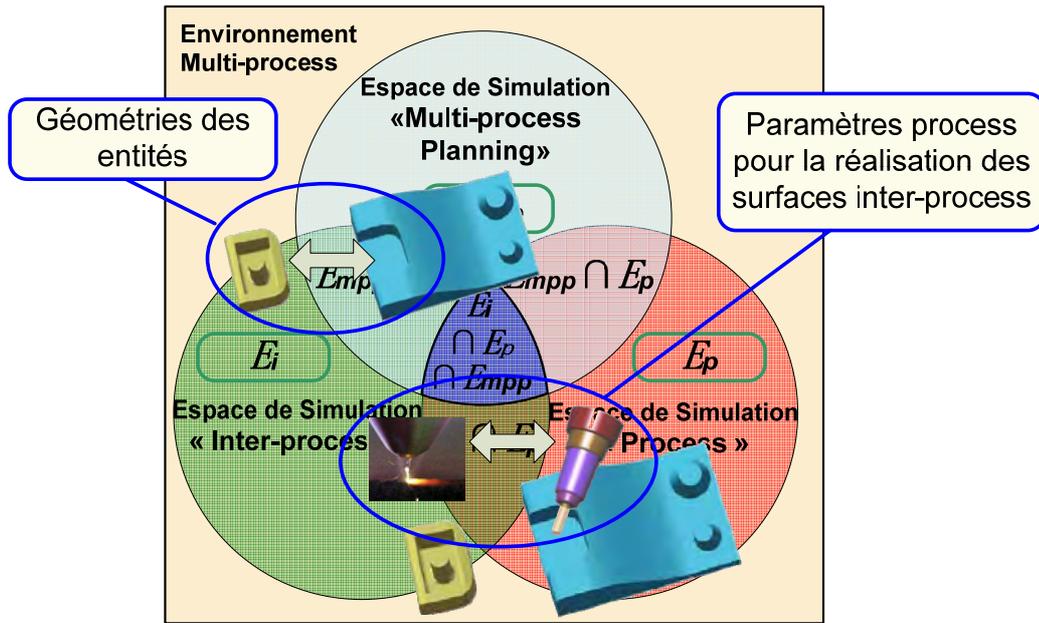


Figure 76 : Exemple de simulations inter-process

Ainsi, les interactions $E_i \cap E_{mpp}$ rassemblent par exemple l'ensemble des outils d'aide à la décomposition en entités de fabrication en prenant en compte les relations entre les procédés (géométries fabricables, répercussion des effets d'un procédé sur l'autre comme par exemple par le choix de géométries bien adaptées pour favoriser la dispersion thermique et éviter les répercussions en usinage, évolution des coûts suivant les géométries, etc.). Les interactions $E_i \cap E_p$ se focalisent plutôt sur la mise en œuvre des procédés et en particulier sur les relations entre les paramètres de fabrication pour la réalisation des surfaces inter-process (par exemple les paramètres d'usinage permettant un état de surface et des défauts de forme maximum pour pouvoir accueillir un dépôt de matière optimal, adaptation des conditions de dépôt pour une reprise en usinage finition, etc.).

5.5.2 Implémentation dans la chaîne STEP-NC IRCCyN

Au sein de l'ensemble des modélisations et optimisations produit-process réalisées au sein de l'équipe MO2P, plusieurs études portent sur des procédés différents, et en particulier l'usinage et la fabrication additive. Nous proposons ici d'intégrer une partie des outils de simulation disponibles au sein du système de fabrication STEP-NC que nous proposons. Le Tableau 4 synthétise les outils disponibles et situe leur domaine d'application au sein des espaces de simulation proposés :

XMIS	Outils développés au sein de l'équipe MO2P	Process	Multi-process planning	Inter-process
Unité de planification	PosSFP [Suh'02c] implémenté des stratégies à motifs [Laguionie'08a] et fabrication additive [Bonnard'08]			
	Analyse des entités AP224 et procédés de fabrication pour l'assemblage [Rivette'07]			
	Quantification de la complexité de fabrication [Kerbrat'09]			
	Analyse morphologique modèle/procédé de fabrication additive [Kerninon'09]			
Unité d'analyse	Simulateur UGV en prenant en compte le comportement réel de la machine [Dugas'02]			
	Optimisation du vidage de poche [Guillotin'07b]			
	Compensation des déflexions outils [Seo'98]			
	Choix des stratégies d'usinage [Rauch'07]			
	Simulations spécifiques aux machines à structure parallèles [Terrier'05a; Rauch'07]			
	Effet du choix des stratégies pour la réalisation de pièces par ajout de matière [Kerninon'08b]			
Unité pilotage	Méthode ICAM – Adaptation en ligne des paramètres et trajectoires [Rauch'07]			
	Surveillance d'usinage en fraisage par un suivi de la broche [Ritou'06]			
Unité diagnostic	Optimisation en boucle fermée pour l'usinage de poches sur pièces déformables			

 Outils disponibles
  Extensions proposées

Tableau 4 : Outils de simulations disponibles au sein de l'équipe MO2P

Nous nous proposons d'intégrer l'ensemble de ces modules au sein du système étendu de fabrication intégrée XMIS appliqué à l'IRCCyN. Pour ceci, les différents outils de simulation sont intégrés aux unités de planification, d'analyse, de pilotage et de diagnostic de la plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) développée dans le cadre de nos travaux d'application, de validation et de démonstration des concepts proposés (Figure 77).

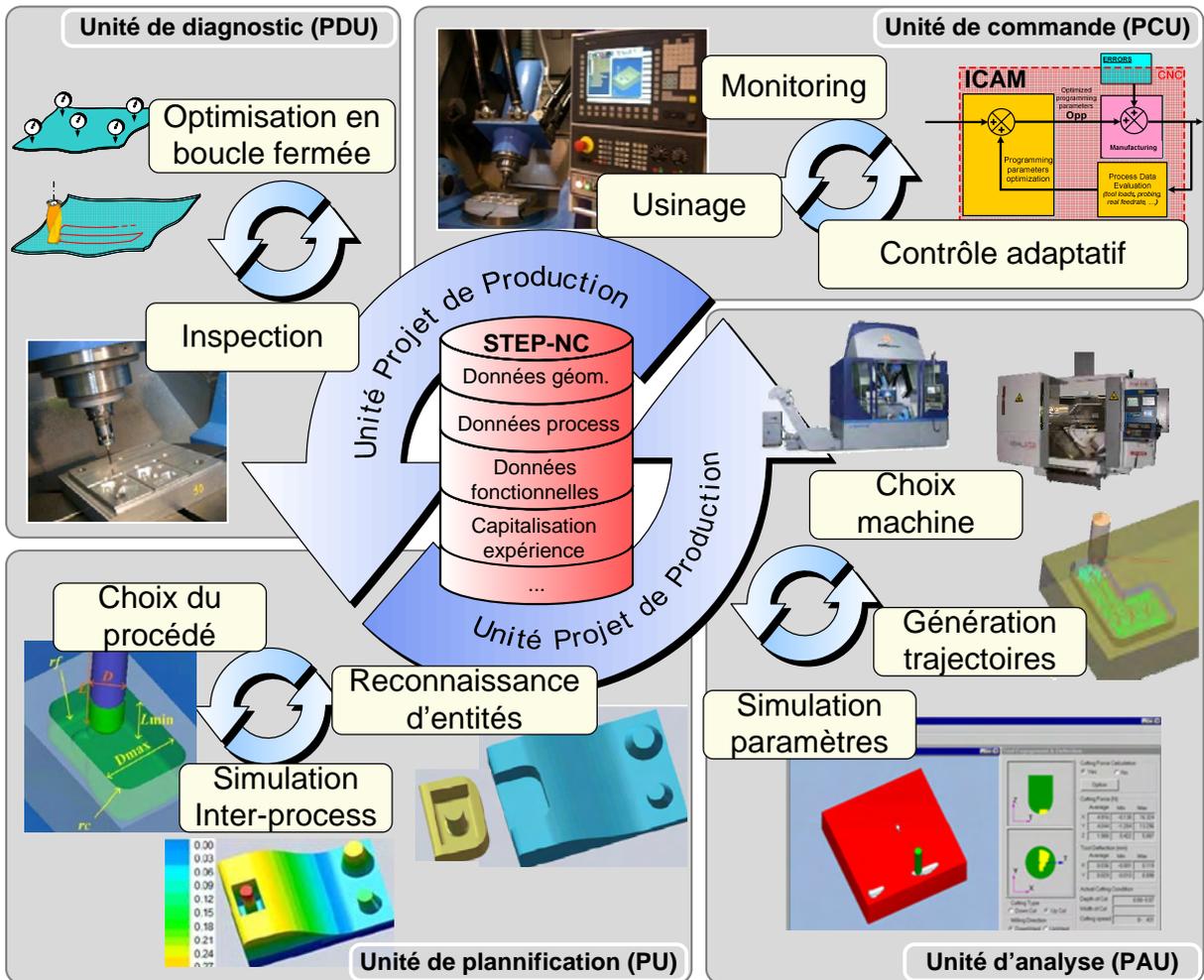


Figure 77 : Intégration modulaire au sein du système de fabrication IRCCyN

L'ensemble des outils de simulation est ainsi intégré au système de fabrication de la manière suivante :

- Unité de planification : intègre l'ensemble des outils d'aide au choix des procédés utilisés, de reconnaissance automatique (logiciel PosSFP coréen enrichi des stratégies à motifs, cf. chapitre 3) ou manuelle des entités de fabrication, et de simulation inter-process (s'appuyant sur les outils de quantification de la complexité de fabrication détaillés au paragraphe précédent).
- Unité d'analyse : intègre les outils d'aide au choix de la machine en lien avec le modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN, les outils de génération (générateur de trajectoires à motifs d'usinage trochoïdal et de tréflage) et d'optimisation (compensation des défauts outils) des trajectoires machine, et de simulation/optimisation des paramètres machine (simulateur UGV prenant en compte le comportement réel de la machine).

- Unité de pilotage : intègre des modules de monitoring et de pilotage de la machine (directement intégrés dans la CN industrielle) ainsi que de contrôle adaptatif (approche ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) permettant la modification en ligne des paramètres et trajectoires en fonction du retour des données machine temps réel).
- Unité de diagnostic : intègre les modules d'optimisation en boucle fermée à partir de palpeurs de mesure embarqués sur la machine. Une application de ces outils a permis de réaliser l'usinage de poches sur des tôles déformées lors de leur maintien en position dans le montage d'usinage. Un palpé de la tôle montée avant usinage permet un morphing des trajectoires pour s'adapter à la géométrie déformée de la pièce. Le débridage de la pièce entraîne son retour élastique en position initiale et les poches usinées sont alors conformes. Cet exemple d'usinage en boucle fermée avec palpeur embarqué sur machine peut tirer davantage de bénéfices de l'utilisation de STEP-NC Inspection mais les développements dans ce domaine n'ont pas été traités dans le cadre de ces travaux de thèse.

L'implémentation de ces outils au sein du système de fabrication demeure à ce jour manuelle mais des possibilités d'automatisation pour une intégration complète peuvent être mises en place. L'objectif est ainsi de permettre une communication multidirectionnelle basée sur l'échange des données STEP-NC entre les modules au sein d'une même unité, et entre les différentes unités (actuellement, la complétion des résultats de simulations se fait de façon manuelle au sein des données STEP-NC). Nous retrouvons ainsi les échanges entre les unités et au sein des unités comme application du pipeline d'échange des données (MIP) au sein du système de fabrication XMIS.

5.6 Discussion et conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre notre conception de l'intégration du contexte multi-process au sein de la chaîne numérique STEP-NC. Pour ceci, nous avons tout d'abord proposé les bases de construction de gammes de fabrication multi-process au sein de la structure des données STEP-NC. Ces travaux ont été l'occasion de la proposition de nouvelles entités combinées intégrant le séquençement d'opérations liées à des procédés différents et ouvrants de nouvelles voies pour l'amélioration de la fabricabilité et de la conformité des pièces obtenues. L'intégration de l'environnement

multi-process au système de fabrication complexifie largement le domaine des solutions pour la production optimale des pièces. Une fois le support des données multi-process STEP-NC présenté, nous nous sommes intéressés aux possibilités offertes concernant la simulation et l'optimisation de ces données. Une modélisation en espaces de simulation a pu être proposée en mettant en avant, en plus des simulations process et multi-process planning largement répandues, la nécessité de simulations inter-process permettant de prendre en compte les relations entre les différents procédés. Nous avons par la suite proposé l'architecture d'implémentation spécifique des outils développés au sein de l'équipe MO2P dans le cadre de leur intégration à la structure modulaire du système étendu de fabrication intégrée XMIS. L'intégration de ces outils d'aide à la décision, de simulation et d'optimisation de la fabrication a pu être mise en œuvre au sein de la plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) pour la supervision du contexte multi-process à l'IRCCyN (Figure 78).

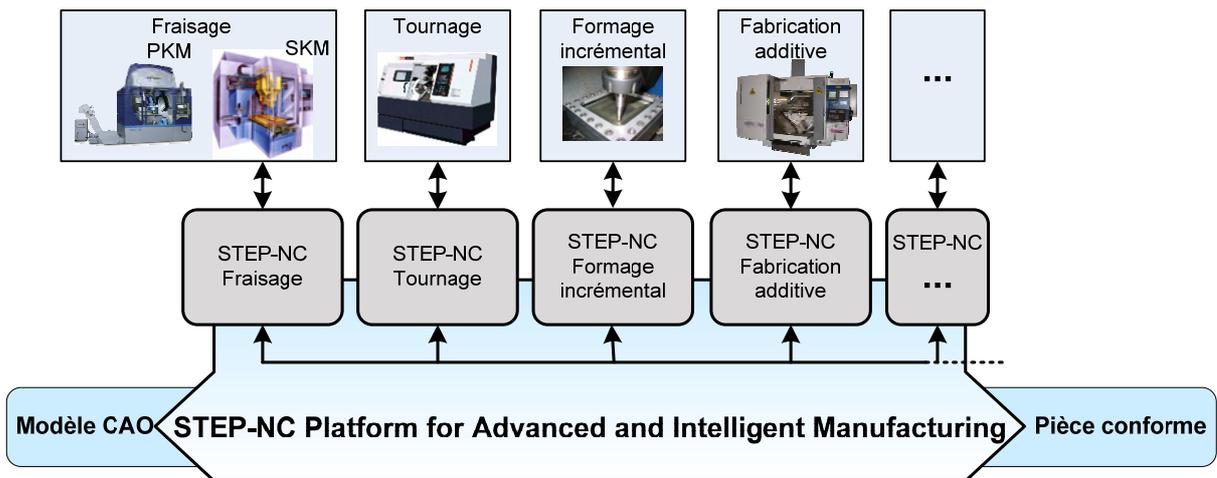


Figure 78 : Plate-forme SPAIM dans un contexte multi-process

Nous détaillons, dans le chapitre suivant, l'architecture de cette plate-forme permettant d'implémenter, de valider et de démontrer les concepts et approches formulés lors de ces travaux sur des moyens industriels.

Chapitre 6. Mise en œuvre dans un environnement multi-process

Les axes de recherche que nous avons présentés au cours des chapitres précédents visent à tirer profit de la programmation basée entités avec l'introduction du système étendu de fabrication intégrée dans un contexte multi-process. Les concepts de CAO étendue, de CN étendue, d'espaces de simulation et de gammes STEP-NC multi-process ont été proposés à travers une vision globale nécessitant une adaptation spécifique aux besoins propres de chaque entreprise. Ils constituent ainsi les concepts de base pour le développement de l'ensemble des outils adaptés à l'intégration de la programmation basée entités au sein de l'environnement de production. Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la mise en œuvre expérimentale ainsi qu'à la validation de ces concepts sur des moyens industriels.

6.1 Problématique

L'émergence de la programmation basée entités associé à un standard STEP-NC récent n'ont pas encore été suivis de développements commerciaux permettant d'offrir l'ensemble des outils pour une mise en œuvre adaptée sur des moyens industriels. Il n'existe peu ou pas, aujourd'hui, de logiciels commerciaux CFAO générant des données STEP-NC ni de DCN industriels permettant d'interpréter ces données. Il existe plusieurs causes et conséquences à cela. La principale cause réside dans le fait qu'il existe un certain flou, du côté des industriels, quant à la manière d'implémenter la chaîne numérique STEP-NC et une interrogation quant au retour sur investissement des coûts de développement liés aux évolutions, aux mutations et aux rétro-fit nécessaires au sein de la chaîne numérique. Quant à la principale conséquence pour nous de ce manque d'outils d'implémentation STEP-NC est qu'il est

nécessaire de tout créer et développer par nous-mêmes pour mettre en œuvre et valider les concepts proposés. La problématique de ce chapitre consiste donc à proposer les bases d'outils permettant d'intégrer la programmation basée entités sur des moyens industriels, dans une optique de validation des concepts proposés mais aussi de démonstrations des apports de la programmation basée entités à partir de moyens industriels. Pour répondre à cette problématique, nous proposons le développement d'une plate-forme permettant l'application des concepts présentés dans cette thèse et servant de base aux futures implémentations et démonstrations sur des moyens industriels.

6.2 Plate-forme d'implémentation SPAIM

Le développement de la plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) est né du projet de réalisation d'un système de production complet pour la programmation basée entités des moyens de fabrication dans un environnement multi-process. Après avoir situé nos travaux par rapport à l'existant, nous présentons le contexte d'implémentation et les principaux moyens à disposition ainsi que la méthode adoptée.

6.2.1 Situation vis-à-vis de l'existant

L'étude de l'existant (§ 2.5.4) a permis de distinguer trois grandes catégories de systèmes : les systèmes conventionnels utilisant STEP-NC (données STEP-NC traitées hors DCN), les contrôleurs interprétant les données STEP-NC et les systèmes STEP-NC avancés, intelligents et collaboratifs. L'ensemble des développements industriels proposés et commercialisés par STEP Tools [STEPTools'10] se situe aujourd'hui dans la première catégorie, avec l'utilisation d'un logiciel, ST-Developer, pour permettre la génération et l'exécution des données STEP-NC AP238 [ISO10303-238'07]. Cette méthode présente l'avantage d'être facilement implantable sur des moyens industriels existants, mais n'offre que peu des possibilités de la programmation basée entités, en particulier quant au retour des informations de la CN vers la CFAO. Dans la catégorie des contrôleurs interprétant les données STEP-NC, les développements menés au sein du projet IMS a permis le développement d'un interpréteur intégré à une CN Siemens 840D [Weck'03] pour la lecture et l'exécution des données STEP-NC. Quelques démonstrations ont été réalisées mais le projet a rapidement pris fin et il n'a pas été donné de suite. Les systèmes avancés, intelligents

et collaboratifs intègrent une grande partie des possibilités de la programmation basée entités. Les développements demeurent cependant universitaires et peu d'applications sur des moyens industriels ont vu le jour. Pour combler les manques actuels d'outils adaptés à la programmation basée entités, il est nécessaire de mettre au point un système complet regroupant les principaux intérêts des systèmes existants et intégrant les nouveaux concepts. Pour ceci, nous nous sommes fixés les objectifs suivants pour le développement de la plate-forme SPAIM :

- Développements en vue de l'implantation sur des moyens industriels.
- Développement d'un contrôleur basé sur une approche de programmation interprétée STEP-NC (utilisation transparente du code G), ce qui permet une implantation rapide sur la plupart des commandes numériques industrielles actuelles tout en limitant les développements à effectuer.
- Intégration au maximum des possibilités de la programmation basée entités avancée et intelligente.
- Travail à partir du modèle de référence de STEP-NC pour pouvoir implémenter et valider nos propositions au sein de l'ISO 14649.

6.2.2 Contexte de l'étude et méthode d'implémentation choisie

Pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre du développement de la plate-forme SPAIM, nous avons effectué certains choix liés à l'environnement d'implémentation disponible au sein de l'IRCCyN ainsi qu'aux moyens et ressources à notre disposition. Nous avons, dans un premier temps, choisi de mettre en œuvre une programmation STEP-NC interprétée (cf. §3.2.2 détaillant les différents types de programmation interprétée, intégrée et avancée au sein de la CN étendue). Ce choix permet de développer des modules supplémentaires permettant l'interprétation des données STEP-NC et de les intégrer directement aux moyens de commandes numériques industriels actuels sans avoir à effectuer des modifications profondes de ceux-ci. L'implémentation est ainsi plus rapide et limite les investissements en termes de développement qui peuvent s'avérer rapidement lourds (rétro-fit des CN, etc.). Cette méthode comporte des limitations, en particulier à cause de l'utilisation transparente du code G au sein de la CN étendue, et ne permet pas d'exploiter aisément l'ensemble des avantages de la programmation STEP-NC mais demeure suffisant, dans un premier temps, pour valider les principaux concepts et démontrer les principes initiaux. Le point de vue que nous adoptons privilégie l'utilisation des outils communément employés dans le milieu industriel (génération des trajectoires,

vérification des collisions, etc.) si cela est possible pour ne pas développer inutilement des outils déjà existants, bénéficier de leur robustesse et montrer notre conception de leur intégration possible dans la CN étendue.

Nous détaillons dans la suite les développements réalisés présentés en deux phases. La première phase s'intéresse spécifiquement au cas du fraisage. Au cours de la seconde phase, l'extension des possibilités de la plate-forme pour la réalisation de pièces par frittage laser de poudre a pu être réalisée et permet l'intégration à la plate-forme du contexte multi-process.

6.3 Interface CN étendue : cas du fraisage [Laguionie'09b]

La plate-forme SPAIM est un outil de démonstration mais aussi d'implémentation des travaux de recherche sur le standard STEP-NC. Elle rassemble un ensemble d'outils pour la programmation basée entités des moyens de production, du modèle jusqu'à la pièce réalisée conforme. Parmi ceux-ci, l'interface CN étendue permet l'interprétation et l'exécution des données STEP-NC sur les moyens de production. Nous détaillons dans cette partie les bases de l'architecture de la CN étendue SPAIM ainsi que des cas d'application pour le fraisage.

6.3.1 Présentation de la plate-forme SPAIM

La plate-forme SPAIM est constituée de l'ensemble des outils intégrés à la chaîne numérique STEP-NC de fabrication de l'IRCCyN. L'objectif à terme est de pouvoir mettre en œuvre, dans un environnement de programmation basée entités, l'ensemble du système de fabrication XMIS présenté au chapitre 4. Celui-ci peut être décomposé en deux principaux sous-systèmes complémentaires : la CAO étendue (XCAD) et la CN étendue (XCNC). Nous focalisons dans cette partie sur le développement de l'application de CN étendue qui a pu être réalisée au sein de la plate-forme SPAIM. Celle-ci reprend les principes de base de la programmation STEP-NC interprétée. Elle peut être implémentée sur la plupart des DCN industriels actuels. Elle fonctionne actuellement sur une machine à structure parallèle Fatronik Verne équipée d'un DCN Siemens 840D (Figure 79). Une autre version est en cours d'implémentation sur un centre d'usinage sériel Hermle C30U équipé d'un DCN Heidenhain.



