

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de

Magister en : Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique

**ETUDE DU PROCESSUS D'USINAGE DES PIECES
MECANIQUES SUR LES MACHINES CNC A 5 AXES**

Présenté par :

FARID BETTINE

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Dr. M.HECINI	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. M. ASSAS	Maitre de Conférences	Rapporteur	Université de Batna
Dr. S.BENSAADA	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr. A. TATI	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

Remerciement

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Recherche en Productique (LRP) de Batna, je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire Monsieur Assas Mekki, maître de conférences à l'université de Batna et directeur du laboratoire LRP d'avoir accepté de diriger ce mémoire et de m'avoir soutenu au long travail.

Mes plus sincères remerciements vont également à Monsieur Ameddah Hacene, Magistère construction mécanique, qui a participé dans le suivi de ma thèse et a fortement enrichi ma formation. Ses conseils et ses commentaires auront été fort utiles.

Je remercie également Mr M.HECINI. Professeur à l'Université de Biskra, pour avoir présidé le jury de soutenance.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Mr A. TATI, Maître de conférences à l'Université de Biskra, et à Mr S. BENSAAIDA, Professeur à l'Université de Biskra et , pour avoir accepté d'examiner ce travail

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes, aussi je voudrais simplement leur exprimer ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Je ne peux pas oublier de remercier ma famille pour leur soutien durant cette formation, ainsi que tous mes amis.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Notations.....	vii
Introduction	1
Chapitre 1 : Etat de l’art et généralité sur l’usinage 5 axes	4
1.1 Introduction	5
1.2 Historique	5
1.3 Etude bibliographique.....	8
1.3.1 Cinématique	8
1.3.2 Usinage des pièces a forme complexes.....	9
1.3.3 Programme NC.....	11
1.4 Evolution des machines à 5 axes.....	12
1.5 Différentes architectures de machine CNC.....	14
1.6 Classification des machines CNC à 5 axes	16
1.7 Choix de la machine (caractéristiques).....	19
Chapitre 2 : Modélisation géométrique et cinématique des machines 5 axes.....	21
2.1 Modélisation géométrique.....	22
2.1.1 Modélisation géométrique direct	22
2.1.2 Modélisation géométrique inverse.....	33
2.2 Modélisation cinématique	35
2.2.1 Modélisation cinématique direct	35
2.2.2 Modélisation cinématique inverse	40

Chapitre 3 : Usinage des surfaces gauches-application à l'aide du logiciel CATIA..	44
3.1 Introduction	45
3.2 Modélisation des formes complexes	46
3.2.1 Courbes et surface de Bézier.....	47
3.2.2 Courbes et surface de B-spline	50
3.2.3 Courbes et surface de NURBS	53
3.2.4 Positionnement d'outil CC et CL.....	55
3.3 Programme d'usinage APT et G-code (cas de fraisage).....	57
3.4 Application à l'aide du logiciel CATIA V5	68
3.4-1Présentation de CATIA V5.....	68
3.4.1.1-Définition	68
3.4 -2Etude de l'usinage de forme complexé par CATIA V5	71
Conclusion	78
Annexe	79
Annexe 1-Programme d'usinage par Format NURBS.....	80
Annexe 2-Programmer NC format G-code.....	82
Annexe 3-Programme NC format APT.....	84
Annexe 4-Mots clefs du langage APT.....	86
Références bibliographiques.....	89

Liste des figures

Figure.1.1. : Machine de fraisage MAHO 600E

Figure.1.2 : Pièce, l'agglutination dispositif, et les tables de rotation de MAHO 600E

Figure.1.3: Machine de fraisage HERMLE UWF902H

Figure. 1. 4 : Parcours 3 axes

Figure. 1.5 : Parcours 3+2

Figure. 1.6 : Parcours 5 axes

Figure 1.7 : Les deux architectures de machine

Figure 1.8: Architecture série

Figure 1.9: Exemple d'architecture série

Figure 1. 10: Architecture parallèle

Figure 1.12 : définitions d'axe pour la machine CNC à 5-axes.