Figure 79 : CN étendue de la plate-forme SPAIM implémentée à l'IRCCyN

6.3.2 Architecture de la plate-forme

Nous présentons dans la suite l'architecture de la CN étendue au sein de la plate-forme SPAIM. Celle-ci a pour objectif de traiter de manière autonome les données STEP-NC d'entrée pour pouvoir exécuter la production de la pièce avec un retour possible des modifications en direction de la CAO étendue.

6.3.2.1 Vue générale

La CN étendue SPAIM est composée d'une interface homme-machine ainsi que de plusieurs modules permettant le traitement des données STEP-NC en une gamme d'opérations associées à des trajectoires outils pour chaque opération (Figure 80). Le module maître est directement implanté dans la CN industrielle. Il permet de relayer les choix de l'opérateur effectués par l'intermédiaire de l'interface homme-machine et commande un module d'exécution située sur un PC distant en réseau. Ces deux modules sont comparables à un client et un serveur exécutant les requêtes. Cette architecture permet de pouvoir étendre les capacités de calcul de la CN industrielle. En effet, l'ensemble des modules nécessitant beaucoup de ressources de calcul (module de génération de trajectoires, vérification des collisions, simulation, etc.) sont exécutés sur le PC distant dont la puissance est adaptée au traitement de ces tâches. Ceci demeure totalement transparent d'un point de vue utilisateur. Ainsi, sur ordre du module maître, le module d'exécution lit et analyse les données STEP-NC. Il est ensuite en mesure de construire l'arborescence des données STEP-NC de géométrie et de fabrication. À partir de ces données analysées, il pilote les modules de simulation et en particulier le module de génération des trajectoires.

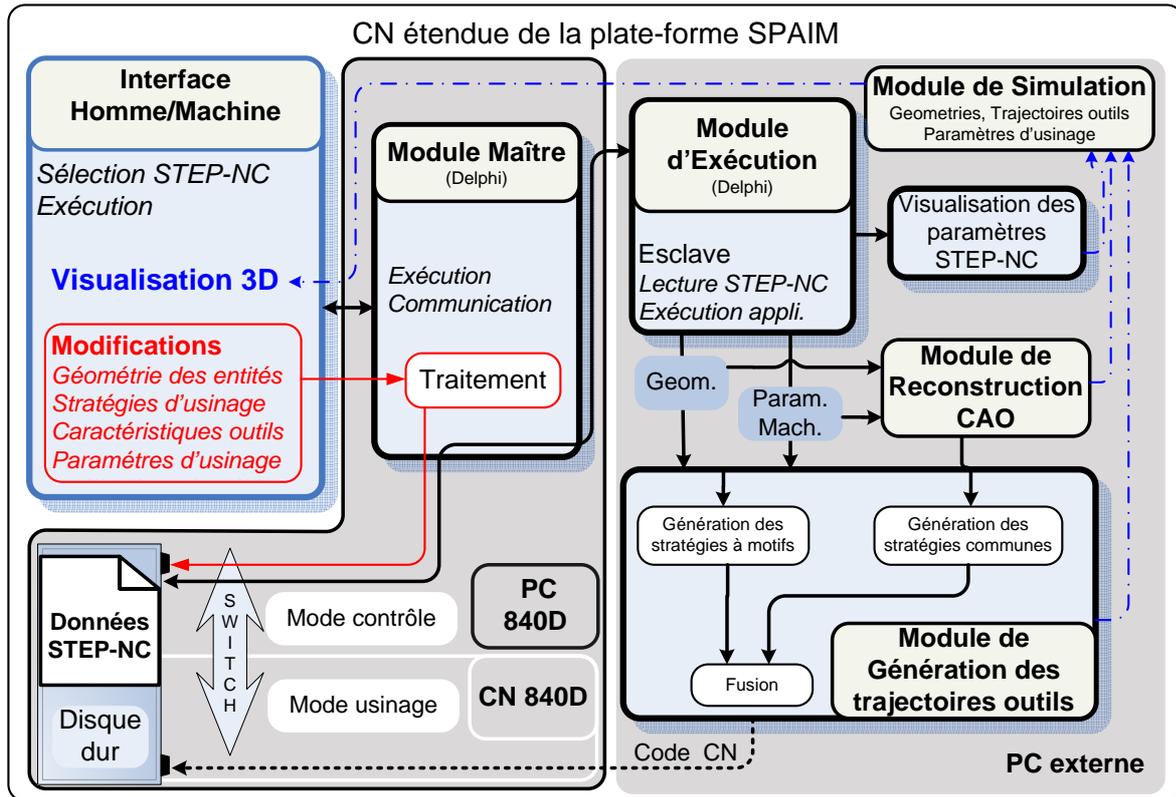


Figure 80 : Architecture de la CN étendue SPAIM

La programmation de ces modules a été réalisée en Delphi et compilée sous forme d'exécutables. Leur installation est possible sur toutes les versions récentes de Windows, que ce soit au sein du PC de la CN ou sur n'importe quel type de PC de bureau.

6.3.2.2 Interface homme-machine (IHM)

Cette interface est le lien entre l'utilisateur et les modules de la CN étendue. L'interface homme-machine est accessible par le clavier et sur l'écran du DCN qui affiche une visualisation 3D issus de l'analyse des données STEP-NC et des différentes simulations (entités géométriques CAO, trajectoires outils, outils de coupe, etc.). Les données STEP-NC analysées sont représentées sous forme d'arborescence (Figure 81). À chaque étape, l'utilisateur supervise entièrement le déroulement des opérations et peut modifier l'ensemble des paramètres directement au sein de l'arborescence des données STEP-NC. Avant chaque usinage, une visualisation et validation des trajectoires outils par l'utilisateur est nécessaire. La détection automatique des collisions est rendue possible dans la majorité des cas par l'utilisation de la suite CFAO Delcam pour la génération des trajectoires usuelles.

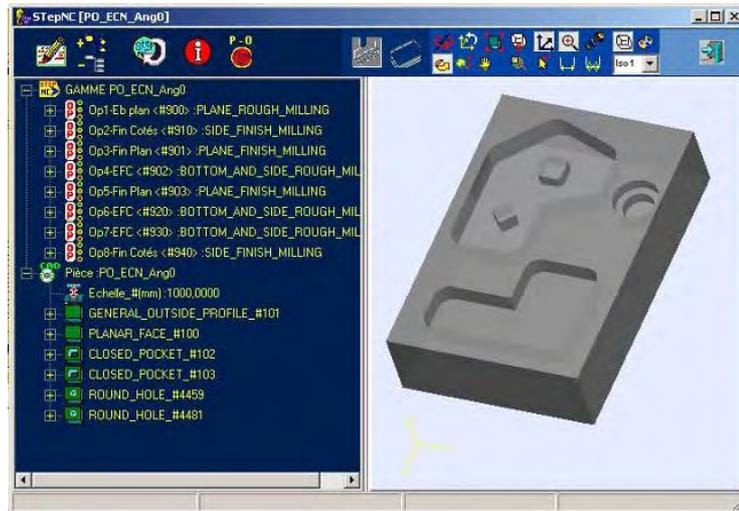


Figure 81 : Interface homme-machine de la CN étendue SPAIM et arborescence des données STEP-NC

6.3.2.3 Module de génération des trajectoires

Les trajectoires outils sont générées sur le PC distant. Elles sont ensuite stockées dans une base de données sous forme de langage CN (code G dans notre cas). Après visualisation et validation par l'utilisateur, elles sont directement exécutées sur la machine par commande du module maître (Figure 82).

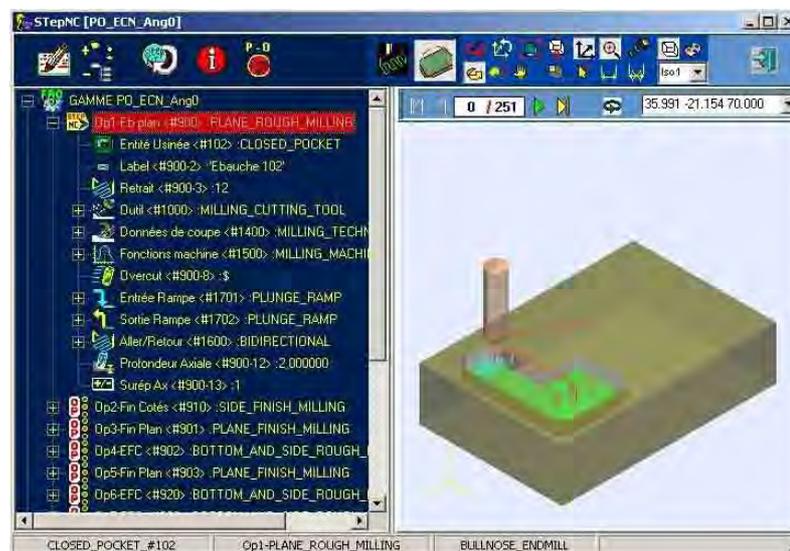


Figure 82 : Visualisation des trajectoires outils

Le module de génération des trajectoires est scindé en deux composants. Le premier permet de traiter l'ensemble des stratégies « communes » du standard ISO 14649 (zigzag, unidirectionnel, contour parallèle, etc.). Ce composant permet de piloter

automatiquement le module de génération de trajectoires du logiciel Delcam PowerMILL [PowerMILL] à partir de l'analyse des données STEP-NC. Ce pilotage est effectué à partir de requêtes automatiques exécutées dans l'éditeur de commande Delcam. Dans un premier temps, le module de reconstruction CAO permet de construire la géométrie de la pièce dans le logiciel Delcam PowerSHAPE [PowerSHAPE] à partir de la description des entités STEP-NC. Le modèle CAO est ensuite exporté vers PowerMILL et les commandes associées aux opérations de fabrication issues des données STEP-NC sont alors exécutées pour la génération des trajectoires.

Le module de reconstruction CAO est aussi utilisé pour la visualisation 3D de la pièce dans l'interface homme-machine. Un fichier VRML (Virtual Reality Markup Language) est exporté à partir de PowerSHAPE en direction de l'IHM qui peut alors le lire grâce à un éditeur approprié (dans notre cas Miriad 3D [Miriad]).

Le second composant du module de génération des trajectoires permet de traiter les stratégies à motifs dans le cas de l'usinage trochoïdal et du tréflage. Il s'appuie sur les outils présentés au §3.4. Ces outils permettent la génération de trajectoires complexes d'usinage trochoïdal et de tréflage à partir d'un nombre réduit d'attributs permettant la description d'une courbe guide sur laquelle un motif est répété. Ils s'appuient sur des outils Matlab permettant de générer les trajectoires à partir des données issues de la proposition syntaxique d'intégration de stratégies à motifs dans le standard STEP-NC effectuée. Après visualisation et validation par l'utilisateur, le code CN est compilé. Au sein de la gamme de fabrication, les programmes CN (code G) associés aux opérations à stratégies « communes » et à stratégies à motifs sont ensuite fusionnés pour être exécutés sur la machine. Cette étape demeure totalement transparente pour l'utilisateur.

6.3.2.4 Outils et modèle fonctionnel de la machine

Les normes STEP-NC permettent d'insérer des informations concernant les outils (ISO 14649 Part111). Il est en effet possible de décrire l'outil (rayon et nature nécessaires pour la génération des trajectoires par exemple) mais aussi l'ensemble des composants du porte outil (Figure 83). À partir de cette description, le module de reconstruction CAO est capable de générer l'outil pour la visualisation dans l'IHM ainsi que, au sein du logiciel PowerMILL, pour la vérification des collisions. Lorsqu'un

outil n'est pas disponible, le choix d'un nouvel outil peut être rapidement pris en compte par modification dans l'arborescence des données STEP-NC au sein de l'IHM. Les trajectoires outils sont alors automatiquement régénérées et directement exécutables par la machine après validation par l'utilisateur.

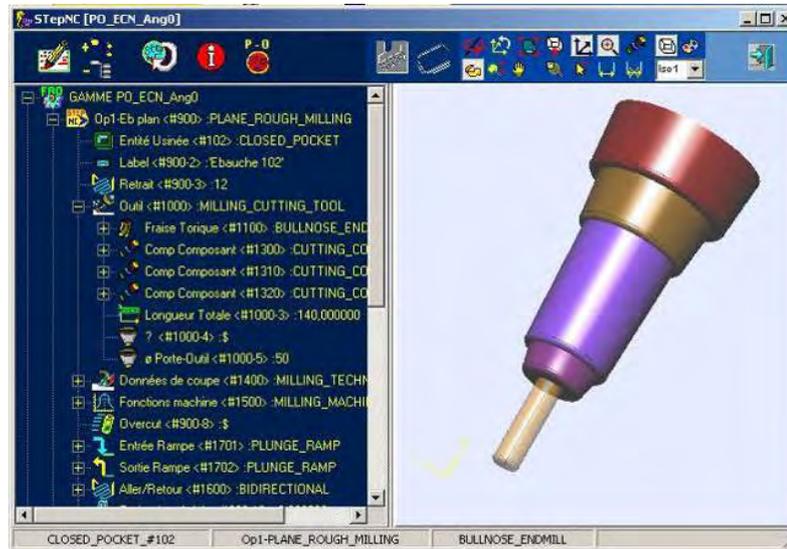


Figure 83 : Description des outils au sein de la CN étendue SPAIM

Outre la génération des trajectoires, l'ensemble des simulations et optimisations effectuées au sein de la CN étendue nécessitent des informations particulières concernant les outils mais aussi les machines outils. Pour ceci, le modèle fonctionnel des MOCN proposé par le standard STEP-NC regroupe l'ensemble des données spécifiques à l'utilisation d'une machine particulière. Celui-ci est en cours de normalisation comme nous avons pu le voir au §3.5 et permettra, au sein de la CN étendue SPAIM, une automatisation de la mise en œuvre de l'ensemble des modules de simulation, quelque soit le choix de la machine-outil. Réciproquement, un ensemble de simulations pourra être mené en vue du choix de la machine-outil la mieux adaptée pour la réalisation de certaines opérations. Dans l'état actuel de la plate-forme SPAIM, les liens avec le modèle fonctionnel des MOCN et les différents modules de simulation ne sont pas encore automatisés et les informations machine sont complétées manuellement.

6.3.3 Simulation et optimisation « process » pour le fraisage

Dans le cadre des développements spécifiques liés au fraisage, nous avons pu mettre en place plusieurs outils de simulation et d'optimisation process au sein de la CN

étendue. L'ensemble de la chaîne numérique ainsi réalisée peut-être exécutée directement au niveau atelier par l'interface homme-machine de la CN étendue SPAIM. L'objectif est ici de pouvoir utiliser l'ensemble des outils disponibles à partir des données STEP-NC et ainsi, montrer que celles-ci sont adaptées ou les éventuels manques et améliorations possibles (Figure 84).

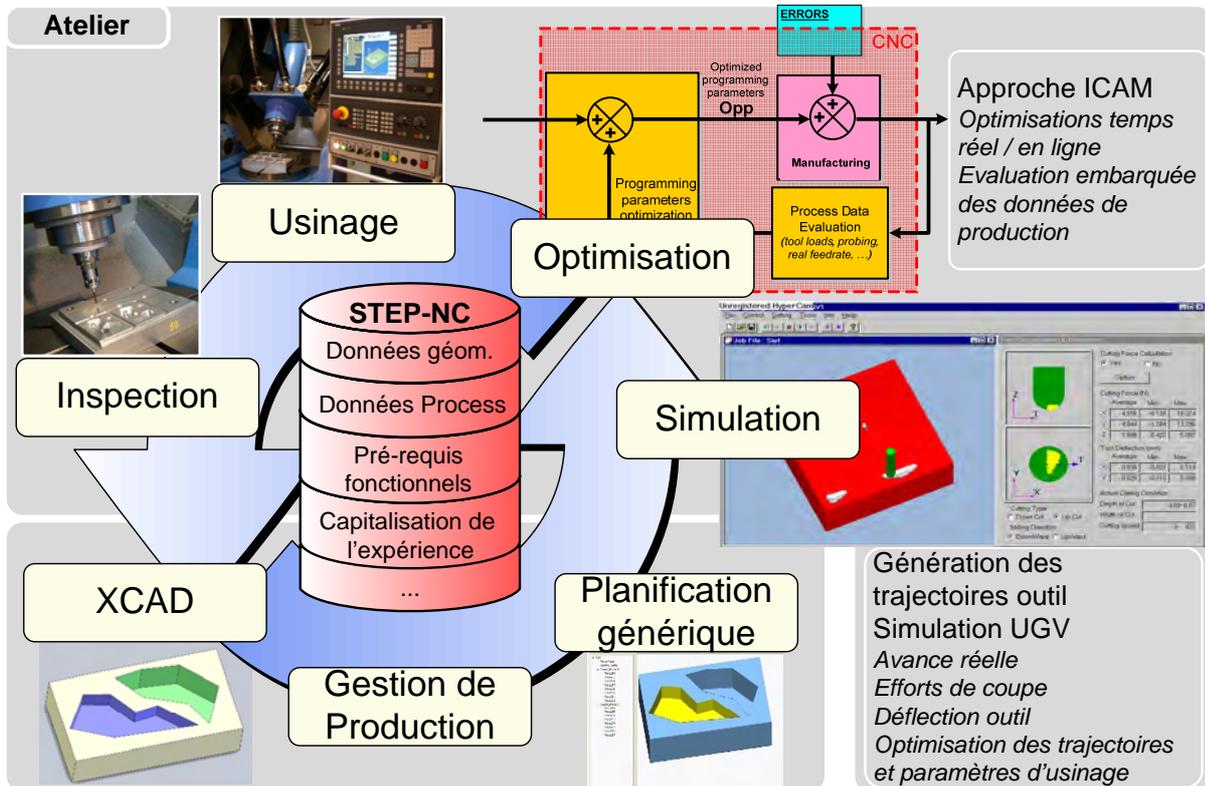


Figure 84 : Intégration des modules de simulation et optimisation dans la chaîne numérique SPAIM

Pour la partie fraisage, le système de CAO étendue (XCAD) regroupe l'ensemble des outils permettant de traiter les données de géométrie CAO et de générer les données STEP-NC génériques. Cette étape est actuellement traitée à partir du logiciel de base coréenne PosSFP dans sa version modifiée permettant la sélection de stratégies d'usinage à motifs. Ce logiciel permet, à partir du modèle CAO, la reconnaissance automatique ou manuelle des entités d'usinage. Il est ensuite possible d'organiser la gamme de fabrication allant jusqu'à la spécification des stratégies d'usinage. Ces choix demeurent génériques dans la mesure où aucune machine outil spécifique n'est encore sélectionnée. Ces données sont ensuite traitées par la CN étendue SPAIM. Un certain nombre d'outils présentés précédemment (analyse des données STEP-NC, génération

et simulations des trajectoires outils pour les stratégies communes, etc.) ont pu être entièrement automatisés et sont directement exécutables à partir de l'interface homme-machine. Ceux-ci sont pilotés à partir des données STEP-NC. Nous utilisons, pour le moment de façon manuelle, un simulateur de trajectoires UGV [Dugas'02] ainsi que l'approche ICAM (Intelligent Computer Aided Manufacturing) [Rauch'07]. Ces modules de simulation et d'optimisation nécessitent un ensemble de données concernant la machine (modèle géométrique inverse de la machine, caractéristiques cinématiques et dynamiques, propriétés de la CN, etc.) qui sont accessibles à partir des données STEP-NC du modèle fonctionnel des MOCN, et valident notre proposition du §3.5. Suite à ces simulations et aux éventuelles phases d'inspection permettant la validation de la conformité des pièces, les données de haut niveau (sous forme STEP-NC comme par exemple les stratégies d'usinage) ainsi que les données de plus bas niveaux (sous forme de code G comme par exemple pour la programmation de l'avance réelle) sont modifiées. La base de données STEP-NC contient alors une couche de données génériques ainsi qu'une couche de données STEP-NC optimisées pour une machine (cf. §4.3.2). L'ensemble des modifications effectuées dans la CN étendue se fait au sein des données STEP-NC et peut être utilisé en amont dans la CAO étendue. Ce feed-back de l'information est un point important du système permettant une capitalisation de l'expérience, une diminution des temps de mise en production, une amélioration de la gestion de production et une convergence plus rapide vers l'élaboration d'une gamme de fabrication optimisée.

6.3.4 Pièces tests

Nous avons conçu et mis en œuvre la fabrication de plusieurs pièces test dans le but de montrer les capacités du système proposé, de mettre en avant les bénéfices d'une telle approche, et de pouvoir avoir un retour quant aux éventuelles améliorations concernant le système et le standard. Nous présentons dans la suite les pièces test réalisées. La première est une pièce 2D $\frac{1}{2}$ entièrement décrite dans le standard STEP-NC et ne comportant ainsi que des entités de fabrication issue de la norme ISO 10303 AP224. La seconde pièce test est issue de l'industrie aéronautique. Elle comporte les entités de fabrication complexes difficilement descriptibles par l'intermédiaire de l'AP224.

6.3.4.1 Pièce 2D½

La première pièce d'expérimentation développée est entièrement décrite à partir des données STEP-NC. Elle est composée des entités suivantes : poche quelconque avec rayons de congés, poche quelconque intégrant deux îlots et trou lamé (Figure 85).

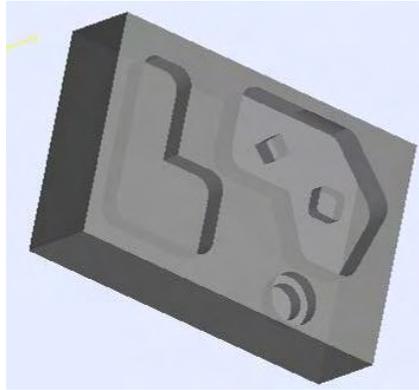


Figure 85 : Pièce test 2D½ entièrement décrite à partir des données STEP-NC

Cette première pièce test a permis de valider le fonctionnement de la plate-forme SPAIM. À partir du modèle CAO de la pièce, les données STEP-NC sont générées avec le logiciel coréen PosSFP. Elles sont ensuite envoyées à la CN étendue SPAIM qui permet de traiter automatiquement l'ensemble des opérations (Figure 86).

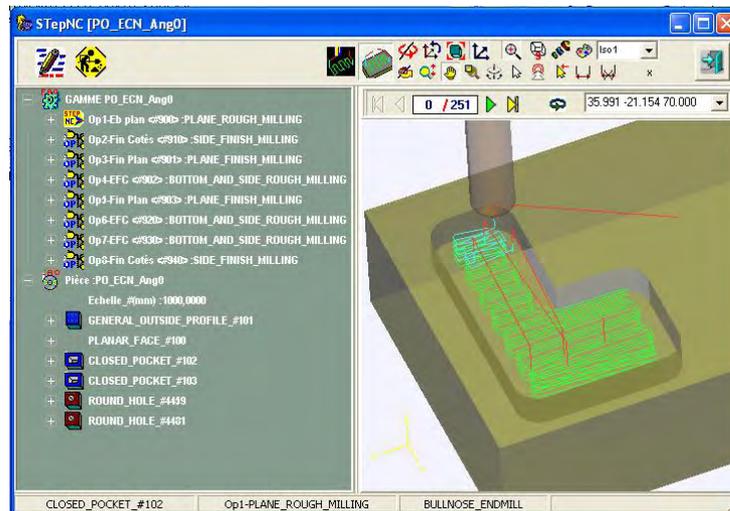


Figure 86 : Pièce test 2D½ traitée au sein de la CN étendue SPAIM

Différents essais ont pu être réalisés en modifiant les paramètres de fabrication et géométries d'entités, directement avec l'interface homme-machine. L'exemple traité permet de montrer la réalisation de la pièce initiale puis la pièce modifiée par rotation

de l'entité poche (Figure 87). Celle-ci a été réalisée en modifiant le repère « setup » lié à la description de l'entité poche au sein de l'arborescence des données STEP-NC. La génération des nouvelles trajectoires outils a été réalisée automatiquement au sein de la CN étendue et l'exécution sur la machine a pu être lancée après vérification des collisions et validations de l'opérateur. Le feed-back de cette modification de la géométrie de la pièce en direction du système de CAO est alors rendu possible par l'intermédiaire des données STEP-NC de haut niveau modifiées.

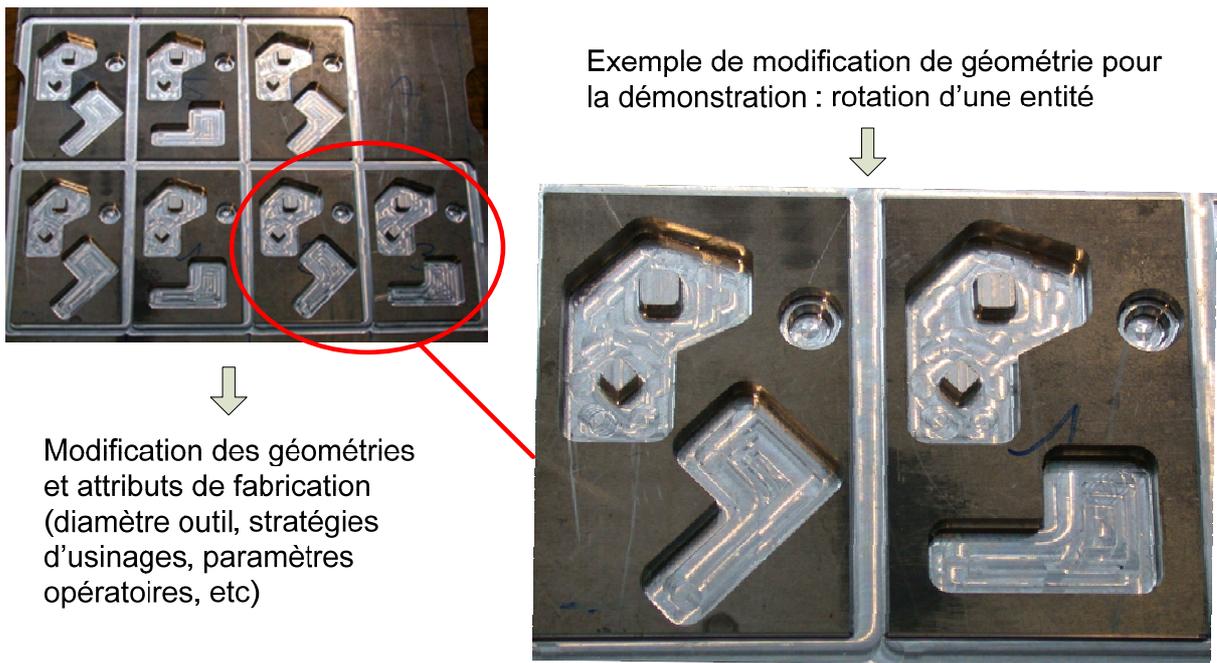


Figure 87 : Exemple de modifications au sein de la CN étendue

Cet exemple de modification de la géométrie de la pièce a avant tout une dimension démonstrative de notre point de vue de la CN étendue. Il demeure assez rare de vouloir modifier directement la géométrie de la pièce au pied de la machine, en particulier par rotation d'une entité. Des situations plus communes peuvent cependant mener à réaliser certains changements assez tardivement au cours de la phase de mise en production comme par exemple la modification des dimensions d'un trou lamé pour accueillir un type différent de vis, la modification de surfaces non fonctionnelles pour faciliter la production (rayons de congés adaptés aux rayons d'outils disponibles, etc.), ou la modification de la géométrie dans le cas de projets similaires nécessitant des changements simples (changements de facteurs d'échelle entre deux pièces, etc.). Ces possibilités aussi sont directement intégrées au sein de la CN étendue SPAIM (Figure 88).

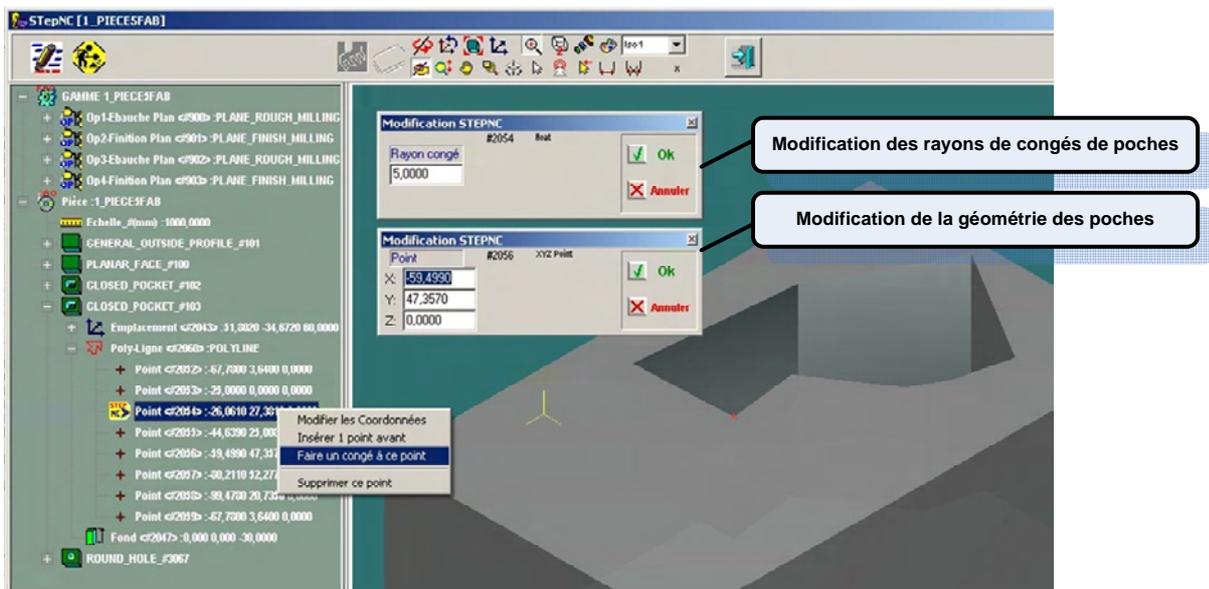


Figure 88 : Modification de la géométrie des entités au sein de l'arborescence des données STEP-NC

De manière générale, ce sont plus souvent les attributs de fabrication (rayons d'outils disponibles, stratégies d'usinage, paramètres de coupe, etc.) qui sont susceptibles d'être modifiés par l'opérateur ou suite aux différentes simulations au sein de la CN étendue. Il est alors possible d'avoir, de la même manière que pour les informations de géométrie, un retour des données modifiées en direction de la CAO étendue pour la planification de la production, la gestion des stocks, la simulation et optimisation de la production, etc.

Il peut aussi s'avérer utile de pouvoir créer des entités d'usinage directement au pied de la machine. C'est le cas en particulier, pour des pièces unitaires ou petites séries, avec la fixation du brut et la réalisation du montage d'usinage (création de trous lamés et de trous taraudés, etc.). Ces fonctionnalités se retrouvent dans les interfaces conversationnelles machine industrielles pour des entités simples. Elles ont l'avantage ici de pouvoir être totalement intégrées à la gamme de fabrication à partir de l'IHM (Figure 89). Suite à leur création, elles sont intégrées aux données STEP-NC et permettent un retour en direction de la CAO étendue.

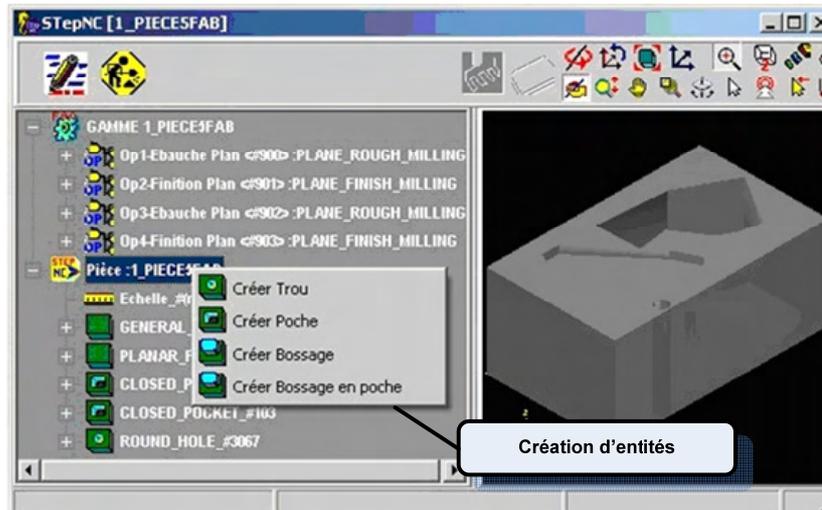


Figure 89 : Création d'entités à partir de l'interface SPALM

La réalisation de la première pièce test a permis la mise en œuvre et l'exécution de la production à partir des données STEP-NC. Nous avons pu montrer les possibilités de l'approche quant aux modifications réalisées au sein de la CN étendue, tant au niveau de la géométrie des entités que des paramètres et attributs de fabrication. Par l'intermédiaire de la modification directe des données STEP-NC dans la CN étendue, le feed-back de l'information en direction des couches supérieures de simulation, d'optimisation et de CAO étendue est rendu possible, permettant ainsi un flux multidirectionnel des données entre l'ensemble des modules de la chaîne numérique STEP-NC. Les démonstrations demeurent cependant encore restreintes par l'utilisation de la norme ISO 10303 AP224 pour la description des entités de fabrication. Celles-ci sont ainsi limitées à des entités de fabrication simple telles que poches, bossages, trous, lamages, etc. Les entités de fabrication comportant des formes complexes sont difficilement descriptibles en AP224 et la syntaxe à ce sujet demeure relativement ambiguë et mal appropriée dans l'état actuel de la normalisation. Ainsi, les pièces que nous sommes en mesure de traiter aujourd'hui avec STEP-NC demeurent des pièces de formes simples comme dans l'exemple traité. La pertinence des démonstrations par rapport aux attentes industrielles est ainsi difficile à satisfaire dans l'état actuel des possibilités de description des entités AP224. Pour palier ce manque concernant la description des entités STEP-NC de formes complexes, nous avons étendu les possibilités de la plate-forme SPALM pour pouvoir traiter des pièces de formes complexes. Pour ceci, nous nous proposons de traiter une pièce issue de l'industrie aéronautique.

6.3.4.2 Pièce aéronautique

La pièce sur laquelle nous nous appuyerons dans cet exemple est une pièce nommée « tête de poisson » (« Fish-head » en anglais), conçue par Airbus pour la recherche concernant les applications STEP-NC [Mokhtar'08]. Cette pièce contient les entités communément retrouvées dans une pièce aéronautique : poches multiples, parois minces, flans profilés de formes complexes, contre-dépouilles, etc. (Figure 90). Le modèle CAO de cette pièce est disponible sous forme STEP AP203 sur le site de STEP Tools [STEPTools'10].



Figure 90 : Pièce aéronautique développée pour la recherche STEP-NC

L'usinage de cette pièce peut être réalisé à partir d'un brut parallélépipédique avec des opérations d'ébauche et de finition. Les opérations d'ébauche peuvent être réalisées en usinage 3 axes, alors que les finitions requièrent l'usinage de formes complexes 5 axes (en réalité 4 axes pourraient suffire dans le cas d'un posage judicieux). Comme indiqué par la Figure 91, nous proposons la décomposition en entités de fabrication pour l'ébauche de la pièce.

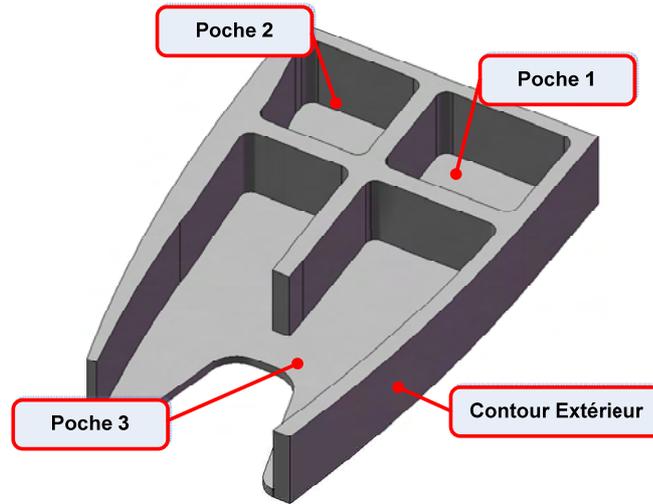


Figure 91 : Choix des entités d'ébauche pour la programmation STEP-NC

La description de la pièce en entités de fabrication AP224 est donc aisée dans le cas des entités d'ébauche et difficile pour les entités de finition dans l'état actuel de la normalisation AP224. Nous proposons donc, pour combler ce manque, d'étendre les possibilités de la plate-forme SPAIM en permettant d'intégrer à la gamme de fabrication décrite par les données STEP-NC, des opérations externes directement réalisées à partir d'un logiciel de CFAO (ici Delcam). Pour ceci, il est ainsi possible de programmer l'inclusion d'opérations de fabrication traitées manuellement hors processus de traitement des données STEP-NC. Ces opérations sont destinées à permettre l'usinage en finition des entités de formes complexes 5 axes. La gamme d'usinage de la pièce est donc décomposée de la manière suivante (Figure 92) :

- 1 - Usinage du dessus des nervures : dans la mesure où les nervures ont une épaisseur faible, nous privilégions l'usinage de leur face supérieure dans la masse pour éviter les phénomènes de vibrations et de broutement. Cette opération est réalisée avant l'ébauche des différentes poches.
- 2 - Ebauche des poches 1, 2 et 3 : le vidage des poches est une opération 2,5 axes programmée à partir des données STEP-NC. Les entités poches traitées sont entièrement définies à partir de contour fermé composé d'éléments filaires simples (segments, arcs de cercles, congés, etc.) extrudés suivant la direction principale (ils sont en cela simplement descriptibles à partir des entités de fabrication de la norme AP 224).
- 3 - Finition de l'intérieur : la finition de l'intérieur de la pièce nécessite la description d'entités complexes et est réalisée par programmation conventionnelle,

c'est-à-dire en incluant au sein de la gamme de fabrication une opération manuelle réalisée sous Delcam.

- 4 - Contournage extérieur ébauche : l'ébauche du contournage extérieur peut être décrite sous forme d'une opération STEP-NC. Une finition programmée manuellement est par la suite nécessaire. Le montage d'usinage initial consiste à fixer le brut par l'intermédiaire de trois vis dans un support d'aluminium martyr. Avant de débiter la pièce (quatrième phase), il est nécessaire de la maintenir en position. Nous avons opté pour l'implantation d'une vis munie d'une rondelle serrée à l'intérieur du trou de la pièce ainsi que l'utilisation de sauterelles de maintien en position.

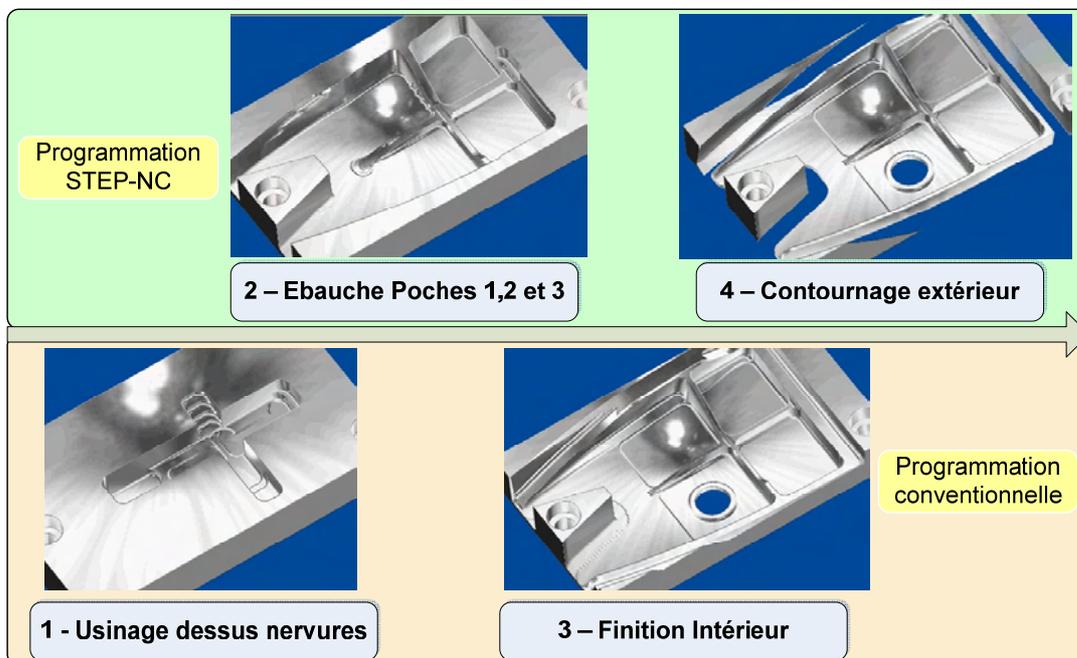


Figure 92 : Principales étapes de l'usinage de la pièce aéronautique

Intégration au sein de la plate-forme SPAIM :

Les données STEP-NC de la pièce ébauchée ont été générées à partir du modèle CAO de celle-ci avec l'utilisation du logiciel PosSFP. Elles ont ensuite pu être traitées au sein de la CN étendue pour la génération des trajectoires associées à l'ébauche des trois poches et au contournage extérieur. Nous avons ensuite rajouté directement au sein de la gamme de fabrication les opérations intermédiaires programmées conventionnellement à partir de la suite Delcam. La gamme complète est ainsi exécutable directement à partir de l'IHM de la CN étendue SPAIM (Figure 93).

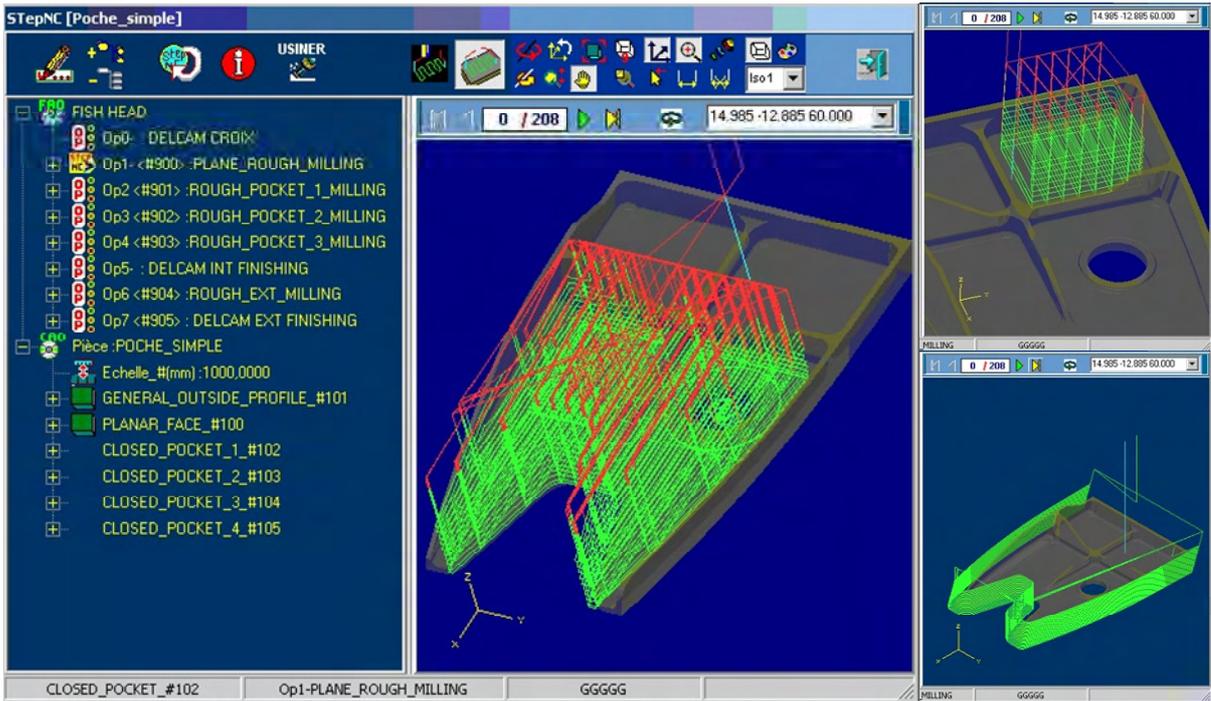


Figure 93 : Génération des trajectoires à partir des données STEP-NC

Ainsi, l'ensemble des opérations programmées à partir des données STEP-NC sont manipulables et modifiables directement au pied de la machine, tandis que les opérations de finition nécessitent la mise en œuvre de la chaîne numérique CFAO-CN traditionnelle.