Figure 1.13 : Le type de table-inclinaison machine CNC a 5-axes

Figure 1.14 : Le type d'axe-table-inclinaison machine CNC a 5-axes

Figure. 1.15 : Machine Matsuura MAM72-25V

Figure. 1.16 Matsuura MAM72-25V

Figure 2.1: Relation entre les espaces articulaires et opérationnels

Figure 2.2 : Le schéma du centre de fraisage Matsuura à 5 axes

Figure 2.3 : chaîne cinématique du centre de fraisage Matsuura à 5-axes

Figure 2.4: Définition de X_i lorsque Z_{i-1} et Z_i : (a) sont gauches; (b) se croisent, et (c) sont parallèles

Figure 2.5: Coordonner les cadres de robot PUMA

Figure 2.6 : Paramètres de D-H

Figure 2.7 : (a) Le robot FanucM16iB dans sa position initiale; (b) La coordination des cadres de l'M16iB Fan

Figure 2.8 : La géométrie du centre de fraisage à 5-axes de Matsuura

- Figure 2.9 : Matsuura avec un outil sphérique de fin-moulin de la longueur ℓ à la position initiale
- Figure 2.10 : Armatures du même rang de Matsuura
- Figure 2.11: General n -axe manipulateurs
- Figure 2.12: La définition de e_i et r_i pour la Matsuura
- Figure 3.1 : Exemple de difficultés d'usinage
- Figure 3.2 : Typologies des pièces usinées de formes complexes
- Figure 3.3 : courbes de Bézier
- Figure 3.4 : carreau élémentaire, a) coordonnées cartésiennes, b) espace paramétrique.
- Figure 3.5 : a) la courbe B-spline uniforme périodique. b) la courbe B-spline uniforme ouvert. c) la courbe B-spline non uniforme.
- Figure 3.6 : Surfaces de B-spline
- Figure 3.7: courbe NURBS
- Figure 3.8: courbes NURBS
- Figure 3.9: surface NURBS
- Figure 3.10: Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil
- Figure 3.11 : Paramétrisation de l'orientation de l'axe outil
- Figure 3.12 : Définition d'un contact multipoints
- Figure 3.13 : Structure du système APT
- Figure 3.14 : fenêtre de part Design
- Figure 3.15 pièce 2D
- Figure 3.16 pièce 3D
- Figure 3.17 fenêtre d'Usinage
- Figure 3.18 fenêtre Advanced Machining
- Figure 3.19a : stratégie d'usinage
- Figure 3.19b : géométrie à usiner
- Figure 3.19c l'outil à utiliser

Figure 3.19d paramètres de la coupe

Figure 3.19f macro d'approche de pièce

Figure 3.20: simulation d'une pièce 3D avec stratégie zigzag

Figure 3.21a l'outil à début

Figure 3.21b l'outil intermédiaire

Figure 3.21c l'outil intermédiaire

Figure 3.21e l'outil à position finale

Figure 3.22 la pièce ce forme brut

Figure 3.23a début l'usinage

Figure 3.23b en cours l'usinage

Figure 3.23c fin l'usinage

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Caractéristiques de machine Matsuura MAM72-25V

Tableau 2.1 : Paramètres de D-H du Fanuc M16iB

Tableau 2.2 : Paramètres de D-H de la pièce de travail pour usiner des armatures

Tableau 3.1. Liste de more de lattré

Tableau 3.2. Liste de G- codes

Notations

MGI : modèle géométrique inverse

MGD : modèle géométrique direct

${}^{F_j} A_{F_i}$: Matrice de transformation homogène décrivant F_i cadre par rapport au cadre de F_j ;

A: Axe révolutée de machine-outil

a_i : Vecteur de position entre chaque image en fonction de D-H

a_i : notation D-H;

a_i : notation D-H;

B: Axe révolutée de machine-outil

b_i : notation D-H;

C: Axe révolutée de machine-outil

CC points : points de Cutter de contact

CN: Commande Numérique;

CNC: Computer Numerical Control

D-H: Denavit-Hartenberg;

DDL: Degrés De Liberté

FAO: Fabrication Assistée par Ordinateur

NC: Numerical Control

e_i : Vecteur unitaire associé à chaque axe révolutée

J: matrice jacobienne

HTM: Matrice de transformation homogène

l : longueur de l'outil

LC: Localisation du Couteau

MGD: Modèle Géométrique Direct

MGI: Modèle Géométrique Inverse

MCD : Modèle cinématique Direct

MCI : Modèle cinématique Inverse

N : Vecteur d'orientation plus mignon

p : Vecteur de position dans l'espace cartésien

Q : Matrice de rotation entre deux trames

$R_{3 \times 3}$; matrice de rotation

T: Outil de coordonner cadre

Θ : Position commune

$\dot{\theta}$: Joint de vitesse

r_i : Vecteur position d'effecteur dans les châssis

vect: fonction de transformer une matrice de 3 x 3 dans la rotation vecteur axial