Simulations et optimisations :

L'intégration de simulation et d'optimisation des trajectoires et des conditions de coupe a été réalisée par la mise en œuvre d'un simulateur UGV [Dugas'02]. Celui-ci permet, à partir des trajectoires générées, de simuler le comportement réel de la machine associée à sa CN et de donner une image réaliste de l'avance réelle aux différentes positions de l'outil. Celle-ci diffère souvent de l'avance programmée, entraînant l'augmentation des erreurs de poursuite. Il peut donc être bénéfique de programmer directement l'avance réelle, qui dépend des capacités de la machine choisie. Un premier type d'optimisation est ainsi réalisé en modifiant les paramètres de coupe suite à leur génération au sein du module de génération de trajectoires. Cette étape, actuellement encore réalisées manuellement au sein de la CN étendue SPAIM, peut-être automatisée et devenir transparente pour l'utilisateur. Cette « option » d'optimisation n'agit pas directement sur les données STEP-NC mais participe à leur traitement au sein de la CN étendue. Elle peut aussi être utilisée pour

l'aide au choix de la machine la plus appropriée pour l'usinage d'une pièce ou d'une entité de fabrication. D'autres options au sein de ce simulateur offrent la possibilité d'anticiper la déflexion outil par le calcul des efforts de coupe réels (liés à l'avance réelle). Des compensations de trajectoires ou diminutions des conditions de coupe permettent alors une optimisation en vue de l'usinage d'une pièce conforme. L'ensemble de ces fonctionnalités a pu être testé dans le cas de l'usinage de la pièce aéronautique et ont permis l'optimisation des programmes CN (Figure 94).

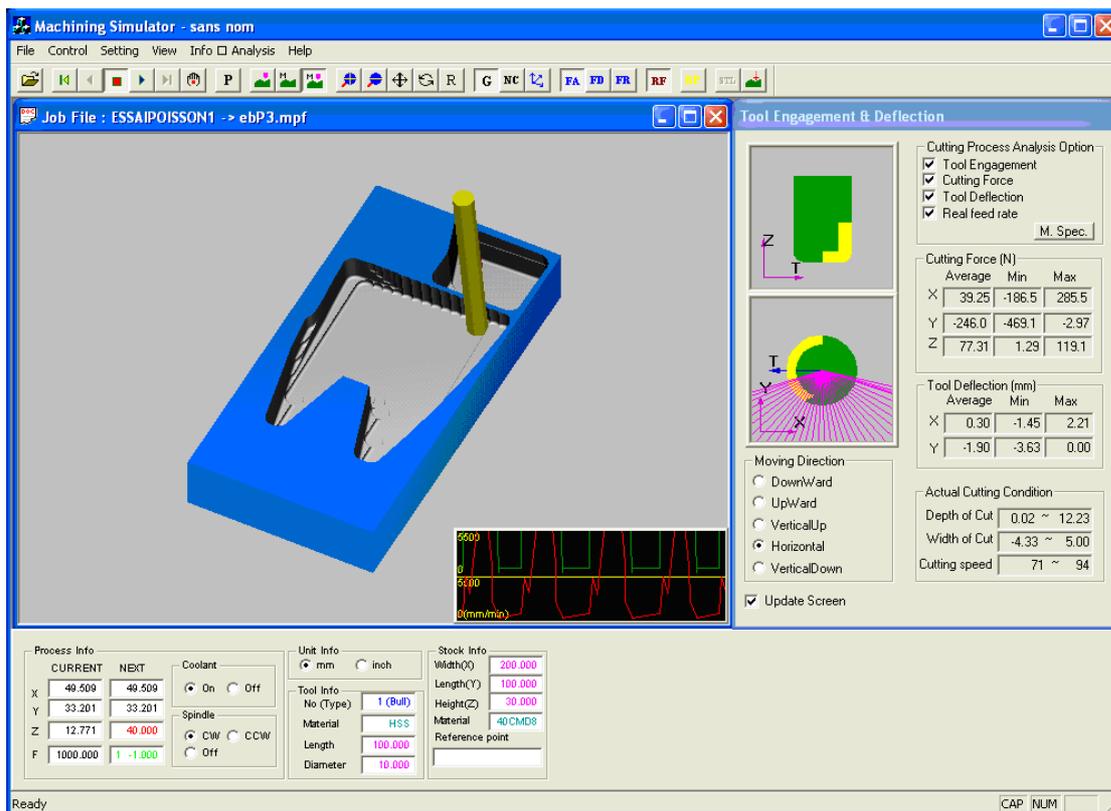


Figure 94 : Simulation du comportement réel de la machine

Ce module de simulation des trajectoires vient en complément du module de génération des trajectoires. L'architecture proposée pour l'implémentation et l'automatisation de celui-ci au sein de la CN étendue est schématisée Figure 95. À partir de l'analyse des données STEP-NC génériques et ainsi de l'extraction de la géométrie des entités et des tolérances associées, les fonctionnalités du simulateur UGV peuvent être employées pour le choix de la machine adaptée à la réalisation conforme des entités de fabrication. Ce choix peut avoir lieu grâce à l'intégration du modèle fonctionnel des MOCN disponibles. Une fois le choix de la machine effectué, la simulation des stratégies et des paramètres opératoires adaptés en collaboration

avec le module de génération des trajectoires mènent à la sélection des données STEP-NC optimisées pour la machine (choix des stratégies d'usinage, des conditions de coupe, etc.).

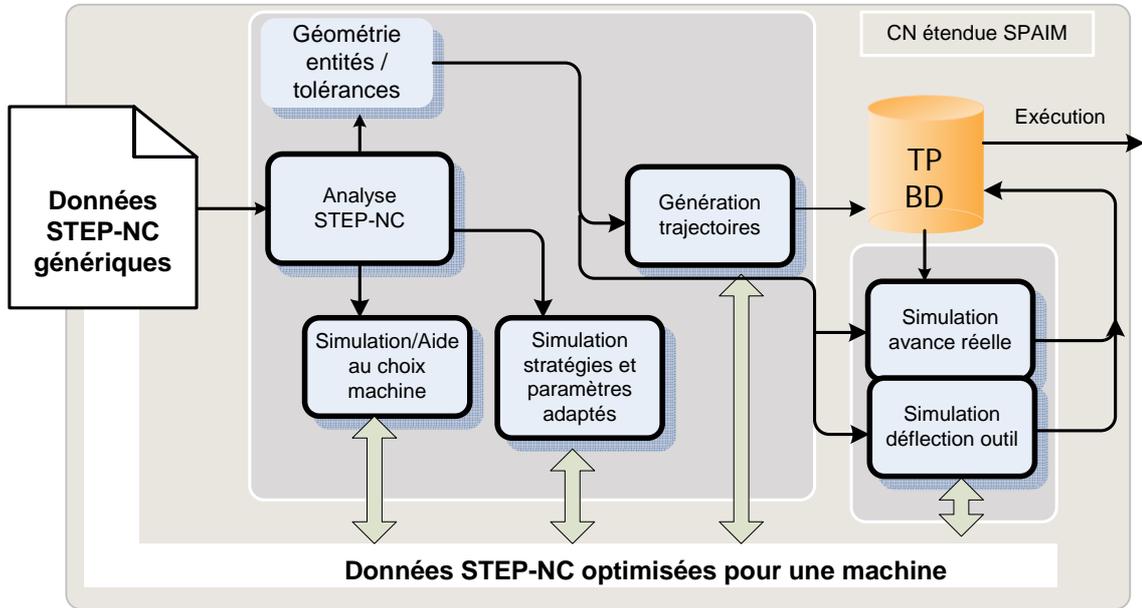


Figure 95 : Implémentation proposée du simulateur UGV au sein de la CN étendue

L'ensemble des trajectoires outils et des paramètres de coupes associés sont stockés dans la base de données des trajectoires (TPDB pour Tool Paths Data Base). Ces données peuvent alors être optimisées pour une adaptation complète au comportement réel de la machine et aux phénomènes physiques associés. La programmation de l'avance réelle et la modification des trajectoires pour compenser les effets de déflexions outils sont des exemples mis en œuvre avec le simulateur UGV. Ces dernières simulations sont actuellement réalisables manuellement au sein de la CN étendue et ont pu être mis en œuvre dans le cas de la pièce test aéronautique. Les outils de simulation/aide au choix de la machine ainsi que des stratégies et paramètres adaptés sont cités ici à titre d'exemple d'extension des possibilités du simulateur UGV au sein de la CN étendue, mais n'ont pas été développés dans le cadre de cette thèse.

Usinage de la pièce et modifications :

L'usinage de la pièce a été réalisé suivant la gamme de fabrication décrite précédemment dans ce paragraphe. Celle-ci débute par l'usinage des dessus de

nervures. Elle est ensuite suivie par l'usinage ébauche des trois poches programmées en STEP-NC (Figure 96). Nous nous intéressons plus particulièrement dans la suite à ces trois opérations.



Figure 96 : Ebauche des trois poches programmées en STEP-NC au sein de la CN étendue

Ces trois opérations concernent des entités de fabrication aisément descriptibles à partir de la norme ISO 10303 AP224. Les poches 1 et 2 sont directement traitées au sein de la CN étendue de la même manière que dans l'exemple de la pièce test 2D $\frac{1}{2}$ présentée au § 6.3.4.1. Le module d'exécution de la CN étendue pilote alors directement la suite Delcam pour la génération des trajectoires, après reconstruction de la géométrie des entités de fabrication. Dans le cas de la poche 3, une nuance a été apportée dans le pilotage de la suite Delcam. Le module d'exécution de la CN étendue s'appuie sur le contour de la poche 3 définie en STEP-NC pour créer une frontière utilisée par la suite pour l'usinage dans PowerMILL. Celui-ci ne s'appuie plus alors sur l'entité de fabrication reconstruite à partir des données STEP-NC, mais sur le modèle STEP importé de la pièce aéronautique et la frontière créée à partir des données STEP-NC. Cette manière de procéder permet de résoudre un problème majeur lié à l'utilisation de l'AP224 (c'est donc en ceci une limitation directe des possibilités actuelles de STEP-NC) : la difficulté à définir des fonds de poche non plats. Ainsi, cet essai nous permet de piloter la machine, à partir des données STEP-NC et du modèle STEP de la pièce, pour des usinages de fonds non plats comme dans le cas de la poche 3 (celle-ci aurait pu, au passage, être décomposé en plusieurs autres entités : ce choix s'avérerait judicieux, suivant notre point de vue, principalement dans le cas de l'usinage finition qui n'est pas traitée ici avec STEP-NC).

Suite à l'usinage d'une première pièce, des modifications ont été apportées dans le choix des attributs de fabrication pour l'ébauche des poches 1, 2 et 3 (Figure 97). Dans le cas des poches 1 et 3, des outils de diamètres différents ont été utilisés. Pour la poche 2, la stratégie d'usinage zigzag associée à un contour parallèle a été remplacée par une stratégie d'usinage en colimaçon. L'ensemble de ces choix a été directement rentré par l'intermédiaire de l'interface homme-machine de la CN étendue SPAIM et a permis une régénération automatique de l'ensemble des trajectoires outils et des paramètres d'usinage. Ceci n'est possible que dans le cas des entités de fabrication programmées avec STEP-NC.

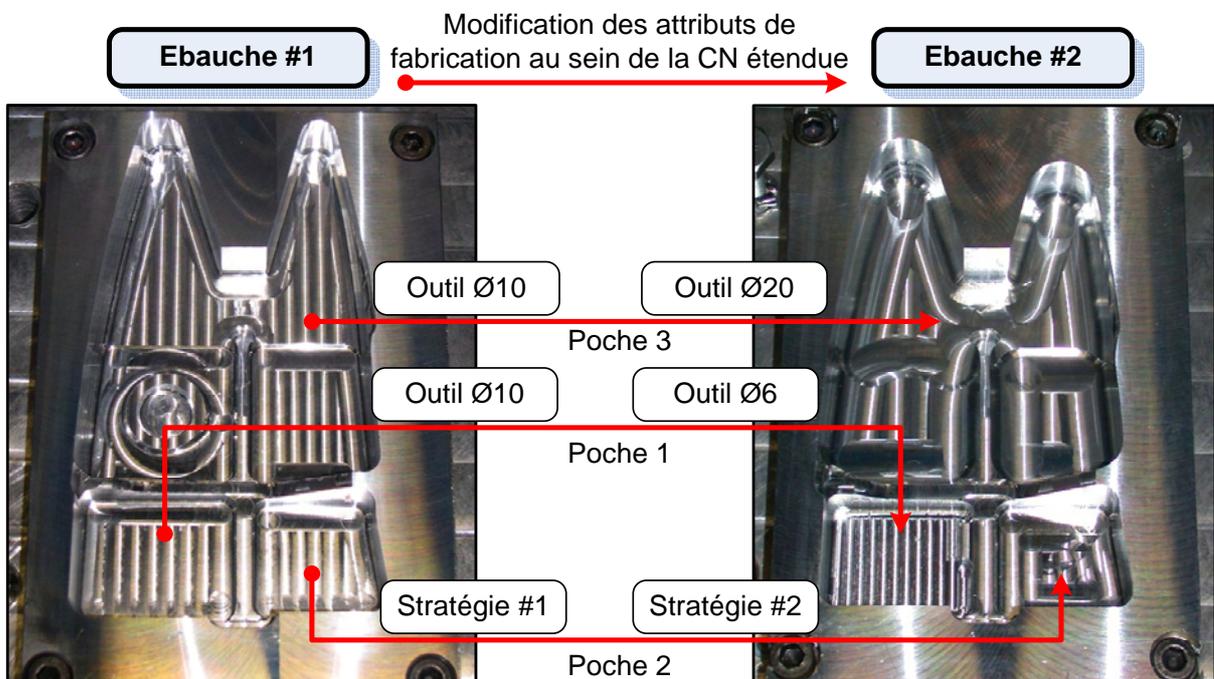


Figure 97 : Modification des attributs de fabrication traitée au sein de la CN étendue

L'objectif est ici de montrer les possibilités liées à l'utilisation de la programmation basée entités STEP-NC au sein de la CN étendue SPAIM proposée. Nos choix ont consisté à privilégier l'autonomie de l'opérateur qui est mise en avant ici avec cet essai. Il n'est en effet pas nécessaire d'exécuter à nouveau l'ensemble de la chaîne numérique traditionnelle lors d'un simple changement d'outils ou de stratégie d'usinage. Cela permet une meilleure adaptation aux imprévus, une diminution des temps de mise en production et une flexibilité améliorée lors des changements de production. Un autre aspect très important concerne l'apport de notre proposition

quant à la disponibilité et au feed-back possible des données STEP-NC modifiées en direction de la CAO étendue, des systèmes de gestion de production et de capitalisation de l'expérience. Ainsi, les modifications opérées peuvent être directement accessibles par les services compétents pour la mise à jour des données de fabrication, temps et coûts de production, approvisionnements outils et matière, etc. Pour finir, la pièce test aéronautique a pu être finie en associant les opérations d'ébauche STEP-NC aux opérations de finition programmées manuellement au sein de la CN étendue (Figure 98).



Figure 98 : Pièce test aéronautique usinée

6.3.5 Chaîne numérique réalisée, apports et discussions

La première étape du développement de la plate-forme SPAIM dans le cas de l'usinage a principalement consisté en la réalisation d'une CN étendue autonome implémentée directement sur la machine. Celle-ci équipe actuellement une machine à structure parallèle Fatronik Verne équipée d'un DCN Siemens 840D et est en cours d'implémentation sur une machine Hermle C30U équipée d'un DCN Heidenhain. La chaîne numérique STEP-NC réalisée a pour entrée le modèle de la pièce (Figure 99).

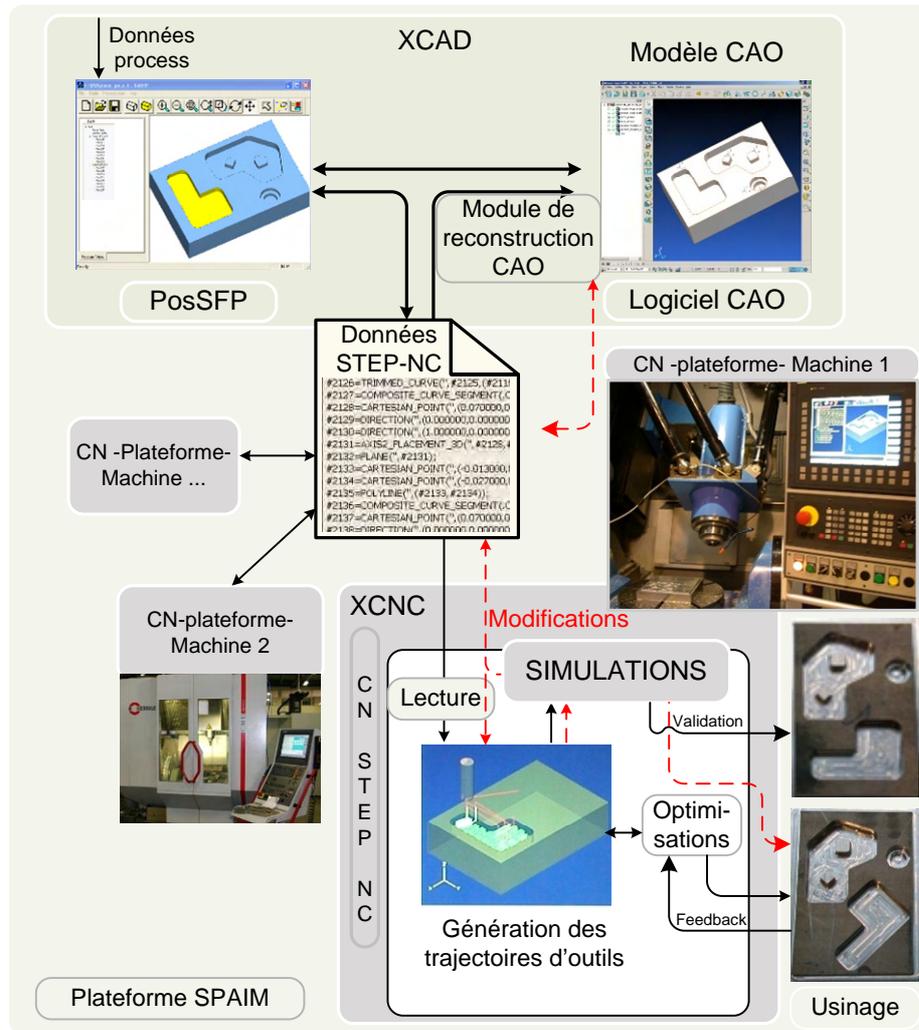


Figure 99 : Chaîne numérique STEP-NC réalisée au sein de la plate-forme SPAIM

Le modèle CAO est traité au sein de la CAO étendue (XCAD) principalement constituée du logiciel coréen PosSFP dans sa version étendue aux possibilités de sélection de description des trajectoires outils par stratégies à motif pour l'usinage trochoïdal et de tréflage. Cet outil permet, à partir de la reconnaissance automatique ou manuelle des entités de fabrication et de la sélection des paramètres de fabrication, de générer des données STEP-NC. Il peut être considéré comme une extension du logiciel de CAO pour la génération des données STEP-NC (CAO étendue). Ces données sont ensuite traitées dans la CN étendue. Celle-ci permet la génération automatique des trajectoires et des paramètres d'usinage ainsi que la vérification des collisions. Elle intègre des possibilités de simulation process pour l'optimisation de l'usinage en vue de la conformité de la pièce. À travers l'interface homme-machine, des modifications de la géométrie des entités, des paramètres de fabrication ou des outils entraînent la régénération automatique des trajectoires et

des paramètres d'usinage. Ces modifications sont répercutées au sein des données STEP-NC et permettent un feed-back de l'information en direction de la CAO étendue et de l'ensemble des départements de l'entreprise.

Nous avons donc pu montrer, par le développement de la plate-forme SPAIM, plusieurs avantages de la mise en œuvre de la programmation basée entités avec notre approche. Les principaux apports d'une telle approche sont les suivants :

- amélioration de l'autonomie avec un transfert de l'intelligence au sein de la CN étendue,
- modifications de la géométrie et des paramètres de fabrication rendues possibles avec une répercussion automatique sur les trajectoires et les paramètres d'usinage,
- retour des informations et des modifications en direction de l'ensemble du système de production et en particulier de la CAO étendue,
- la CN étendue SPAIM développée permet de traiter la programmation STEP-NC tout en conservant la possibilité d'usinage suivant l'approche conventionnelle (code G) dans le cas, par exemple, de programmes déjà existants,
- implémentation de la plate-forme SPAIM sur des moyens industriels et usinage démonstratif d'une pièce aéronautique industrielle,
- intégration des modules de simulation et d'optimisation avec, par exemple, le simulateur UGV. Des propositions pour l'extension de ces fonctionnalités à l'aide au choix de la machine, des stratégies et des paramètres d'usinage ont pu être faites,
- intégration de l'approche de la programmation paramétrée STEP-NC par stratégies à motifs dans le cas de l'usinage trochoïdal et du tréflage,
- utilisation de logiciels de type industriels (suite Delcam) pour exploiter leur robustesse et savoir-faire de simulation dans le cas des stratégies communes (génération des trajectoires, vérification des collisions, etc.). Cela a été l'occasion de proposer une méthode simple d'intégration (pilotage par une routine Delphi à partir des données STEP-NC) à la CN étendue,
- un unique fichier STEP-NC peut directement être traité sur différentes machines grâce à l'ensemble de ces données génériques,
- la plate-forme peut être installée sur une grande majorité des interfaces CN industrielles récentes,
- elle constitue une base pour l'implémentation et les démonstrations des futurs travaux concernant la programmation basée entités et le standard STEP-NC,

- introduction et démonstration concrète des concepts de CAO étendue et de CN étendue.

Les développements réalisés dans le cadre de l'usinage ont pu être étendus à la fabrication à partir d'autres procédés et permettent ainsi de constituer des bases d'une plate-forme STEP-NC intégrant un environnement multi-process. Nous détaillons dans la partie suivante les bases de l'implémentation et les tests réalisés intégrant la fabrication additive et le tournage.

6.4 SPAIM : système intégré de fabrication étendue dans un contexte multi-process [Laguionie'10]

L'objectif à terme de la plate-forme SPAIM est de pouvoir supporter le système intégré de fabrication étendue tel que présenté au chapitre 4. L'intégration des possibilités multi-process est une étape importante de son évolution dans la mesure où cela constitue un des apports majeurs de la programmation basée entités STEP-NC (chapitre 5). Nous présentons dans cette partie les premiers développements qui ont été menés en vue de l'intégration d'autres procédés comme la fabrication additive ou le tournage aux possibilités de la plate-forme SPAIM. Plusieurs exemples illustreront la mise en œuvre de celle-ci dans un contexte multi-process.

6.4.1 Intégration de la fabrication additive

Sur la base des développements de la plate-forme SPAIM réalisés dans le cas du fraisage, une version de la CN étendue a été développée pour des applications de fabrication par ajout de matière (AM). Cette version de la CN étendue a été implémentée sur la machine à fusion laser de poudre du laboratoire. Cette machine est un prototype basé sur un centre d'usinage cinq axes Huron dont la broche a été remplacée par une double tête de fusion laser (ébauche et finition). Le principe de fonctionnement réside dans la projection d'un cône de poudre se focalisant au niveau de l'impact laser (Figure 100). La matière est ainsi fondue et déposée. La pièce est construite par couches successives de dépôts de matière.

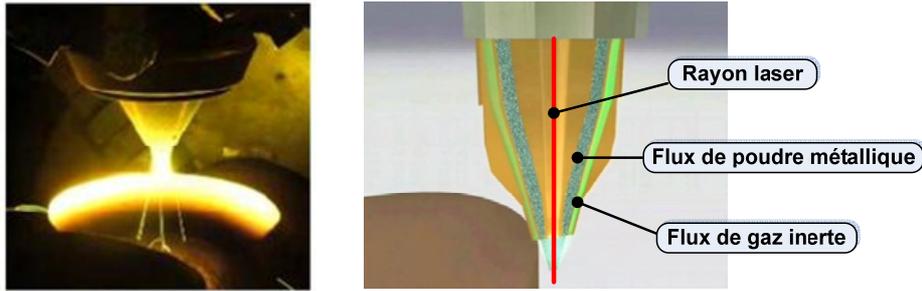


Figure 100 : Principe de fonctionnement de la tête de fusion laser de poudre

Un panel de matériaux métalliques sont disponibles (Inox 316L, Inconel, Titane, etc.) et les propriétés de la pièce sont similaires à celle des matériaux initiaux lorsque les conditions de fabrication sont optimales. La machine est commandée par un DCN Siemens 840D et les trajectoires sont générées, dans notre cas, par le logiciel PowerCLAD [Irepa-laser]. La chaîne numérique traditionnelle mise en jeu est ainsi similaire à celle associée aux applications d'usinage. Nous nous proposons d'intégrer ce type de fabrication par ajout de matière aux possibilités de la chaîne numérique de fabrication de la plate-forme SPAIM (Figure 101).

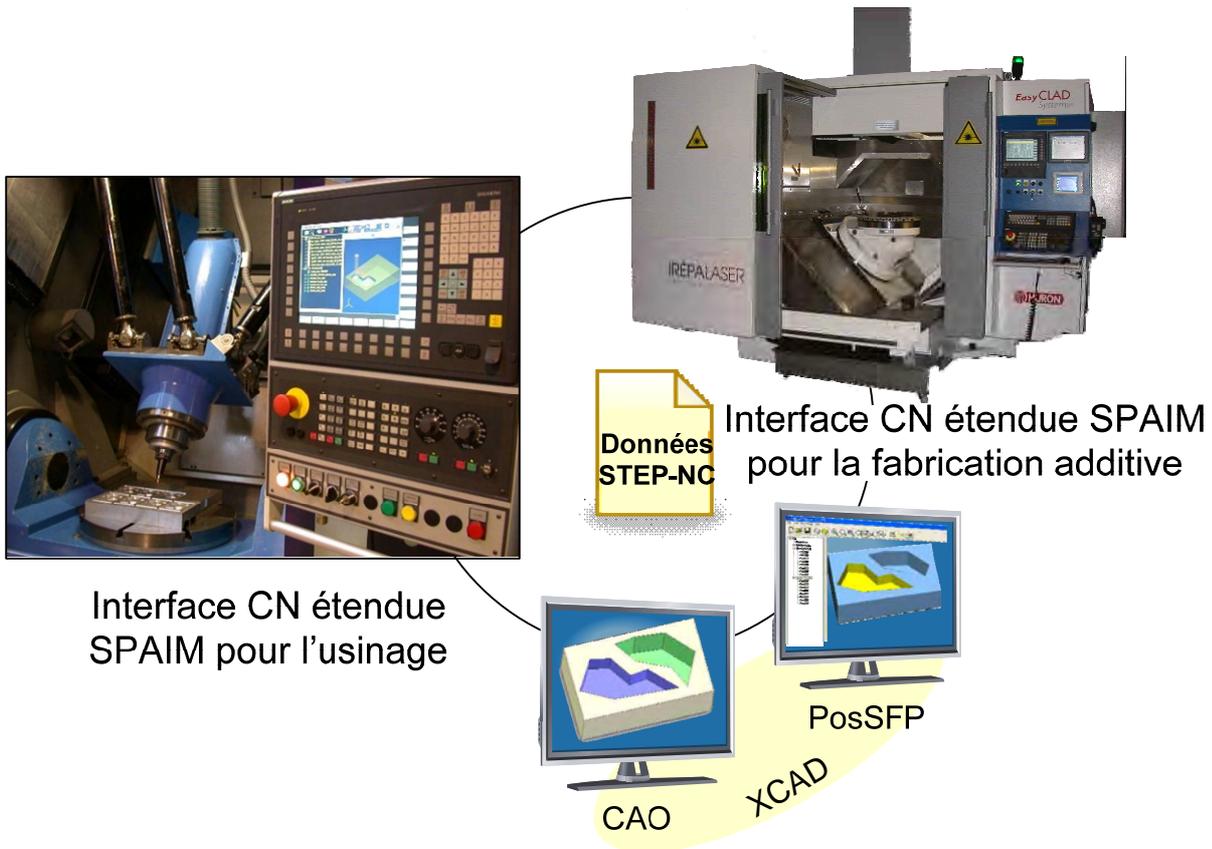


Figure 101 : Chaîne numérique SPAIM multi-process

L'implémentation de la chaîne numérique STEP-NC multi-process au sein de la plate-forme SPAIM a été réalisée en deux étapes. La première étape consiste en l'extension des possibilités de la CN étendue SPAIM au traitement des pièces réalisées par fabrication additive. Les principales évolutions concernent la nature des entités de fabrication. Certaines d'entre elles demeurent communes au cas du fraisage et certaines entités nouvelles ont pu être intégrées (canaux conformes, etc.). La seconde étape consiste en l'intégration des possibilités de traitement d'une gamme multi-process, faisant intervenir plusieurs procédés pour la réalisation d'une pièce. Nous nous proposons de détailler dans la suite ces premières évolutions avec l'étude de deux exemples d'application traités au sein de la plate-forme SPAIM.

6.4.2 Exemples d'application

L'extension des possibilités de la plate-forme SPAIM au contexte multi-process est en cours de développement dans le cadre de la mise au point de l'application du système étendu de fabrication intégrée. Celui-ci vise à intégrer l'implémentation, la validation et la démonstration des travaux liés à la programmation basée entités dans le domaine très large de la programmation multi-process. Nous détaillons, en nous appuyant sur deux exemples concrets, l'avancement de ces développements et les possibilités actuelles de la plate-forme SPAIM multi-process.

6.4.2.1 Exemple 1 : traitement des entités spécifiques à la fabrication additive

La norme STEP-NC concernant la fabrication par ajout de matière (AM) est en cours d'études de standardisation à travers l'ISO14649 Part17. En plus des entités déjà définies dans le cas du fraisage, des propositions ont pu être faites, au sein de l'équipe MO2P, pour l'ajout d'entités nouvelles spécifiques à la fabrication additive [Bonnard'08]. Parmi celles-ci, la définition de canaux conformes constitue un des majeurs changements et permet de créer de nouvelles entités non usinables mais réalisables par construction additive de la pièce. Les pièces suivantes illustrent la réalisation de canaux conformes qui peuvent être sollicités dans des applications comme par exemple le contrôle en température d'un outillage par parcours d'un fluide caloporteur (Figure 102).

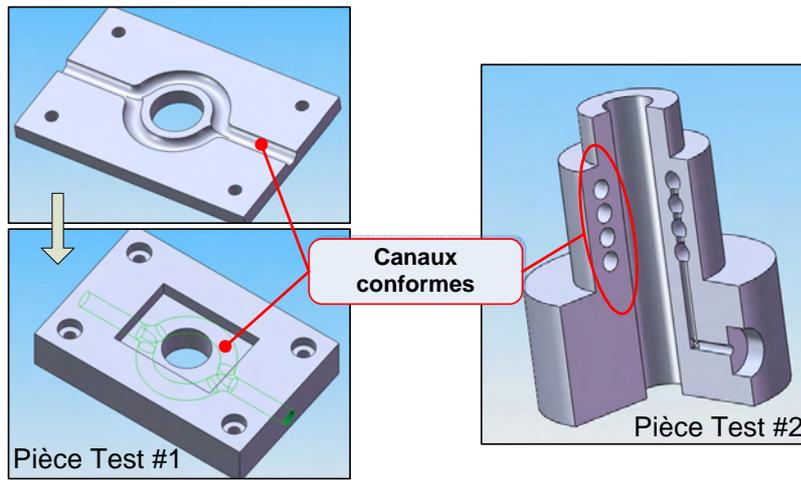


Figure 102 : Pièces test comportant des canaux conformes

Des adaptations ont été réalisées au sein de la CN étendue, en particulier dans le module d'exécution, pour permettre le pilotage automatique de la reconstruction CAO des pièces ainsi que la génération des trajectoires et attributs de fabrication dans le cas de la fabrication additive (AM), mais aussi pour le tournage (Figure 103).

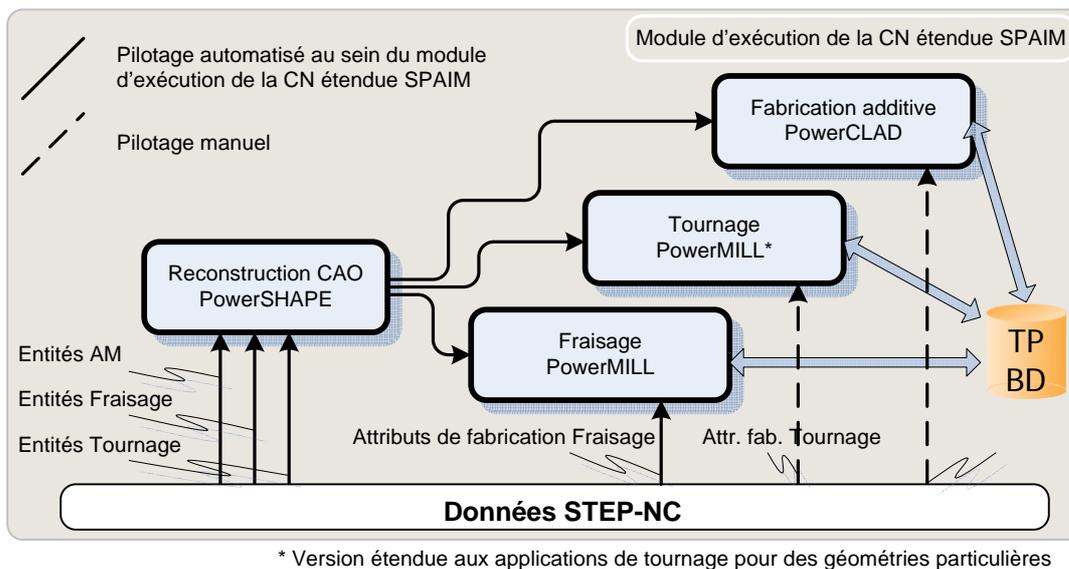


Figure 103 : Intégration actuelle des possibilités de traitement multi-process

Dans le cas de la fabrication additive, SPAIM permet, à partir des données STEP-NC des entités communes au fraisage et spécifiques à la fabrication additive, la reconstruction CAO avec Delcam PowerSHAPE pour la génération automatique de la géométrie de la pièce. Les canaux conformes sont techniquement construits comme des rainures (slots) par balayage d'un profil le long d'une courbe guide. La géométrie

est ensuite automatiquement exportée vers PowerCLAD. Ce logiciel est en cours d'édition par IREPA-Laser [Irepa-laser] et utilise directement les outils de Delcam PowerMILL pour la génération des parcours outils de fabrication laser additive. Son utilisation est ainsi similaire à celle de PowerMILL. Les attributs de fabrication associés aux données STEP-NC sont complétés manuellement (dans la version actuelle) et permettent la génération des trajectoires directement envoyées dans la base de données des trajectoires (TPDB) d'où elles sont exécutées sur la machine. Une version de PowerMILL a pu être étendue aux applications de tournage dans le cas de géométries simples. Nous nous servons ainsi de celui-ci pour générer les trajectoires de tournage à partir du moteur de génération de trajectoires du fraisage. L'opération consiste à balayer le profil de la pièce coupée dans un plan de coupe comportant son axe de révolution. Cette application demeure cependant réservée aux géométries et opérations simples (difficultés dans le cas de filetages, etc.). Cette manière de procéder permet de limiter les développements nécessaires pour l'intégration du tournage dans la plate-forme SPAIM. Les entités de tournage sont, de la même manière que pour le fraisage et la fabrication additive, reconstruites automatiquement avec PowerSHAPE et exportées vers PowerMILL où les attributs de fabrication issus des données STEP-NC sont actuellement entrés manuellement. Les trajectoires et paramètres d'usinage sont alors exportés vers la base de données des trajectoires pour les entités concernées.

Le résultat de ces développements permet de traitement de gammes multi-process intégrant des opérations de fraisage, tournage et de fabrication additive. Les premiers tests ont permis la mise en œuvre de la CN étendue SPAIM dans le cas de l'analyse et de la reconstruction des pièces test présentées précédemment à partir des données STEP-NC (Figure 104). La pièce test #1 permet d'associer une gamme de fabrication comportant une opération principale de fabrication laser additive (présence d'un canal conforme au sein de la pièce) et d'opérations de finition en fraisage. La pièce #2 associe une opération principale de fabrication laser additive à une phase de finition en tournage. Ces pièces ont servi de test au développement des applications de fabrication additive et de tournage au sein de la CN étendue SPAIM. Les tests de la mise en œuvre pratique de la CN étendue dans un contexte multi-process ont été réalisés par l'intermédiaire de l'exemple 2.

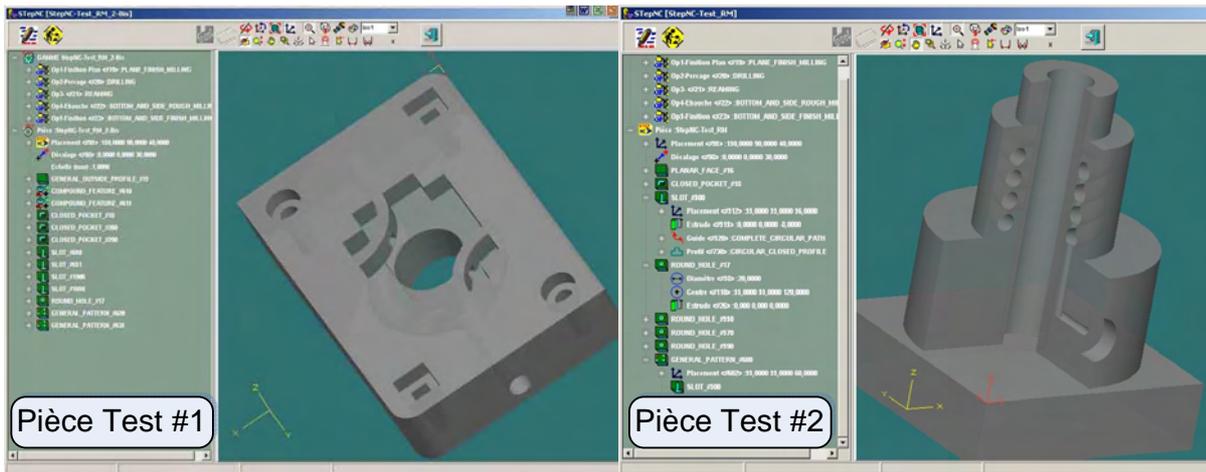


Figure 104 : Association multi-process dans la CN étendue SPAIM

6.4.2.2 Exemple 2 : matrice d'emboutissage réalisée en multi-process

L'exemple que nous nous proposons de traiter pour la réalisation d'une pièce comportant une gamme de fabrication multi-process est une matrice d'emboutissage développée à l'Ecole Centrale de Nantes pour des démonstrations de la mise en œuvre de procédés innovants (fabrication laser additive, formage incrémental, etc.) et pour des applications multi-process dans le cadre d'un projet industriel avec PSA Peugeot Citroën. Elle est constituée d'un corps de révolution surmonté d'une entité pyramidale tronquée (Figure 105).



Figure 105 : Modèle de la matrice d'emboutissage étudiée

Les différentes sollicitations mécaniques lors de l'emboutissage des pièces engendrent des phénomènes d'usure et de rupture localisés au niveau de l'entité pyramidale. Une solution peut consister en l'utilisation d'un matériau aux propriétés mécaniques adaptées. Dans la mesure où les concentrations de contraintes importantes sont

localisées sur l'entité pyramidale, il a été décidé de recourir à une solution multi-matériaux en conservant un acier traditionnel (acier inoxydable 316L) pour le corps de la matrice et en ajoutant par fabrication additive l'entité pyramidale dans un matériau différent. Le matériau choisi est un stellite, ou alliage de cobalt-chrome, conçu pour de fortes résistances à l'usure et à la corrosion. Nous avons élaboré la gamme de fabrication de la matrice d'emboutissage en quatre principales phases de fabrication :

- phase 1 : tournage ébauche et finition du corps de la pièce,
- phase 2 : réalisation de l'entité pyramidale en fabrication laser additive,
- phase 3 : finition de l'entité pyramidale en fraisage.

La pièce a pu être traitée au sein de la CN étendue SPAIM à partir des données STEP-NC de définition de l'entité de tournage du corps et de l'entité pyramidale pour la fabrication additive et le fraisage (Figure 106). Le pilotage des différents outils de génération des trajectoires est réalisé manuellement à partir des attributs de fabrication disponibles au sein des données STEP-NC.

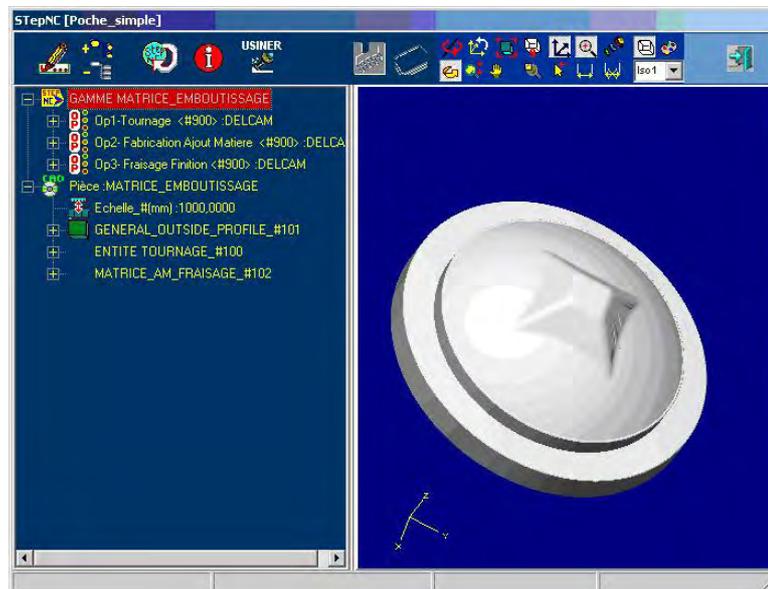


Figure 106 : Traitement de la matrice d'emboutissage par la CN étendue SPAIM

La mise en œuvre expérimentale a été réalisée avec pour objectif la démonstration pratique des possibilités multi-process actuelles de la plate-forme SPAIM et en particulier de la CN étendue (Figure 107).

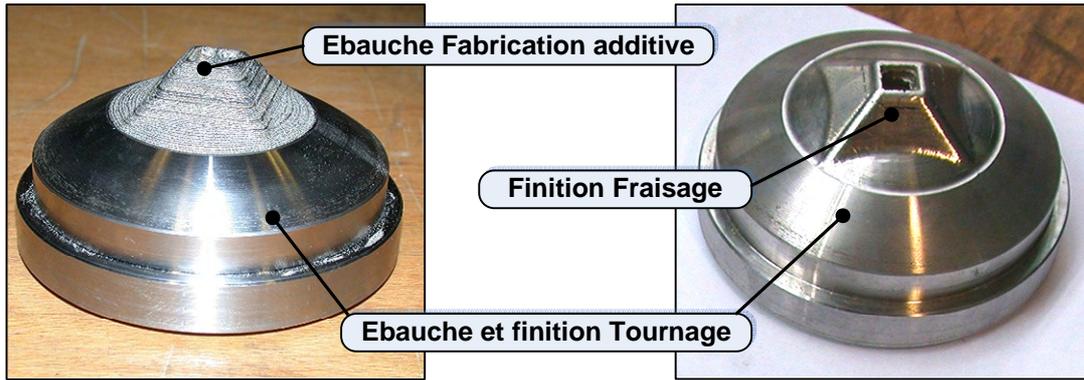


Figure 107 : Réalisation de la matrice d'emboutissage

La réalisation des premières pièces multi-process et multi-matériaux ont permis de mettre en avant la réelle nécessité de développement et d'intégration des outils de simulation et d'optimisation permettant l'aide à la décision de l'utilisateur dans un environnement de plus en plus complexe. Outre les considérations liées à la mise en œuvre des procédés eux-mêmes, il s'avère réellement nécessaire de prendre en compte plus que jamais les relations inter-process qui impactent directement la gamme de fabrication, tant dans le choix des entités que celui des paramètres de fabrication. Le choix judicieux de cette gamme de fabrication optimale ne peut être réalisé sans l'aide d'outils de simulation et d'optimisation adaptés, mais aussi sans un retour des modifications et de l'expérience des phénomènes physiques mis en jeu. Un exemple concerne les phénomènes thermiques liés à l'utilisation du procédé de fusion laser de poudre. L'image suivante montre des déformations d'une plaque support lors d'un essai de fabrication laser additive de l'entité pyramidale (Figure 108). Ces défauts liés au retrait et à la formation de contraintes résiduelles doivent être pris en compte et les effets anticipés dès les premières phases de conception de la gamme de fabrication avec l'aide au choix, par exemple, d'entités de fabrication maximisant les dissipations thermiques ou de stratégies de fabrication minimisant ses effets.



Figure 108 : Déformation d'une plaque support liée aux effets thermiques

L'introduction des données STEP-NC de haut niveau communes à un ensemble de procédés constitue une solution intéressante permettant de traiter l'ensemble d'une gamme multi-process au sein d'une même CN étendue. Cela constitue un apport principal de ce système dans la mesure où la pièce peut être traitée dans sa globalité en intégrant chacun des procédés dans les différents cycles de simulation. Les premiers essais multi-process effectués ont permis de mettre en avant la réelle nécessité de simulation inter-process et ouvrent un nouveau champ d'investigation. La plate-forme multi-process SPAIM constitue une base solide pour la validation et la démonstration des développements effectués dans ce domaine. Nous proposons dans la suite de fournir une vision globale de l'architecture actuelle de la plate-forme SPAIM multi-process ainsi que des perspectives d'intégration à moyen terme.