ω : vitesse angulaire

X: Axe prismatique de machine-outil

Y: Axe prismatique de machine-outil

Z: Axe prismatique de machine-outil

Introduction

Les surfaces complexes peuvent être trouvées dans de nombreuses applications industrielles telles que les pièces d'automobiles, les coques de bateaux et les pièces en aérospace. En effet, les machines d'usinage à 5 axes permettent d'obtenir avec précision des surfaces très complexes avec les conditions de coupe optimales. De nombreux problèmes peuvent survenir lors du procédé d'usinage, par exemple; une qualité de surface usinée inférieure, ou une probable interférence entre l'outil de coupe et les objets aux alentours. Ainsi, il existe une demande pour un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO) en vue d'obtenir l'usinage des pièces avec une bonne qualité entre l'outil de coupe et les surfaces des pièces tout en évitant les limites articulaires de la machine-outil

Dans cette étude nous allons utiliser un logiciel de FAO « CATIA » pouvant simplifier notre démarche d'usinage des surfaces complexes par l'utilisation d'un module 5 axes « baliages multi-axes ».

Les phases de conception se structure est comme suit :

La première phase a pour but de générer les points de contact du centre d'outil (points CC) sélectionnés en fonction de la géométrie de la surface complexe. La deuxième phase a pour objet de générer les données de localisation de contact outil pièce (données CL). En fin, la dernière phase consiste à convertir les données CL en code machine, c'est aussi l'interface qui permet de relier les systèmes de FAO aux machines à commande numériques (CN) appelée également la phase de post-processeur. Les positions et orientations de l'outil relativement au référentiel de la pièce nécessitent d'autres transformations par le post-processeur avant de procéder à leur codage en fichier code G ou APT .

Cette transformation nécessite une connaissance de l'architecture de la machine-outil en vue de résoudre le modèle cinématique inverse, c'est-à-dire le transfert des positions et orientations de l'outil (espace d'opération) en positions des axes de la machine (espace articulaires). Les modèles cinématiques inverses des machines-outils à cinq axes peuvent être trouvés soit en solution analytique ou numérique itérative.

Les méthodes numériques itératives pour le calcul des modèles cinématiques inverses impliquent d'importantes opérations numériques. Cependant, elles sont puissantes pour retrouver la solution optimale dans le cas d'opérations d'usinage à 5 axes.

Dans ce mémoire on propose une étude générale pour l'élaboration d'usinage des pièces mécaniques sur les machines CNC à 5 axes.

Le présent mémoire est organisé comme suite :

Le chapitre 1 , intitulé « Etat de l'art et généralité sur les machines à 5 axes » présente une revue de la littérature actuelle liée à la modélisation géométrique et cinématique de la machine à 5 axes et les programmes utilisés pour le développement des programmes d'usinages des pièces à forme complexes ,et donné une part à la présentation de la généralité sur l'usinage à 5 axes , l'évolution de la technique d'usinage pour les machines-outils (de l'usinage 3 axes, jusqu'à l'usinage 3+2 axes) , leurs différents type d'architectures , leurs classifications et d'autre par au choix de machine spécifique à notre démarche de travail, à savoir la machine 5 axes Matsuura MAM72-25V

Le chapitre 2, intitulé « modélisation géométrique et cinématique des machines 5 axes », donne le premier part présente la modélisation géométrique direct et inverse de l'articulation de la machine CNC Matsuura MAM72-25V dans le but de trouver une relation entre les paramètres de configuration (coordonnées généralisées) et les paramètres de l'organe terminal (coordonnées opérationnelles), Nous utilisons ainsi la méthode de Denavit-Hartenberg (D-H). Le deuxième part présente la modélisation cinématique direct et inverse, dans le but de trouver en relation entre la différentielle de la position de l'effecteur et celle des coordonnées articulaires pour le modèle direct, et de calculer le modèle cinématique inverse (MCI) de la machines CNC à cinq axes par un calcul de tous les ensembles possibles des angles articulaires qui pourraient être utilisés pour atteindre la position et l'orientation d'outil.