6.4.3 Architecture étendue de la plate-forme SPAIM et apports

La plate-forme SPAIM vise à mettre en pratique les concepts présentés au cours de cette thèse et s'inscrit comme l'application du système étendu de fabrication intégrée dans un contexte multi-process. L'ensemble des modules développés a pu être intégré aux différentes unités du système de production et communique par le pipeline d'échange des informations de fabrication supportant les données STEP, STEP-NC générique, STEP-NC optimisé pour une machine et STEP-NC inspection. La figure suivante schématise l'organisation des différents modules au sein des unités du système de production XMIS (Figure 109). Ces développements, initialement effectués dans le cadre du fraisage, ont été étendus à d'autres procédés de fabrication comme la fabrication par ajout de matière ou le tournage sur des bases similaires au cas du fraisage. Ceci permet de traiter des pièces multi-process et de travailler sur des gammes faisant appel à différents procédés de fabrication. L'entrée du système actuel est le fichier CAO de la pièce. Il est initialement traité au sein de l'unité de planification de la CAO étendue (XCAD) pour la sélection des procédés de fabrication et la reconnaissance des entités associées. La mise en œuvre des outils de quantification de la complexité de fabrication associée à un procédé (cf. § 5.5) ouvrent la voie des outils de simulation des interactions inter-process et permettent une aide au choix des procédés adaptés à la fabrication d'une entité. Des données issues de cette première boucle de simulation et d'optimisation sont implémentées sous forme STEP-NC générique dans la mesure où aucun choix de machine n'a encore été effectué.

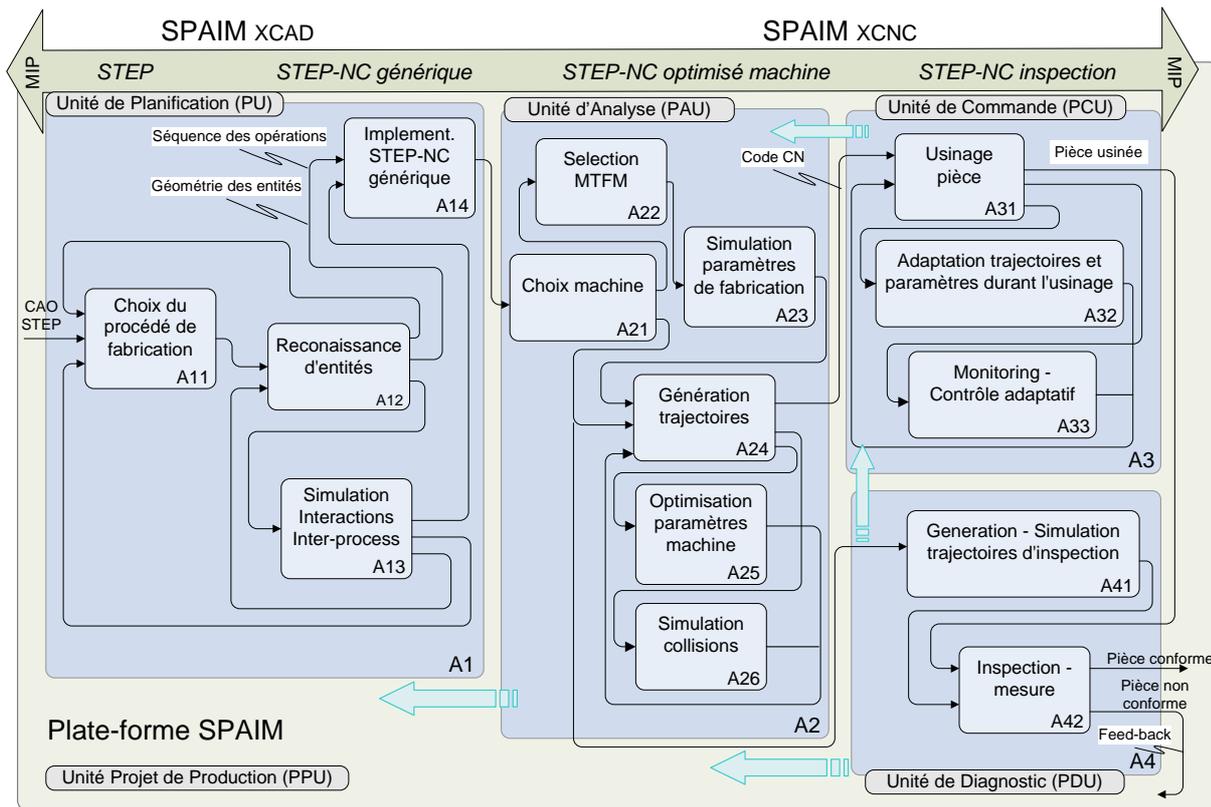


Figure 109 : Application du système étendu de fabrication intégrée avec SPAIM

Les données STEP-NC génériques sont alors le point d'entrée de la CN étendue (XCNC). L'unité d'analyse process (PAU) permet de choisir les machines et paramètres de fabrication adaptés. Le support des données entrées manuellement ou issues des différentes simulations sont supportées au sein du STEP-NC optimisé machine. Elles sont alors directement utilisées pour la génération des trajectoires et des paramètres machine ainsi que pour leur optimisation et la vérification des collisions. L'ensemble de ces données STEP-NC peut faire l'objet de modifications par l'opérateur ou au sein des différents modules de simulations. Leur feed-back est ainsi rendu possible pour le traitement au sein de la CAO étendue. Une fois l'ensemble des parcours et des paramètres machine optimisés et validés, ils sont envoyés pour exécution sous forme de code CN (code G) à l'unité de commande (PCU). Les paramètres et trajectoires machines peuvent être adaptées en ligne avec l'application ICAM [Rauch'07], bien que celle-ci n'est pas donnée lieu à d'applications concrètes de démonstration dans le cadre de ces travaux. Il en est de même pour la surveillance de l'usinage et le contrôle adaptatif dont certains outils ont été développés au sein de l'équipe MO2P. Leur intégration au sein de la plate-forme SPAIM demeure à ce jour une perspective intéressante pour l'évolution de celle-ci. Il demeure cependant un

verrou technologique a leur réelle mise en valeur qui est limitée par l'utilisation du code G, même si cela demeure transparent pour l'utilisateur. D'autres perspectives visent à intégrer des possibilités nouvelles d'inspection en ligne avec l'utilisation de la norme ISO 14649 Part16 (ou STEP-NC Inspection [ISO14649-16'04]). Ces possibilités peuvent permettre un suivi et une correction automatique embarquée de la production. Des applications d'usinage sur pièces déformables (flans, etc.) au sein de l'équipe MO2P ont permis une adaptation des trajectoires à la géométrie déformée de la pièce par morphing. Une limitation des applications d'inspection réside cependant dans les lacunes actuelles d'intégration des tolérances et spécifications géométriques au sein de la norme STEP-NC. Les comités de normalisation travaillent actuellement sur ces problématiques et la plate-forme SPAIM constitue un outil bien adapté aux implémentations et démonstrations dans ce domaine.

Les améliorations multi-process effectuées au sein de la plate-forme SPAIM ainsi que l'intégration des outils de simulation (outils de génération des trajectoires et simulation des collisions dans le cas de la fabrication additive et du tournage, outils de quantification de la complexité de fabrication, etc.) permettent de compléter l'application du système étendu de fabrication intégrée et offrent de nouveaux champs d'investigation pour l'intégration complète du contexte multi-process. Les principaux apports de cette seconde phase de développements peuvent être résumés de la manière suivante :

- l'apport principal ne réside pas spécifiquement dans le contenu des modules mais la façon dont ils sont organisés et dans le flux des données au sein du système de production SPAIM. Ainsi, les informations sont supportées par des standards non propriétaires basés entités que sont STEP, STEP-NC générique, STEP-NC optimisé machine et STEP-NC Inspection. Ceci permet une genericité des données compatibles avec l'ensemble des modules de la chaîne numérique à travers un support commun, quelque soit le procédé de fabrication. Les données sont ainsi disponibles de façon explicite à tous les niveaux du système de production et permettent une interaction entre les modules avec la possibilité de retour des informations modifiées ou optimisées au sein de la CN étendue.

Les apports additionnels de notre démarche sont les suivants :

- intégration de plusieurs procédés de fabrication (fraisage, fabrication additive, tournage) au sein d'une même CN étendue,

- réalisation et mise en œuvre pratique d'un système de production complet s'appuyant sur la programmation basée entités des moyens de fabrication,
- mise en œuvre sur des moyens industriels des premières pièces multi-process,
- validation des possibilités d'une gamme multi-process STEP-NC,
- création des bases solides de développement de la plate-forme SPAIM et perspectives intéressantes pour la suite des développements liés à la programmation et au standard STEP-NC,
- plate-forme très complète et innovante parmi les développements réalisés au niveau de la recherche universitaire dans la communauté STEP-NC,
- utilisation de l'ensemble des compétences de l'équipe,
- ouverture vers de nouvelles possibilités d'utilisation des données STEP-NC (applications d'inspection, intégration de la méthode ICAM, etc.).

6.5 Conclusion et discussions

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application des concepts proposés dans cette thèse avec le développement de la plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing). Celle-ci est une application directe du système étendu de fabrication intégrée XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System) dont l'objectif est l'intégration de la programmation basée entités. L'application pratique et concrète de celui-ci a donné lieu au développement de deux sous-systèmes complémentaires : la CAO étendue SPAIM et la CN étendue SPAIM. Ces derniers permettent de traiter la fabrication du modèle jusqu'à la pièce réalisée conforme. Des efforts conséquents de développement se sont concentrés sur la mise au point d'une CN étendue permettant la programmation interprétée STEP-NC sur des moyens industriels. Deux principales phases de développement ont eu lieu : la première constitue la base du développement de la plate-forme dans le cas du fraisage et la seconde a permis d'étendre les possibilités de celle-ci à la fabrication additive et au tournage. Dans le cas du fraisage, plusieurs pièces test 2D½ ou issues de l'industrie aéronautique ont permis de démontrer les possibilités de notre approche de mise en œuvre de la production à partir des données STEP-NC et de retour de l'information en direction de la CAO étendue suite aux modifications effectuées pied-machine. Sur les bases de la plate-forme développée pour le fraisage, nous avons pu étendre les possibilités de la CN étendue SPAIM à la fabrication additive et au tournage. La réalisation de pièces test a permis de mettre en œuvre celle-ci dans un contexte multi-

process avec l'intégration de gammes faisant appel à plusieurs procédés pour en valider le concept de programmation. Finalement, la réalisation et la mise en œuvre de la plate-forme SPAIM constituent une expérience pratique de l'utilisation de la programmation basée entités et permet, à ce titre, d'avoir un retour quant aux améliorations qui sont encore nécessaires pour pouvoir être plus largement répandu dans le milieu industriel. La première limitation est que nous sommes aujourd'hui largement restreints par l'utilisation de la norme ISO 10303 AP224 pour la définition des entités de fabrication. Celle-ci nécessite en effet encore beaucoup d'améliorations pour permettre l'utilisation d'entités de fabrication plus adaptées à la réalité des pièces traitées. Les entités comportant des surfaces complexes sont encore mal définies ou de façon ambiguë. Des travaux doivent être effectués dans ce domaine pour clarifier les choses. Il reste de même certains travaux à réaliser pour compléter et amener le standard STEP-NC à maturité. Nous pouvons citer par exemple certains manques au niveau de l'intégration du montage d'usinage, malgré les possibilités encore trop restreintes de spécifier les points de maintien en position et de serrage de la pièce déjà intégrées au standard. De la même manière, la prise en compte du tolérancement de la pièce est un point important ayant des conséquences directes sur la fabrication de celle-ci. Des travaux dans ce domaine sont en cours. D'autres questions ont pu être soulevées lors de la réalisation de ces travaux, en particulier concernant les limites de l'autonomie de la machine et de la nécessité d'une supervision par l'opérateur. Notre point de vue est qu'il n'est pas souhaitable de tendre vers une gamme totalement automatique mais plutôt vers l'intégration d'un ensemble d'outils automatisés permettant l'aide à la décision de l'opérateur. Ce dernier doit être capable de modifier à sa convenance l'ensemble des paramètres pour l'exécution des tâches machine. L'ensemble de ces modifications soulève alors des questions de gestion des données modifiées ainsi que les différentes versions des données STEP-NC. Pour ceci, l'ensemble des méthodes de gestion des données et des versions [Peng'98; Crnkovic'03] déjà largement développées et appliquées dans les domaines de la conception collaborative peuvent être reprises et adaptées. Le standard STEP-NC étant amené à évoluer avec le temps, il est nécessaire d'anticiper la gestion des versions du standard et la mise à jour des applications associées. La mise en place de ce standard émergent et de façon plus générale de la programmation basée entités, soulève un ensemble de questions et appelle à la réflexion et à la collaboration d'un ensemble important de corps de métiers. Cela n'est possible que par l'implication d'industriels majeurs, en quête aujourd'hui de propositions quant à

l'intégration concrète de ce type de programmation et de démonstrations en lien avec la réalité industrielle. Ces objectifs demandent de gros efforts de développement qui ont pu être initiés avec les propositions et applications présentées dans ces travaux.

Chapitre 7. Conclusions et perspectives

7.1 Synthèse des travaux

Ces travaux de thèse s'intéressent à l'intégration de la programmation basée entités pour la fabrication sur machines à commande numérique dans un contexte multi-process. Une étude bibliographique a permis de mettre en évidence les manques de la programmation actuelle des MOCN. Le code G, supporté par la norme ISO 6983 basée sur des principes des années 60 et sans réelle évolution depuis, permet la description structurée d'actions élémentaires exécutées par la CN dans un langage syntaxiquement pauvre et désuet. Pour combler ce manque, les éditeurs CFAO et les constructeurs de CN proposent des extensions propriétaires ou parfois même des langages de programmation structurés complets. Ceux-ci offrent une alternative viable au sein de mêmes suites propriétaires, mais présentent des problèmes d'incompatibilité entre eux et l'échange des données de fabrication est difficile ou impossible. Une solution alternative consiste à utiliser un format générique et neutre. Dans ce domaine, la programmation basée entités offre une opportunité intéressante de description orientée objet des attributs de fabrication du modèle CAO jusqu'à l'exécution sur la MOCN. Le standard STEP-NC, dérivé du standard STEP (Standard for the Exchange of Product data model) aujourd'hui largement répandu dans l'industrie, est un standard émergent offrant de nouvelles possibilités pour la programmation basée entités des MOCN. L'étude bibliographique a permis de mettre en avant certains freins actuels à la diffusion et à l'adoption de la programmation basée entités STEP-NC dans le monde industriel. Les verrous technologiques et idéologiques ont pu être identifiés et ont constitué le socle de notre étude.

Dans un premier temps, nous avons pu montrer que le standard STEP-NC nécessite encore des améliorations pour répondre aux besoins d'échange de données et de programmation des moyens de fabrication modernes. Ceci constitue le premier axe de

notre étude. Nous nous sommes donc intéressés à l'évolution de la programmation code G vers la programmation basée entités et à l'enrichissement du standard STEP-NC. Nous avons proposé l'introduction d'une nouvelle approche avec le concept de CN étendue et détaillons une méthode d'implantation progressive comportant trois étapes en vue de la programmation STEP-NC avancée. De plus, deux contributions principales à l'évolution du standard STEP-NC ont pu être présentées dans le cadre de la participation de l'IRCCyN au comité normatif ISO TC184/SC1/WG7 pour la normalisation STEP-NC ISO 14649. L'une d'entre elles concerne la construction d'un modèle fonctionnel des machines-outils intégré au standard STEP-NC. Les principales contributions à ce modèle concernent l'intégration des caractéristiques CN nécessaires pour la simulation et l'optimisation de la mise en œuvre de la fabrication ainsi que l'intégration des spécificités liées aux machines à structures parallèles. La seconde évolution proposée consiste en l'intégration de nouvelles stratégies d'usinage émergentes au standard STEP-NC. Une construction par stratégies à motifs, consistant en la répétition d'un motif le long d'une courbe guide, est bien adaptée à la description orientée objet STEP-NC. Ces stratégies ont pu être intégrées au modèle hiérarchique du standard STEP-NC. Une chaîne numérique STEP-NC complète a été réalisée pour implémenter, tester et valider les choix effectués dans deux cas d'application : le tréflage et l'usinage trochoïdal.

Dans un second temps, l'étude de l'existant a permis de mettre en évidence un manque d'intégration de la programmation basée entités avec des propositions souvent basées sur la vision actuelle unidirectionnelle descendante de la chaîne numérique CAO/FAO/CN. Cette vision ne permet pas d'exploiter l'ensemble des possibilités nouvelles de la programmation basée entités et peu de propositions s'intéressent à une conception globale de la programmation basée entités au sein du système de fabrication complet. Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'évolution du système de fabrication pour tirer profit de la programmation générique basée entités ainsi qu'à la prise en compte des exigences de portabilité et interopérabilité d'un système à l'autre. Nous proposons un concept complet de système étendu de fabrication intégrée XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System), et détaillons les supports de l'échange des données au sein d'un « pipeline » permettant une communication multidirectionnelle entre les différents modules et unités constitutifs. Avec l'introduction de données STEP-NC génériques et optimisées pour une machine, nous proposons une déclinaison concrète du système XMIS en deux sous-systèmes

complémentaires avec la CAO étendue (XCAD) et la CN étendue (XCNC). Les principaux apports d'un tel système ont pu être mis en avant en termes d'interopérabilité, de portabilité et d'intégration de l'ensemble des activités de fabrication.

Dans un troisième temps, l'étude de la structure des normes STEP-NC fait apparaître de réelles nouveautés pour la programmation de plusieurs procédés à partir d'un standard commun et générique. Il n'existe pas de travaux s'intéressant spécifiquement à cet aspect dont le potentiel demeure cependant insoupçonné, en particulier quant aux possibilités offertes de communication entre les différents experts et outils de simulation du système de fabrication. Le troisième axe de ces travaux contribue à l'intégration du contexte multi-process au sein du système de fabrication. La prise en compte de plusieurs procédés et de leurs spécificités au sein d'une même gamme de fabrication ouvre un champ nouveau d'investigation mais complexifie les études de fabrication. La problématique étudiée, outre l'intégration de la programmation multi-process au sein du système de fabrication, est l'organisation des outils de simulation et d'optimisation pour pouvoir pleinement exploiter les possibilités de la programmation multi-process. Nous proposons une nouvelle approche pour l'intégration de gamme multi-process avec STEP-NC et la mise en place du concept d'espaces de simulation. À partir de là, nous proposons une méthode d'implémentation des outils de simulation multi-process au sein du système de fabrication et de la chaîne numérique intégrée STEP-NC. Les apports de cette étude ont pu être mis en avant à travers les nouvelles possibilités offertes pour l'intégration et l'amélioration des échanges entre les différents modules de simulation du système de fabrication ainsi que dans l'initialisation d'une démarche pour aborder l'environnement complexe multi-process.

Dans un quatrième temps, nous avons pu cibler un manque de mise en œuvre et de démonstrations sur des moyens industriels des possibilités de la programmation basée entités. L'ensemble des propositions universitaires sont souvent conceptuelles ou validées sur des moyens de laboratoire. Les propositions impliquant des industriels demeurent assez éloignées des possibilités initialement souhaitées par l'introduction de la programmation basée entités. Le quatrième axe de nos travaux répond à une problématique de mise en œuvre des concepts proposés au cours des axes de recherche précédents dans un but de validations mais aussi de démonstrations sur des moyens

industriels. Nous avons développé une plate-forme complète intégrant la programmation basée entités du modèle CAO jusqu'à la pièce usinée (plate-forme SPAIM : STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) sur des moyens industriels. Celle-ci constitue un outil de validation et de démonstration des concepts proposés. Nous avons été amenés à mettre en œuvre l'ensemble de la chaîne numérique STEP-NC dans un contexte multi-process, avec des pièces test réalisées par fraisage, par ajout de matière ou en associant ces deux procédés. Les apports de cette étude ont pu être mis en avant à travers la validation des concepts présentés dans les parties précédentes de cette thèse (implémentation des stratégies à motifs, intégration du système de fabrication avec la CN étendue, mise en œuvre dans un contexte multi-process, etc.). Cette plate-forme représente également un apport de démonstration des opportunités offertes par la programmation basée entités auprès des industriels désireux de voir concrètement sa mise en œuvre.

Ces travaux ont permis d'explorer les concepts de la programmation basée entités, son intégration au sein d'un système de fabrication complet, de l'étendre au contexte multi-process et de valider nos propositions par une plate-forme d'application sur des moyens industriels.

7.2 Conclusions et discussions

Nous avons, à travers ces travaux de thèse, répondu à un certain nombre de problématiques et verrous technologiques associés, en particulier avec nos propositions concrètes d'intégration de la programmation basée entités au sein du système de production. Au-delà des verrous technologiques, il demeure un certain nombre de verrous idéologiques qui ne peuvent être levés que par un travail de communication et de démonstration pratique de l'apport de la programmation basée entités. Notre approche est demeurée centrée sur l'aspect technologique de la problématique. D'autres aspects, et en particulier l'aspect économique de telles mutations de la chaîne numérique, engendrent souvent une certaine réticence quant au changement. Il existe, sur cet aspect, des efforts à fournir, impliquant universitaires et industriels, pour montrer la viabilité du projet et les retombées directes au niveau de l'entreprise. Avant que cette étape ne puisse être franchie, un mûrissement des concepts et du standard émergent STEP-NC sont nécessaires pour pouvoir proposer un environnement adapté à l'entreprise de demain.

Il existe ainsi encore des limitations à l'emploi et à la démocratisation de STEP-NC dans le milieu industriel. Parmi celles-ci, certaines concernent encore directement le standard et d'autres son utilisation actuelle. Les travaux réalisés nous ont permis d'identifier certaines barrières empêchant encore le déploiement de STEP-NC :

- Les protocoles STEP-NC supportent actuellement un nombre encore trop restreint de procédés de fabrication et il existe une demande pour élargir son champ d'application et permettre la mise en commun globale des ressources de production entre une entreprise et ses sous-traitants. Au sein des procédés supportés, il demeure des manques pour l'intégration de l'ensemble des données spécifiques aux corps de métiers impliqués (comme par exemple le traitement des tolérances et spécifications, l'intégration des montages d'usinage, etc.). Ces manques sont liés à la jeunesse du standard et nécessitent des travaux d'amélioration, de mise en œuvre et de validation.
- Il existe peu de développements et de solutions commerciales supportant des applications permettant la programmation basée entités. Il est en effet aujourd'hui nécessaire de tout développer pour pouvoir mettre en œuvre ce type de programmation, ce qui représente un investissement conséquent avant même de pouvoir en tirer quelques bénéfices. Ainsi, les apports au niveau de l'ingénierie collaborative et de l'ingénierie-production en boucle fermée sont difficilement validables concrètement et les démonstrations de ces applications pratiques sont difficiles à mettre en place.
- Bien que STEP-NC apporte des informations plus riches au niveau de la machine, l'utilisation du code G pour l'exécution sur des moyens industriels demeure souvent nécessaire pour limiter l'investissement en termes de développement. Celui-ci restreint aujourd'hui les possibilités de contrôle intelligent, d'autonomie et adaptation de la production en temps réel. Des solutions peuvent être envisagées du côté des CN ouvertes ou par l'implication directe de constructeurs de CN.

Au-delà de ces aspects limitant liés à l'utilisation du standard émergent STEP-NC, il est intéressant de retenir les principaux concepts véhiculés par la programmation basée entités. Il est difficile d'imaginer un avenir à long terme pour la programmation actuelle code G des machines outils, dans la mesure où celui-ci est un verrou majeur à l'interopérabilité des systèmes de production au sein de l'entreprise étendue. Les évolutions dans ce domaine nécessitent cependant des mutations profondes et des investissements conséquents, les plaçant sur des échelles de temps peu communes à

celles des évolutions des technologies de l'information courantes, c'est-à-dire certainement de l'ordre de la décennie. Dans un futur plus proche, il est fortement probable que des éditeurs commerciaux développent leurs propres langages de programmation basés entités, permettant ainsi un flux multidirectionnel des données au sein de l'ensemble de leur suites numériques et permettant un traitement du modèle jusqu'à la pièce usinée conforme. Les concepts proposés dans cette thèse ne sont pas restreints à l'utilisation et au développement du standard STEP-NC mais s'intéressent de manière plus générale à la programmation basée entités ainsi qu'à sa mise en œuvre. Ils ouvrent un champ vaste d'investigation encore peu exploré et initient des bases de réflexions et d'implémentations pratiques. La gestion et l'échange des données représentent un enjeu capital pour l'avenir de nos industries. Le domaine de la production est l'un des premiers concernés par ses évolutions et la demande industrielle est forte.

7.3 Perspectives

La remarquable ouverture des échanges mondiaux durant les 25 dernières années a littéralement changé le paysage à la fois de la compétition entre les industries manufacturières et les attentes du marché. L'entreprise étendue produit et vend dans un environnement globalisé avec 6 milliards de clients potentiels. Dans ce contexte de concurrence exacerbée entre industries des pays aux économies développées et celle de pays à faibles coûts de main-d'œuvre, les performances de réponse à la demande et aux exigences changeantes des marchés deviennent un enjeu capital. Ceci se traduit au niveau de la production par la nécessité d'individualisation des pièces produites pour s'adapter aux exigences spécifiques de chaque consommateur, et d'adaptation rapide à une demande difficilement prévisible. Un challenge majeur est ainsi pour les entreprises de tendre vers la « première pièce correcte rapidement ». Le développement du système de production associé à ces perspectives ne peut être envisageable sans de larges progrès au niveau de l'adaptabilité (flexibilité et auto-apprentissage) et de la fluidification des échanges temps réels entre les différents acteurs du projet. Pour ceci, le développement du système étendu de fabrication intégrée initié durant ces travaux de thèse présente des perspectives intéressantes qui doivent, à ce jour, être accompagnés des développements adéquats. Ainsi, les perspectives suivantes peuvent être envisagées :

- Intégration complète et automatisée des procédés de fabrication additive et tournage déjà initiée. Cela permettrait de pouvoir travailler sur un environnement totalement multi-process et ouvrirait la voie au développement et à la validation de modules de simulation inter-process au sein de la CN étendue.
- Ajout de nouveaux procédés au sein des standards STEP-NC (formage incrémental, etc.).
- Travail sur la description AP224 des entités, avec la proposition d'exemples concrets de définition d'entités complexes bien adaptées à la fabrication. Ceci constitue en effet un manque aujourd'hui pour la programmation basée entités de la fabrication de pièces complexes issues de l'industrie.
- Suppression du code G au sein de la plate-forme SPAIM et intégration de la méthode ICAM pour mettre en avant l'adaptation en ligne des trajectoires. Il serait alors aussi possible de développer des applications innovantes de fabrication en boucle fermée avec l'introduction de l'inspection embarquée ou par retour des différents capteurs.
- Participation active aux comités ISO de normalisation pour l'amélioration du standard, en particulier dans le cas de l'intégration des spécifications et tolérances géométriques et mises en place d'applications directe au sein de la plate-forme SPAIM.
- Efforts maintenus de diffusions et démonstrations sur des moyens industriels pour l'implication des acteurs locaux et internationaux.

Les perspectives de ces travaux pourront s'inscrire dans une dynamique pour la promotion et l'amélioration des possibilités de la programmation basée entités et de l'ensemble des outils associés. Alors que l'impulsion des industriels est un point clé à l'utilisation et à la démocratisation de celle-ci, des projets d'envergure européenne ou mondiale constituent des opportunités de progrès considérables. Dans ce cadre, le projet FOFdation (Factory of the Future foundation) regroupe un nombre important de grands industriels (Airbus, Siemens, Fiat, Delcam, etc.) et d'universitaires (EPFL, Centrale Nantes, Université de Patras, etc.). Il a pour objectifs, entre autre, l'intégration de la production au sein de l'usine numérique et la mise au point d'outils de production intelligents avec par exemple, le développement de contrôleurs de nouvelle génération intégrant des stratégies d'auto-apprentissage et d'interpolation directe des trajectoires pour lesquelles la programmation basée entités est bien adaptée.

Avec le recul, il apparaît que la programmation basée entités ne se résume pas qu'au standard international STEP-NC pour l'échange des données de fabrication. Elle concerne l'intégration complète de la production au sein de l'entreprise, la gestion des données de fabrication, le travail collaboratif au sein de l'ensemble des départements de l'entreprise et la résolution des problèmes de production sur un plan technique comme économique. Cela représente un ensemble de défis majeurs et les travaux menés actuellement constitueront les fondations des solutions d'avenir. Il conviendra donc de poursuivre dans cette voie.

Bibliographie

- [Ahmad'10] Ahmad, R. (2010). "Programmation intelligente (STEP-NC) des machines-outils hybrides multifonctionnelles." Thèse de doctorat en cours, Ecole Centrale de Nantes.
- [Ali'05] Ali, L., Newman, S. and Petzing, J. (2005). "Development of a STEP-compliant inspection framework for discrete components." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol 219 (7), pp 557-563.
- [Allen'05] Allen, R. D., Harding, J. A. and Newman, S. T. (2005). "The application of STEP-NC using agent-based process planning." International Journal of Production Research, Vol 43 (4), pp 655 - 670.
- [Altintas'96] Altintas, Y., Newell, N. and Ito, M. (1996). "Modular CNC Design for Intelligent Machining, Part 1: Design of a Hierarchical Motion Control Module for CNC Machine Tools." Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 118 (4), pp 506-513.
- [Altintas'05] Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M. and Witt, S. (2005). "Virtual Machine Tool." CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol 54 (2), pp 115-138.
- [Amaitik'07] Amaitik, S. and Kiliç, S. (2007). "An intelligent process planning system for prismatic parts using STEP features." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 31 (9), pp 978-993.
- [Anderson'08] Anderson, D., Ed. (2008). Design for manufacturability and concurrent engineering C. I. M. Pr.
- [Arezoo'00] Arezoo, B., Ridgway, K. and Al-Ahmari, A. M. A. (2000). "Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system." Computers in Industry, Vol 42 (1), pp 43-58.
- [Asato'02] Asato, O. L., Kato, E. R. R., Inamasu, R. Y. and Porto, A. J. V. (2002). "Analysis of open CNC architecture for machine tools." Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol 24 pp 208-212.
- [Babic'08] Babic, B., Nesic, N. and Miljkovic, Z. (2008). "A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition." Computers in Industry, Vol 59 (4), pp 321-337.

-
- [Bacha'02] Bacha, R. (2002). "De la gestion des données techniques pour l'ingénierie de production. Référentiel du domaine et cadre méthodologique pour l'ingénierie des systèmes d'information techniques en entreprise." Thèse de doctorat, École Centrale Paris.
- [Bonnard'08] Bonnard, R., Mognol, P. and Hascoët, J. Y. (2008). Rapid Prototyping Project Description in STEP-NC Model, Proceedings of 6th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Naples (Italy),
- [Boogert'96] Boogert, R. M., Kals, H. J. J. and van Houten, F. J. A. M. (1996). "Tool paths and cutting technology in computer-aided process planning." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 11 (3), pp 186-197.
- [Bourdichon'94] Bourdichon, P. (1994). "L'ingénierie simultanée et la gestion d'informations", Collection systèmes d'information.
- [Bracht'05] Bracht, U. and Masurat, T. (2005). "The Digital Factory between vision and reality." Computers in Industry, Vol 56 (4), pp 325-333.
- [Brecher'06] Brecher, C., Vittr, M. and Wolf, J. (2006). "Closed-loop CAPP/CAM/CNC process chain based on STEP and STEP-NC inspection tasks." International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol 19 pp 570-580.
- [Brecher'09] Brecher, C., Lohse, W. and Vittr, M. (2009). Module-based Platform for Seamless Interoperable CAD-CAM-CNC Planning, in edited by pp 439-462.
- [Brown'06] Brown, S. (2006). "CRM Customer Relationship Management : la gestion de la relation client ", Village Mondial.
- [Chanal'09] Chanal, H., Duc, E., Hascoët, J. Y. and Ray, P. (2009). "Reduction of a parallel kinematics machine tool inverse kinematics model with regard to machining behaviour." Mechanism and Machine Theory, Vol 44 (7), pp 1371-1385.
- [Chauhan'03] Chauhan, S. s. (2003). " d'approvisionnement: approches stratégique et tactique." Université de Metz.
- [Choi'06] Choi, I., Suh, S., Kim, K., Song, M., Jang, M. and Lee, B. (2006). "Development process and data management of TurnSTEP: a STEP-compliant CNC system for turning." International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol 19 pp 546-558.

- [Comp'10] Comp (2010) "Compumotor." Accessed 2010, from www.compumotor.com.
- [Crnkovic'03] Crnkovic, I., Asklund, U. and Dahlqvist, A. (2003). "Implementing and integrating product data management and software configuration management", Artech House.
- [Debaecker'04] Debaecker, D. (2004). "PLM, la gestion collaborative du cycle de vie des produits", Hermès - Lavoisier.
- [Delmia'10] Delmia. (2010). "Delmia world news." Date de consultation: Juin 2010, Site: www.delmia.com.
- [Denkena'02] Denkena, H. K., Tönshoff, J., Selle, A., Storr, S., Heusinger, S. and Rogers, G. (2002), Offline-Berechnung der Zerspankräfte in der NC-Programmierung. orhersage der Zerspankräfte beim HSC-Schlichtfräsen.
- [Devireddy'99] Devireddy, C. R. (1999). "Feature-based modelling and neural networks-based CAPP for integrated manufacturing." International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol 12 (1), pp 61-74.
- [Dugas'02] Dugas, A. (2002). "CFAO et UGV : Simulation d'usinage de formes complexes." Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes.
- [Dugas'03] Dugas, A., Lee, J. J., Terrier, M. and Hascoet, J.-Y. (2003). "Development of a machining simulator considering machine behavior." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol 217 (9), pp 1333-1339.
- [ESPRIT'00] ESPRIT (2000) "Newsletter issue 2." Accessed 2010, from www.step-nc.org.
- [Esprit'10] Esprit. (2010). "Dp Technology Corp." Date de consultation: Juin 2010, Site: www.dptechnology.com.
- [Etude'06] Etude, N. N. (2006), Wirtschaftsfaktor Konstruktion - Ungenutztes Potential im Engineering: Status, Trends und Herausforderungen bei CAD und PDM.
- [Feeney'03] Feeney, A. B., Kramer, T. R., Proctor, F., Hardwick, M. and Loffredo, D. (2003). STEP-NC Implementation - ARM or AIM ?, ISO TC184/SC4 WG3 N1223, mars 2003.
- [Fichtner'06] Fichtner, D., Nestler, A., Dang, T. N., Schulze, A., Carlsen, U., Schreiber, S. and Lee, S. W. (2006). "Use of agents and neural networks for acquisition and preparation of distributed NC information to support NC

- planning." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 19 (6), pp 581-592.
- [Fortin'10] Fortin, C. (2010). "Le PLM et le MPM." Date de consultation, Juin 2010, Site: <http://www.af-micado.com/>.
- [Fortin'04] Fortin, E., Chatelain, J.-F. and Rivest, L. (2004). "An innovative software architecture to improve information flow from CAM to CNC." *Computers & Industrial Engineering*, Vol 46 (4), pp 655-667.
- [Funchal'07] Funchal (2007), ISO TC184/SC4 , Machine tool data model for general manufacturing processes : new work item proposal. Funchal, Portugal, STEP Tools Inc.
- [Geib'00] Geib, J.-M. and Merle, P. (2000). "CORBA : des concepts à la pratique". Paris, FRANCE, Techniques de l'ingénieur.
- [Guillotini'07a] Guillotin, D. (2007a). "Optimisation du vidage de poche." Mémoire CNAM, Conservatoire National des Arts et Métiers - IRCCyN.
- [Guillotini'07b] Guillotin, D. (2007b). "Optimisation du vidage de poche." Mémoire CNAM, Conservatoire National des Arts et Métiers - IRCCyN.
- [Han'00] Han, J., Pratt, M. and Regli, W. C. (2000). "Manufacturing Feature Recognition from Solid Models: A status report." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol 16 pp 782-796.
- [Hardwick'02] Hardwick, M. (2002), Digital manufacturing using STEP-NC, Technical. Paper - Society of Manufacturing Engineers.
- [Hardwick'06] Hardwick, M. and Loffredo, D. (2006). "Lessons learned implementing STEP-NC AP-238." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 19 pp 523-532.
- [Hascoet'06] Hascoet, J.-Y. and Rauch, M. (2006). A new approach of the tool path generation in manufacturing operations using CNC data, proceedings of the International Conference on High Speed milling, Suzhou (China), 11-13 mai 2006, pp 101-113.
- [Hascoet'05] Hascoet, J. Y. and Rauch, M. (2005). "Remote Control of a parallel kinematics machine tool in an e-manufacturing context." *Journal of Machine Engineering*, Vol 5 (1-2), pp 95-104.
- [Idef0] Idef0. "Integration Definition for Function Modeling." Date de consultation, Site: <http://www.idef.com/idef0.htm>.
- [IEC'99] IEC (1999), Function Blocks for Industrial Process Measurement and Control Systems (Part-1: Architecture), IEC TC65/WG6.

- [IGES'80] IGES (1980), Initial Graphics Exchange Specification, American National Standard Institute.
- [IMS'03] IMS (2003), IMS STEP-NC Consortium, STEP-compliant data interface for numerical controllers, Technical report 3 of IMS project.
- [Irepa-laser] Irepa-laser. "Irepa-laser Power CLAD." Date de consultation, Site: www.irepa-laser.com/.
- [ISO6983'82] ISO6983 (1982), ISO 6983 - International Standard Organization. Numerical control of machines - Program format and definition of address words, TC 184/SC 1.
- [ISO10303-11'94] ISO10303-11 (1994), ISO 10303-238 - Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 11: Méthodes de description: Manuel de référence du langage EXPRESS, TC 184/SC 4.
- [ISO10303-21'02] ISO10303-21 (2002). "Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure." Vol pp
- [ISO10303-28'08] ISO10303-28 (2008), Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 28: Implementation methods: XML representations of EXPRESS schemas and data, using XML schemas,
- [ISO10303-41'05] ISO10303-41 (2005), Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 41: Ressources génériques intégrées: Principes de description et de support de produits, ISO TC 184/SC4.
- [ISO10303-42'03] ISO10303-42 (2003), Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 42: Ressource générique intégrée: Représentation géométrique et topologique, ISO TC 184/SC4.
- [ISO10303-105'96] ISO10303-105 (1996), Systèmes d'automatisation industrielle et intégration -- Représentation et échange de données de produits -- Partie 105: Ressource d'application intégrée: Cinématique, ISO TC 184/SC4.
- [ISO10303-219'07] ISO10303-219 (2007), ISO 10303-238 - Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part

238: Application protocol: Application interpreted model for computerized numerical controllers, TC 184/SC 4.

[ISO10303-224'06] ISO10303-224 (2006), ISO 10303-224 - Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features, ISO TC 184/SC 4.

[ISO10303-238'07] ISO10303-238 (2007), ISO 10303-238 - Norme ISO 10303-238 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration. Représentation et échange de données de produits. Partie 238: Protocole d'application : Modèle d'application interprété pour les directeurs de commande numérique, ISO TC 184/SC4/WG3 N1534.

[ISO10303] ISO10303 "- Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange --." Vol pp

[ISO14649-1'03] ISO14649-1 (2003), ISO 14649 Part 1 - Industrial automation systems and integration -- Physical device control -- Data model for computerized numerical controllers -- Part 1: Overview and fundamental principles, TC 184/SC 1.

[ISO14649-10'04] ISO14649-10 (2004), ISO 14649 Part 10 - Industrial automation systems and integration - physical device control - data model for computerized numerical controllers - Part 10: general process data, ISO TC 184/SC1/WG7/FDIS.

[ISO14649-11'04] ISO14649-11 (2004), ISO 14649 Part 11 - Industrial automation systems and integration -- Physical device control -- Data model for computerized numerical controllers -- Part 11: Process data for milling, TC 184/SC 1.

[ISO14649-12'03] ISO14649-12 (2003), 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, TC 184/SC 1.

[ISO14649-13'03] ISO14649-13 (2003), ISO14649 Part13 - Industrial automation systems and integration—Physical device control-data model for computerized numerical controllers—Part 13: Process data for Wire-EDM, TC 184/SC 1.

[ISO14649-16'04] ISO14649-16 (2004), ISO 14649 Part 16 - Industrial automation systems and integration -- Physical device control -- Data model for

- computerized numerical controllers -- Part 16: data for touch probing based inspection, TC 184/SC 1.
- [ISO'10] ISO. (2010). "International Standards Organization." Date de consultation: Juin 2010, Site: www.iso.org.
- [Jeong'04] Jeong, D. and Baik, D.-K. (2004). "Incremental data integration based on hierarchical metadata registry with data visibility." *Information Sciences*, Vol 162 (3-4), pp 147-181.
- [Jerard'06] Jerard, R. B. and Ryou, O. (2006). "NCML: a data exchange format for internet-based machining." *Int. J. Comput. Appl. Technol.*, Vol 26 (1/2), pp 75-82.
- [Jurrens'95] Jurrens, K. K., Fowler, J. E. and Algeo, M. B. (1995), *Modeling of Manufacturing Resource Information, Requirements Specification*, National Institute of Standards and Technology. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) - 5707.
- [Kamrani'08] Kamrani, A. K. and Nasr, E. A. (2008). "Collaborative Engineering: Theory and Practice", Springer.
- [Kerbrat'09] Kerbrat, O. (2009). "Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication." Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [Kerninon'08a] Kerninon, J., Mognol, P. and Hascoet, J.-Y. (2008a), *Frittage Laser de poudres vraie matière pour la fabrication de pièces multimatériaux*, Séminaire PREMS, Ecole Centrale de Nantes.
- [Kerninon'08b] Kerninon, J., Mognol, P., Hascoet, J.-Y. and Legonidec, C. (2008b). Effect of path strategies on metallic parts manufactured by additive process, proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (Texas), pp 352-361.
- [Kerninon'09] Kerninon, J., Mognol, P. and Hascoet, J.-Y. (2009). Global approach to design and manufacture Direct Parts, proceedings of the 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria (Portugal), pp 111-116.
- [Khalkhali'02] Khalkhali, I. E. (2002). "Système intégré pour la modélisation, l'échange et le partage des données de produit." Thèse de Doctorat, INSA de LYON

- [Kramer'06] Kramer, T., Proctor, F., Xu, X. and Michaloski, J. (2006). "Run-time interpretation of STEP-NC: implementation and performance." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 19 pp 495-507.
- [Kuhn'06] Kuhn, W. (2006). Digital factory: simulation enhancing the product and production engineering process, Proceedings of the 38th conference on Winter simulation, Monterey, California, Winter Simulation Conference,
- [Kumar'10] Kumar, V. A. and Sunil, R. (2010). "A review of machining feature recognition methodologies." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 23 (4), pp 353-368.
- [Kurita'05] Kurita, T. and Hattori, M. (2005). "Development of new-concept desk top size machine tool." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 45 (7-8), pp 959-965.
- [Laguionie'07] Laguionie, R. (2007). "Programmation avancée des machines outils : implémentation de l'usinage trochoïdal et du tréflage dans la chaîne numérique STEP-NC." Thèse de Master, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes.
- [Laguionie'08a] Laguionie, R., Rauch, M. and Hascoet, J.-Y. (2008a). "Toolpaths programming in an intelligent STEP-NC manufacturing context." *Journal of Machine Engineering*, Vol 8 (1), pp 33- 43.
- [Laguionie'08b] Laguionie, R., Rauch, M. and Hascoet, J.-Y. (2008b). Intégration de stratégies à motifs dans le standard STEP-NC : application à l'usinage trochoïdal, Assises Machines et Usinage Grande Vitesse 2008, Nantes, 2008.
- [Laguionie'08c] Laguionie, R., Rauch, M., Hascoet, J.-Y. and Tischadou, S. (2008c). Programmation : quels développements?, Journée d'information sur l'usinage à grande vitesse de l'Aluminium et des Composites, Cetim, Senlis, 24 janvier 2008.
- [Laguionie'09a] Laguionie, R., Hascoet, J.-Y. and Rauch, M. (2009a). Une plateforme STEP-NC pour la programmation avancée et intelligente des machines outils, proceedings of the 11ème coll. Nat. AIP PRIMECA, La Plagne (France), pp
- [Laguionie'09b] Laguionie, R., Hascoet, J.-Y. and Suh, S.-H. (2009b). A new STEP-NC based CNC interface for High Speed Machining, proceedings of the 12th Conference on Modelling of Machining Operations, San Sebastian, Spain, pp 443-450.