Le chapitre 3 présente une généralité sur l'usinage des surfaces gauches. Dans cette recherche les différents modèles mathématiques des formes complexes souvent associées aux courbes ou surfaces décrites à partir de modèles polynomiaux (Bézier, B-Spline, NURBS) dans les logiciels CAO sont présentés , d'autre par la théorie de

calcul de la position de contact entre l'outil et la surface usinée, ainsi que les différents types de programmes d'usinage (APT, ISO...)

*Chapitre 1 : Etat de l'art et généralités sur les
machines 5 axes*

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons passer en revue la littérature liée à la modélisation géométrique et cinématique de la machine 5 axes et les programmes utilisés pour l'usinage des pièces de formes complexes.

1.2 Historique

La technologie de la commande numérique des machines-outils (CNMO) est née au milieu du 20^e siècle et plus exactement au courant de la deuxième guerre mondiale 1939-1945. La première machine à commande numérique a été utilisée pour l'usinage des cames de pompes d'injection d'avions au profit de l'US Air Force avec la participation du prestigieux Institut de Technologie de Massachusetts (MIT) et la société d'électronique Bendix Corporation. Avant cette invention, l'usinage de ce genre de came se réalisait manuellement et c'était donc un procédé lent, peu précis et coûteux.

La CNMO n'a été généralisée dans la production industrielle qu'au début des années 1960. Le véritable essor de la Commande Numérique par Calculateur (CNC), en anglais Computer Numerical Control, a eu lieu dans les années 1970. Une décennie plus tard avec l'introduction de micro-ordinateurs à prix abordable, on a assisté à un développement de cette technologie fascinante dans le domaine de la fabrication mécanique, et en particulier dans le domaine du travail des métaux. La technologie de commande numérique a provoqué une véritable révolution au niveau des entreprises industrielles en changeant les modes de travail et en assurant des avantages technico-économies (cout d'usinage, délais de réalisation, précision et complexité des pièces usinées) beaucoup plus meilleurs que ceux obtenus en utilisant les machines conventionnelles.

Les centres d'usinage à 5 axes sont des machines CNC, sont caractérisés par trois axes de translation et deux axes de rotation. Un centre d'usinage à cinq axes avec deux axes de rotation de la table est représenté sur la figure 1.1. La pièce à fabriquer est fixée à la table de la machine au moyen du dispositif de montage. (voir Fig. 1.2). La pièce est ensuite usinée en utilisant un outil fixé à la broche par l'intermédiaire du porte-outil.

Les machines à commande numérique sont programmées au moyen d'un langage spécifique appelé code G ou code ISO sous forme d'instructions formant le programme d'usinage.

Le programme pièce est composé de commandes représentées par des lettres, des chiffres et des symboles spéciaux. Le programme se compose d'une partie des instructions pour contrôler les mouvements de la machine suite à une technologie de fabrication liée à la machine, les dispositifs et l'outillage utilisé. Par exemple, le programme spécifie la forme et les dimensions de l'outil, la vitesse de coupe et d'avance, l'orientation relative de la pièce et de l'outil. Le programme prévoit également l'un ensemble des points de positionnement de l'outil, en anglais Cutter Location (CL).