- [Laguionie'09c] Laguionie, R., Rauch, M. and Hascoet, J.-Y. (2009c). Simulation and optimization in a multi-process environment using STEP-NC, proceedings of the 7th IEE International Conference on Control and Automation, Christchurch, New Zealand, 9-11 December, pp 2384-2391.
- [Laguionie'09d] Laguionie, R., Rauch, M. and Hascoet, J.-Y. (2009d). Experience feed-back on integrating ISO 14649 at IRCCyN 57th ISO TC 184/SC1 Plenary Meeting, Bath (UK),
- [Laguionie'10] Laguionie, R., Rauch, M. and Hascoet, J.-Y. (2010). A multi-process manufacturing approach based on STEP-NC data model, proceedings of the 20th CIRP Design Conference, Nantes, 19-21 April, pp
- [LeDuigou'10] LeDuigou, J. (2010). "Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue. Application aux PME mécaniciennes." Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [Lee'95] Lee, K.-H. and Jung, M.-Y. (1995). "Flexible process sequencing using Petri net theory." *Computers & Industrial Engineering*, Vol 28 (2), pp 279-290.
- [Lee'03] Lee, W. and Bang, Y.-B. (2003). "Design and implementation of an ISO14649-compliant CNC milling machine." *International Journal of Production Research*, Vol 41 (13), pp 3007 - 3017.
- [Lee'06] Lee, W., Bang, Y., Ryou, M., Kwon, W. and Jee, H. (2006). "Development of a PC-based milling machine operated by STEP-NC in XML format." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 19 pp 593-602.
- [Leon'09] Leon, N. (2009). "The future of computer-aided innovation." *Computers in Industry*, Vol 60 (8), pp 539-550.
- [Lin'97] Lin, A. C. and Wei, C.-L. (1997). "Automated selection of cutting tools based on solid models." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 72 (2), pp 317-329.
- [Liu'04] Liu, R.-l., Zhang, C.-r., Zhang, Y.-c. and Wang, R. (2004). "Techniques for Interfacing CNCs with STEP-NC." *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol 10 (6), pp 641-645.
- [Liu'06] Liu, R., Zhang, C. and Newman, S. (2006). "A framework and data processing for interfacing CNC with AP238." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 19 pp 516-522.

- [Lubell'02] Lubell, J. and Frechette, S. (2002). "XML Representation of STEP Schemas and Data." *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol 2 (1), pp 69-71.
- [Lutz'97] Lutz, P. and Sperling, W. (1997). OSACA—the vendor neutral control architecture, proceedings of the European Conference on Integration in Manufacturing liM, Selbstverlag der TU Dresden, Dresden, pp
- [Ma'99] Ma, W., Li, J. and Rong, Y. (1999). "Development of Automated Fixture Planning Systems." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 15 (3), pp 171-181.
- [Maeder'02] Maeder, W., Van Khai, K., Richard, J. and Stark, J. (2002). Standardization of the Manufacturing Process: The IMS STEP-NC project, IPLnet Workshop, Saas-Fee (Switzerland), September 10-11.
- [Mahesh'07] Mahesh, M., Ong, S. K., Nee, A. Y. C., Fuh, J. Y. H. and Zhang, Y. F. (2007). "Towards a generic distributed and collaborative digital manufacturing." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 23 (3), pp 267-275.
- [Mantyla'96] Mantyla, M., Nau, D. and Shah, J. (1996). "Challenges in feature-based manufacturing research." *Commun. ACM*, Vol 39 (2), pp 77-85.
- [Martin'05] Martin, R. (2005), *International Standards for System Integration*. Rochester, NY: International Council on Systems Engineering
- [Mazak'10] Mazak. (2010). "Mazak Corp." Date de consultation: Juin 2010, Site: www.mazak.com.
- [Michael'01] Michael, J. P. (2001). "Introduction to ISO 10303---the STEP Standard for Product Data Exchange." *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol 1 (1), pp 102-103.
- [Mikell'07] Mikell, P. G. (2007). "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing", Prentice Hall Press.
- [Miles'98] Miles, P. (1998). "Open architecture: forecasting the adoption wave." *Robotics World*, Vol 16 (2), pp 23-29.
- [Minhat'09] Minhat, M., Vyatkin, V., Xu, X., Wong, S. and Al-Bayaa, Z. (2009). "A novel open CNC architecture based on STEP-NC data model and IEC 61499 function blocks." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 25 (3), pp 560-569.
- [Miriad] Miriad. "Miriad 3D." Date de consultation: Septembre 2010, Site: www.myrriadviewer.com/.

- [Mokhtar'08] Mokhtar, A., Xu, X. and Lazcanotegui, I. (2008). "Dealing with feature interactions for prismatic parts in STEP-NC." *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol pp
- [Molina'99] Molina, A. and Bell, R. (1999). "A manufacturing model representation of a flexible manufacturing facility." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol 213 (3), pp 225-246.
- [Morad'99] Morad, N. and Zalzal, A. M. S. (1999). "Genetic algorithms in integrated process planning and scheduling." *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol 10 (2), pp 169-179.
- [MTConnect'10] MTConnect. (2010). "MTConnect TM." Date de consultation: January 2010, 2010, Site: www.mtconnect.org.
- [Nassehi'06a] Nassehi, A. (2006a). "STEP-NC compliant process planning as an enabler for adaptive global manufacturing." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 22 (5-6), pp 456.
- [Nassehi'06b] Nassehi, A., Allen, R. D. and Newman, S. T. (2006b). "Application of mobile agents in interoperable STEP-NC compliant manufacturing." *International Journal of Production Research*, Vol 44 (18), pp 4159-4174.
- [Nassehi'06c] Nassehi, A., Newman, S. T. and Allen, R. D. (2006c). "The application of multi-agent systems for STEP-NC computer aided process planning of prismatic components." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 46 (2), pp 559-574.
- [Nassehi'09] Nassehi, A. and Vichare, P. (2009). A STEP-NC Compliant Methodology for Modelling Manufacturing Resources, in edited by pp 261-281.
- [Neuner'97] Neuner, M. (1997), *Selecting a CNC system - Factors impacting machine tool productivity*. GE Fanuc Automation N.A., Published as GE Fanuc Document GFF-0112.
- [Newman'07] Newman, S. T., Ali, L., Brail, A., Brecher, C., Klemm, P., Liu, R., Nassehi, A., Nguyen, V. K., Proctor, F., Rosso, R. S. U., Stroud, I., Suh, S. H., Vittr, M., Wang, L. and Xu, X. W. (2007). *The Evolution of CNC Technology from Automated Manufacture to Global Interoperable Manufacturing*, The 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007), Toronto, Canada, 22-24 July 2007.

- [Newman'08] Newman, S. T., Nassehi, A., Xu, X. W., Rosso Jr, R. S. U., Wang, L., Yusof, Y., Ali, L., Liu, R., Zheng, L. Y., Kumar, S., Vichare, P. and Dhokia, V. (2008). "Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 24 (6), pp 699-708.
- [Pateloup'08] Pateloup, S., Bonnemains, T., Chanal, H., Bouzgarrou, B. C., Duc, E. and Ray, P. (2008). "Machining Performance Optimization of Parallel Kinematic Machines Tools with Regard to their Anisotropic Behaviour." *Journal of Machine Engineering*, Vol 8 (4), pp 13-24.
- [Peak'04] Peak, R. S., Lubell, J., Srinivasan, V. and Waterbury, S. C. (2004). "STEP, XML, and UML: Complementary Technologies." *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol 4 (4), pp 379-390.
- [Peng'98] Peng, T.-K. and Trappey, A. J. C. (1998). "A step toward STEP-compatible engineering data management: the data models of product structure and engineering changes." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 14 (2), pp 89-109.
- [Pessoles'09] Pessoles, X. and Tournier, C. (2009). "Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 209 (7), pp 3665-3673.
- [PowerMILL] PowerMILL. "Delcam." Date de consultation: Septembre 2010, Site: <http://www.powermill.com>.
- [PowerSHAPE] PowerSHAPE. "Delcam " Date de consultation: Septembre 2010, Site: <http://www.powershape.com>.
- [Prevost'08] Prevost, D., Lavernhe, S. and Lartigue, C. (2008). "Feed drive simulation for the prediction of the tool path follow up in High Speed Machining." *Journal of Machine Engineering*, Vol 8 (4), pp 32-42.
- [Pritschow'01] Pritschow, G., Altintas, Y., Jovane, F., Koren, Y., Mitsuishi, M., Takata, S., van Brussel, H., Weck, M. and Yamazaki, K. (2001). "Open Controller Architecture - Past, Present and Future." *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol 50 (2), pp 463-470.
- [Rauch'07] Rauch, M. (2007). "Optimisation de la programmation des MOCN - Application aux machines à structure parallèle." Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes.
- [Rauch'08] Rauch, M., Lavernhe, S. and Hascoet, J.-Y. (2008). *Connaissance du comportement de la machine pour la programmation ; Nouvelles stratégies*

- d'usinage et Simulation, Journée d'information sur l'usinage à grande vitesse de l'Aluminium et des Composites, Cetim, Senlis, 24 janvier 2008.
- [Rauch'09a] Rauch, M., Duc, E. and Hascoet, J.-Y. (2009a). "Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 49 (5), pp 375-383.
- [Rauch'09b] Rauch, M., Hascoet, J.-Y., Hamann, J.-C. and Plenel, Y. (2009b). "Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications." *Computer-Aided Design*, Vol 41 (12), pp 877-885.
- [Rauch'09c] Rauch, M., Laguionie, R. and Hascoet, J.-Y. (2009c). Achieving a STEP-NC Enabled Advanced NC Programming Environment, in "Advanced Design and Manufacturing Based on STEP", edited by X. Xu and A. Y. C. Nee, Springer London, pp 197-214.
- [Rauch'09d] Rauch, M., Laguionie, R., Hascoet, J.-Y. and Xu, X. (2009d). "Enhancing CNC Manufacturing Interoperability with STEP-NC." *Journal of Machine Engineering*, Vol 9 (4), pp 26-37.
- [Ray'06] Ray, S. and Jones, A. (2006). "Manufacturing interoperability." *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol 17 (6), pp 681-688.
- [Richard'04] Richard, J., Nguyen, V. K. and Stroud, I. (2004). Standardisation of the Manufacturing Process: IMS/EU STEP-NC project IMS International Forum 2004 / May 17th - 19th, Como – Italy,
- [Ritou'06] Ritou, M. (2006). "Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la broche." Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes.
- [Rivette'07] Rivette, M. (2007). "Méthodologie d'obtention d'outillage rapide par l'assemblage de composants élémentaires hybrides." Thèse de doctorat, ENS Cachan Antenne de Bretagne.
- [Rosso'04] Rosso, R. S. U., Newman, S. T. and Rahimifard, S. (2004). The adoption of STEP-NC for the manufacture of asymmetric rotational components, proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B- *Journal of Engineering Manufacture*, pp 1639--1644.
- [Roucoules'06] Roucoules, L., Yannou, B. and Eynard, B. (2006). "Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits", Hermes Science Publications.

- [Rumbaugh'91] Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F. and Lorenzen, W. (1991). "Object-oriented modeling and design", Prentice-Hall, Inc.
- [Sardet'99] Sardet, E. (1999). "Intégration des approches modélisation conceptuelle et structuration documentaire par la saisie, la représentation, l'échange et l'exploitation d'informations : Application aux composants de catalogues industriels." Université de Poitiers.
- [Seo'98] Seo, T. I. (1998). "Intégration des effets de déformation d'outil en génération de trajectoires d'usinage." Thèse de doctorat, Université de Nantes / Ecole Centrale de Nantes.
- [Siemens'08a] Siemens. (2008a). "Documentation suite Siemens PLM." Date de consultation, Site: www.plm.automation.siemens.com.
- [Siemens'08b] Siemens. (2008b). "Documentation technique 840D." Date de consultation, Site: www.automation.siemens.com.
- [Sokolov'06] Sokolov, A., Richard, J., Nguyen, V. K., Stroud, I., Maeder, W. and Xirouchakis, P. (2006). "Algorithms and an extended STEP-NC-compliant data model for wire electro discharge machining based on 3D representations." International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol 19 (6), pp 603 - 613.
- [Stark'04] Stark, J. (2004). "Product Lifecycle Management: Paradigm for 21st century Product Realisation", Springer.
- [STEPTools'10] STEPTools. (2010). "STEP Tools Inc." Date de consultation: Mai 2010, Site: www.steptools.com.
- [Storr'02] Storr, A., Pritschow, G., Heusinger, S. and Azotov, A. (2002). "Workingstep planning for turning with STEP-NC: planning methods for user support." IWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Vol 97 pp 7-8.
- [Stroud'06] Stroud, I. and Xirouchakis, P. (2006). "Strategy features for communicating aesthetic shapes for manufacturing." International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol 19 (6), pp 639-649.
- [Suh'00] Suh, S.-H. and Lee, E.-S. (2000). "Contouring performance measurement and evaluation of NC machine controller for virtual machining CAM system". London, ROYAUME-UNI, Springer.
- [Suh'02a] Suh, S.-H., Cho, J.-H. and Hong, H.-D. (2002a). "On the architecture of intelligent STEP-compliant CNC." International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol 15 (2), pp 168-177.

- [Suh'08a] Suh, S.-H., Kang, S. K., Chung, D.-H. and Stroud, I. A., Eds. (2008a). Theory and Design of CNC Systems. Series in Advanced Manufacturing, Springer.
- [Suh'02b] Suh, S. H. and Cheon, S. U. (2002b). "A Framework for an Intelligent CNC and Data Model." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 19 (10), pp 727-735.
- [Suh'02c] Suh, S. H., Chung, D. H., Lee, B. E., Cho, J. H., Cheon, S. U., Hong, H. D. and Lee, H. S. (2002c). "Developing an integrated STEP-compliant CNC prototype." *Journal of Manufacturing Systems*, Vol 21 (5), pp 350-362.
- [Suh'02d] Suh, S. H., Lee, E. S., Kim, H. C. and Cho, J. H. (2002d). "Geometric error measurement of spiral bevel gears using a virtual gear model for STEP-NC." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 42 (3), pp 335-342.
- [Suh'03] Suh, S. H., Lee, B. E., Chung, D. H. and Cheon, S. U. (2003). "Architecture and implementation of a shop-floor programming system for STEP-compliant CNC." *Computer-Aided Design*, Vol 35 (12), pp 1069-1083.
- [Suh'08b] Suh, S. H., Shin, S. J., Yoon, J. S. and Um, J. M. (2008b). "UbiDM: A new paradigm for product design and manufacturing via ubiquitous computing technology." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 21 (5), pp 540 - 549.
- [Suh'09] Suh, S. H. (2009), ISO TC184/SC1/WG7 Bath Meeting: Machine Tools Data model.
- [Sun'01] Sun, J., Zhang, Y. F. and Nee, A. Y. C. (2001). "A distributed multi-agent environment for product design and manufacturing planning." *International Journal of Production Research*, Vol 39 (4), pp 625 - 645.
- [Terrier'04] Terrier, M., Dugas, A. and Hascoet, J. Y. (2004). "Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 44 (7-8), pp 865-877.
- [Terrier'05a] Terrier, M. (2005a). "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.
- [Terrier'05b] Terrier, M., Gimenez, M. and Hascoet, J. Y. (2005b). "VERNE - A five-axis parallel kinematics milling machine." *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol 219 (3), pp 327-336.
- [Umble'03] Umble, E. J., Haft, R. R. and Umble, M. M. (2003). "Enterprise resource planning: Implementation procedures and critical success factors." *European Journal of Operational Research*, Vol 146 (2), pp 241-257.
- [Van Dyk'06] Van Dyk, L. (2006). "Manufacturing execution systems." University of Pretoria.
- [VDA'86] VDA (1986), VDA-FS Vereinigung Deutsche Automobilindustrie Flaschen Schnittstelle,
- [Venkatesh'06] Venkatesh, S., Odendahl, D., Xu, X., Michaloski, J., Proctor, F. and Kramer, T. (2006). Validating Portability of Step-NC Tool Center Programming, proceedings of the IDETC/CIE ASME International 25th Computers and Information in Engineering Conference, Long Beach, CA, 24-28 September 2005, pp
- [Vericut'10] Vericut. (2010). "Cgtech Ltd." Date de consultation: Juin 2010, Site: www.cgtech.com.
- [Vichare'09] Vichare, P., Nassehi, A., Kumar, S. and Newman, S. (2009). "A Unified Manufacturing Resource Model for representing CNC machining systems." *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, Vol 25 (6), pp 999-1007.
- [Vijayaraghavan'08] Vijayaraghavan, A., Sobel, W., Fox, A., Dornfeld, D. and Warndorf, P. (2008). Improving Machine Tool Interoperability Using Standardized Interface Protocols: MT Connect, proceedings of the 2008 International Symposium on Flexible Automation, Atlanta, USA, 23-26 June, pp
- [Wang'04] Wang, H. and Xu, X. (2004). A STEP-Compliant "Adaptor" for Linking CAPP with CNC, proceedings of the 34th International MATADOR Conference, Manchester, UK, 7-9 July 2004, pp
- [Wang'06] Wang, H., Xu, X. W. and Tedford, J. D. (2006). "Making a process plan adaptable to CNCs." *Int. J. Comput. Appl. Technol.*, Vol 26 (1/2), pp 49-58.
- [Wang'07a] Wang, H., Xu, X. and Tedford, J. D. (2007a). "An adaptable CNC system based on STEP-NC and function blocks." *International Journal of Production Research*, Vol 45 (17), pp 3809 - 3829.
- [Wang'07b] Wang, L. and Shen, W. (2007b). "Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing", Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer.

- [Weck'02] Weck, M. and Wolf, J. (2002), ISO 14649 provides information for sophisticated and flexible numerically controlled production. *Prod Eng [WGP-Annals]*
- [Weck'03] Weck, M. (2003), A new interface closing the gap between planning and shopfloor. WZL RWTH Aachen, STEP-NC Workshop, Aachen, Germany.
- [Weck'01] Weck, M., Wolf, J. and Kiritsis, D. (2001). The STEP compliant NC programming interface evaluation and improvement of the modern interface, ISM Project Forum, Verita/Ascona Schweiz,
- [Wosnik'06] Wosnik, M., Kramer, C., Selig, A. and Klemm, P. (2006). "Enabling feedback of process data by use of STEP-NC." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 19 pp 559-569.
- [Wu'98] Wu, R.-R. and Zhang, H.-M. (1998). "Object-oriented and fuzzy-set-based approach for set-up planning." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 14 (6), pp 406-411.
- [Xu'04a] Xu, X. (2004a). Development of a G-code Free STEP-compliant lathe, 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), CIE-2 Computer Aided Product Development, 13-19 November 2004.
- [Xu'04b] Xu, X. and Mao, J. (2004b). A STEP-compliant collaborative product development system, proceedings of the 33rd International Conference on Computers and Industrial Engineering, Jeju, Korea, 25–27 March 2004, pp
- [Xu'07] Xu, X. (2007). STEP into Distributed Manufacturing with STEP-NC, in "Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing", edited by pp 393-421.
- [Xu'05] Xu, X. W., Wang, H., Mao, J., Newman, S. T., Kramer, T. R., Proctor, F. M. and Michaloski, J. L. (2005). "STEP-compliant NC research: The search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration." *International Journal of Production Research*, Vol 43 (17), pp 3703-3743.
- [Xu'06] Xu, X. W. and Newman, S. T. (2006). "Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent--a review of the technologies." *Computers in Industry*, Vol 57 (2), pp 141-152.
- [Yang'07] Yang, W., Xu, X. and Xie, S. (2007). Development of STEP-NC Compliant Machine Tool Data Model, in edited by pp 35-40.
- [Yen'98] Yen, J. (1998). "The biggest of the big three goes beyond PC". Dearborn, MI, ETATS-UNIS, Society of Manufacturing Engineers.

- [Yeung'06] Yeung, C.-H., Altintas, Y. and Erkorkmaz, K. (2006). "Virtual CNC system. Part I. System architecture." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 46 (10), pp 1107-1123.
- [Zhao'08] Zhao, F., Xu, X. and Xie, S. (2008). "STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 38 (5), pp 540-551.

Intégration de la programmation basée entités pour la fabrication sur machines à commandes numériques dans un contexte multi-process

Les travaux présentés portent sur l'intégration de la programmation basée entités des machines-outils à commande numérique (MOCN). Cette programmation émergente s'appuie sur les concepts véhiculés par le standard STEP-NC et la norme ISO 14649. Quatre axes de recherche sont proposés. Le premier concerne l'évolution de la programmation actuelle vers la programmation basée entités et l'enrichissement du standard STEP-NC. Pour ceci, nous proposons deux contributions principales au standard STEP-NC dans le cadre de notre participation au comité normatif de l'ISO 14649 : l'intégration de stratégies d'usinage à motifs avec pour application l'usinage trochoïdal et le tréflage, et l'élaboration d'un modèle fonctionnel STEP-NC des MOCN. Le deuxième axe se focalise sur l'évolution du système de fabrication pour tirer profit de la programmation basée entités. Nous proposons un concept de système étendu de fabrication intégrée XMIS (eXtended Manufacturing Integrated System) ainsi qu'une déclinaison concrète à travers la CAO étendue et la CN étendue. Au cours du troisième axe, nous étendons l'étude à l'intégration de plusieurs procédés au sein d'une même gamme de fabrication STEP-NC et étudions l'organisation des outils de simulation dans ce contexte multi-process avec la description d'espaces de simulation. Le quatrième axe porte sur la validation et la mise en œuvre des concepts proposés avec le développement de la plate-forme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) qui intègre la programmation basée entités du modèle à la pièce usinée sur des moyens industriels et montre l'impact multidirectionnel des modifications tout au long de la chaîne numérique.

Mots-clés : Programmation basée entités, STEP-NC, Machines à commande numérique, Multi-process, Système de fabrication, Echange des données de fabrication, CN étendue, SPAIM, XMIS

Feature-based manufacturing integration for CNC machine programming in a multi-process environment

These research works aim at integrating feature based manufacturing for Computer Numerical Control (CNC) Machine Tool programming. This emerging programming method is based on the concepts conveyed by STEP-NC standard associated with ISO 14649 norm. Four main research axis are proposed. The first one deals with the evolution of current programming to feature based programming and the development of STEP-NC standard. For this, we proposed two main contributions to STEP-NC standard in the frame of our participation to the ISO 14649 normative committee: the first one is the integration of toolpaths generation pattern strategies with application to trochoidal and plunge milling; the second one is the participation to the development of the STEP-NC machine tool functional model. The second axis focuses on the evolution of the manufacturing system to benefit from feature based programming. We propose a concept of eXtended Manufacturing Integrated System (XMIS) composed of the eXtended CAD and eXtended CNC systems. In the third axis, we enlarge the study to the multi-process context by the integration of several manufacturing processes in a unique STEP-NC workplan. We also study simulation tools management with the description of simulation spaces concept. The last axis presents the development of the STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing (SPAIM) for validation and implementation of the concepts presented in this thesis. It integrates feature based programming from the model to the real part manufactured on industrial resources. It also shows the multidirectional impact of modifications all along the manufacturing numerical chain.

Keywords : Feature based manufacturing, STEP-NC, CNC machine, Multi-process, Manufacturing system, Manufacturing data exchange, extended CNC, SPAIM, XMIS