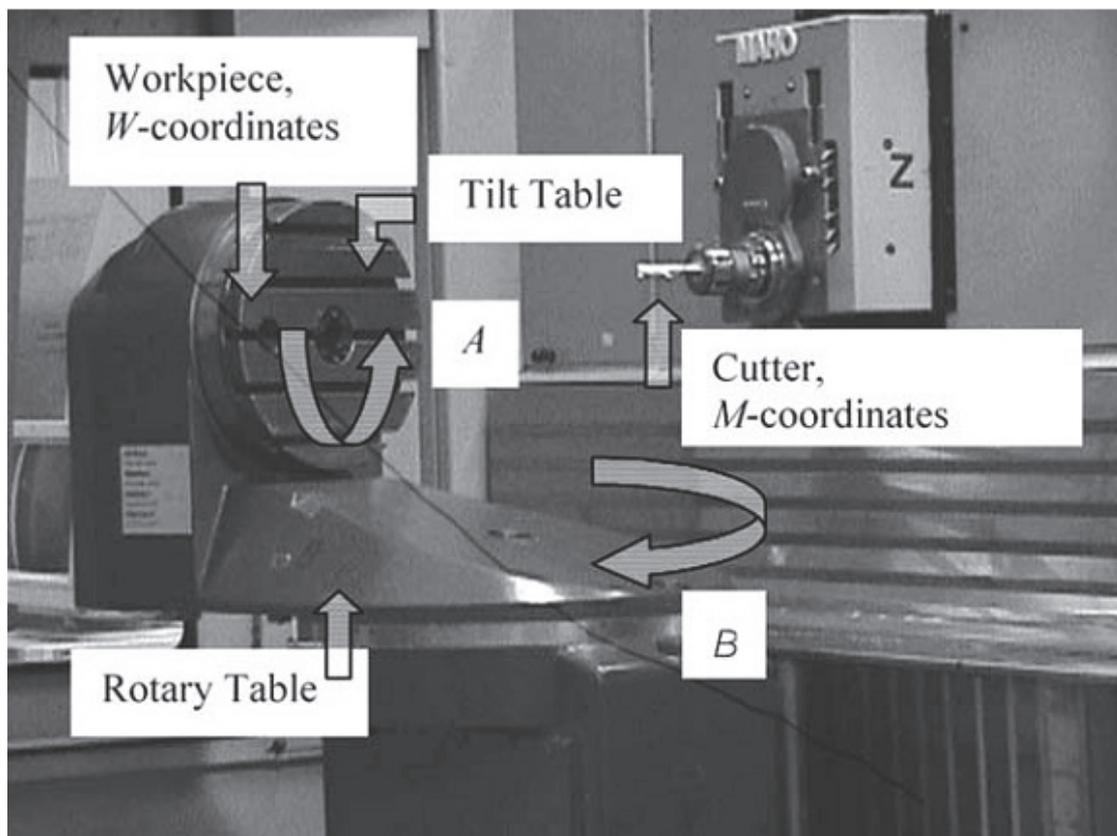


Figure 1.1. Fraiseuse 5 axes MAHO 600E[2]

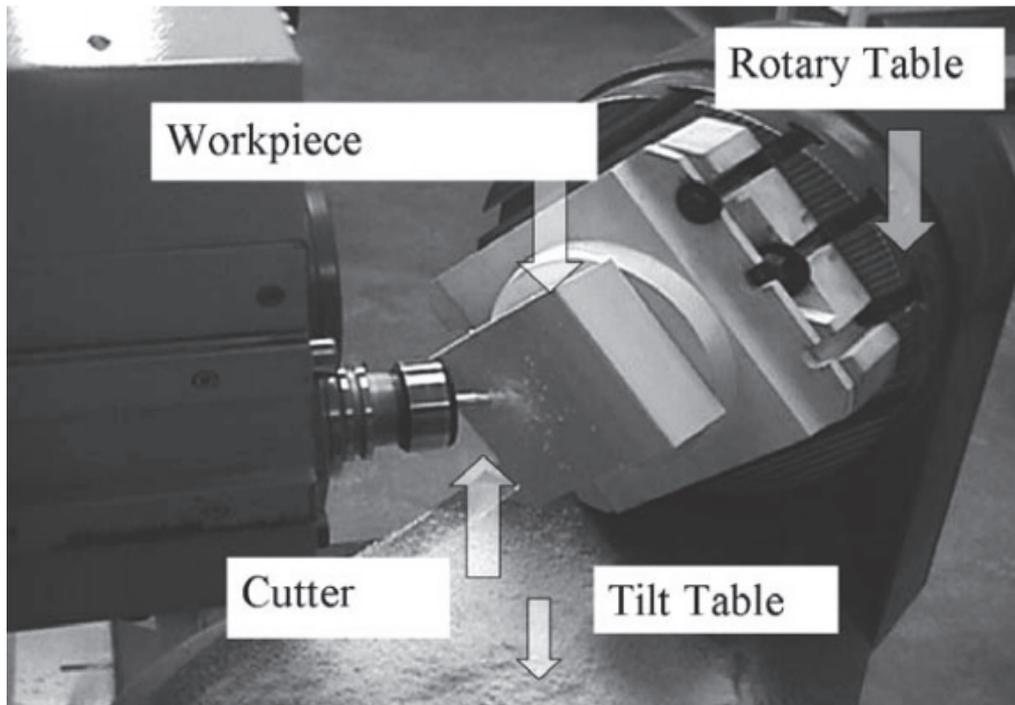


Figure 1.2. Pièce, dispositif de montage de pièce, et les tables de la fraiseuse MAHO 600E [2]

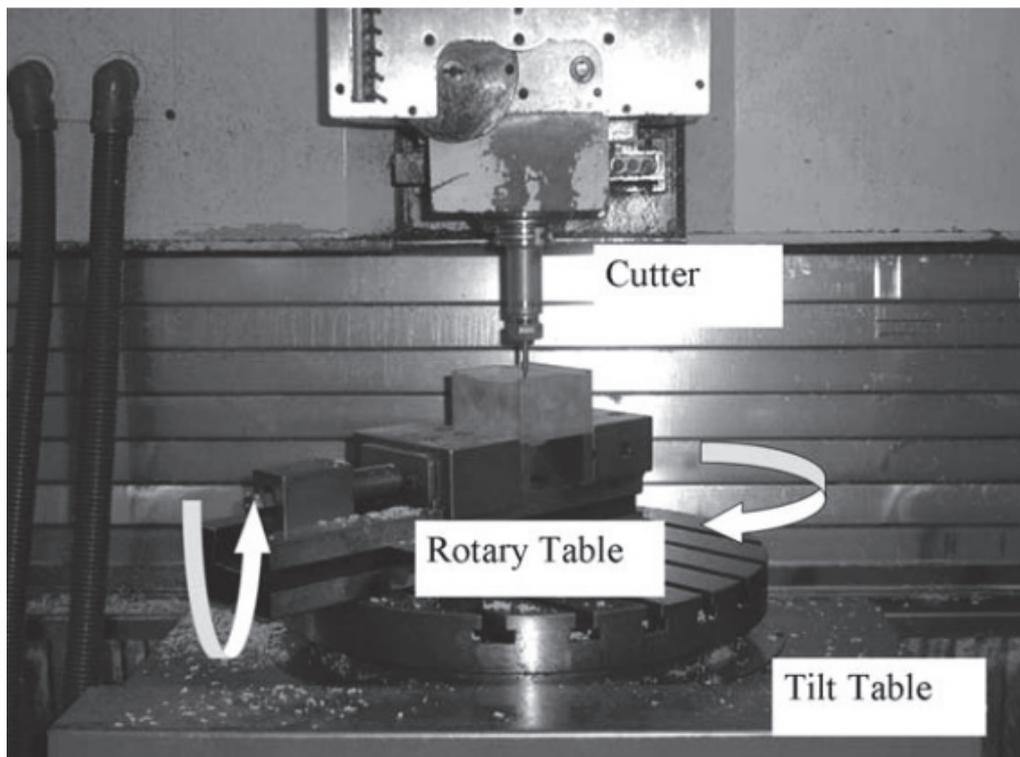


Figure1.3. Fraiseuse 5 axes HERMLE UWF902H [2]

L'élaboration du programme d'usinage prend en compte la géométrie spécifique de la pièce, le processus de coupe, les paramètres de la machine et les outils de coupe utilisés.

Le programme est envoyé à la commande de la machine qui actionne les servomoteurs pour déplacer la table ou la broche suivant des valeurs de déplacement le long des axes X, Y ou Z et d'orienter la coupe par rapport à la pièce dans un ou deux axes de rotation. La pièce est usinée en déplaçant le l'outil le long d'un chemin dans l'espace appelé la trajectoire de l'outil. [2]

1.3 Etude Bibliographique

1.3.1 Cinématique

Lavernhe Sylvain (2006) [3] propose un modèle prédictif du comportement cinématique lors de l'usinage 5 axes. Ce modèle met en évidence les différences entre les trajectoires d'outil et le programmé effectif de la trajectoire. L'originalité du modèle est l'utilisation de la méthode inverse du temps pour coordonner les axes de la machine-outil, quelle que soit leur nature (translation ou rotation). Le modèle reconstruit la vitesse relative réelle de l'outil en soulignant les portions de trajectoire pour lesquels les conditions de coupe ne sont pas respectées.

M Sharif addin, (2009) [4] présente un travail sur les erreurs cinématique dues à des imprécisions géométriques dans les machines-outils à 5-axes et causés par des écarts dans les positions de l'outil et les valeurs l'orientation, ce qui par conséquent affecte la précision géométrique de la surface usinée.

Lavernhe Sylvain (1), [5] propose un modèle prédictif de la performance cinématique en fraisage à 5 axes dans le contexte de l'usinage à grande vitesse. En effet le fraisage 5 axes à grande vitesse permet d'améliorer la qualité et la productivité grâce à des degrés de liberté apportés par l'orientation de l'axe de l'outil.

Dong-Been Tae (2007)[6] propose un algorithme efficace pour dérivation de l'équation inverse de la cinématique du machine à 5 axes. Etant donné que la configuration de chaque type de machine-outil à 5-axes est différente, chaque type a besoin d'une dérivation de ses propres équations de cinématique inverses pour le post processeur.

Mud-Armeen Munlin (2004) [7] présente des algorithmes pour générer et simuler le chemin non linéaire de l'outil de la machine à 5-axes. Basé aussi bien sur un ensemble des

points de positionnement de l'outil (CL) qu'un ensemble des points de contact de l'outil (CC) et de son inclinaison, le simulateur permet d'analyser l'exactitude d'un chemin de l'outil 3D.

1.3.2 Usinage des pièces a forme complexes

Lavernhe Sylvain, [8] (2009) présente une recherche pour l'optimisation des trajectoires 5 axes dans le cadre de l'usinage à grande vitesse. L'objectif est de générer des trajectoires d'outils adaptés à la haute vitesse de suivi en cours d'usinage afin de respecter les conditions de coupe, tout en assurant la conformité géométrique de la pièce usinée.

A. C. Munar, [9] présente une méthode de modélisation géométrique 5-axes et un algorithme d'usinage CNC pour la fabrication des hélices des bateaux dans une configuration unique. Une nouvelle approche pour l'ébauche en 5-axes est développée et mis en œuvre en plus de rationaliser davantage les opérations de finition.

Koichi Morishige, (2007) [10] traite la fabrication pratique de pièce basée sur le 3D-CAD/CAM. Les fraises en bout avec des formes arbitraires généralement difficiles à produire sont utilisées en améliorant l'exactitude et le rendement d'usinage.

John C. J. Chiou (2007) [11] propose une interpolation pour convertir la surface de pièce modélisée en NURBS en chemins paramétrés pour l'usinage à 5 axes pour les des surfaces extérieurs complexes. Basé sur les configurations de la machine, l'interpolation NURBS dérive directement l'emplacement des points de déplacement et l'orientation d'axe pour contrôler le mouvement de machine.

Xujing Yang, (2006) [12] propose une nouvelle approche pour la génération de chemin d'outil pour l'usinage de précision des parties des surfaces sculptées. Il vise à développer un algorithme convenable efficace basé sur l'interpolation NURBS approprié aux pièces de configuration compliquée exigeant le profil d'usinage doux.

J, XIA et Q. J. GE (2001) [13] présente une nouvelle approche de la génération CNC des chemins de l'outil 5-axes pour l'usinage des surfaces sculptées avec un outil à bout plat. Les courbes Bézier et B-splines sont utilisées pour générer les mouvements de l'outil de sorte que la représentation exacte de la forme effective de coupe peut être obtenue.

Chih-Hsing Chu [14] Ce travail présente une nouvelle approche qui génère automatiquement des parcours d'outil sans interférence pour le fraisage à 5 axes des surfaces réglées. Une courbe limite de la surface usinée est divisée en segments de la courbe. Chaque segment fonctionne comme une courbe guide dans la méthode de conception de surface Bézier développable qui contrôle un patch pour approcher la surface avec des degrés de liberté disponibles.

Chu A My [15] propose une nouvelle approche basée sur le champ de vecteur pour l'optimisation de trajectoire de l'outil dans l'usinage à 5 axes. La stratégie de l'approche est de produire une trajectoire de l'outil efficace en ce qui concerne le domaine optimal de direction de coupe. La direction de coupe optimale maximise la largeur de l'usinage.

V.S. Rao, (2004) [16] présente la modélisation de la trajectoire de la dent et la géométrie processus de fraisage périphérique des surfaces et courbes complexes.

D Rotha., S. Bedi (2000) [17] présente une méthode de détermination de la forme de la surface balayée par un outil qui suit une trajectoire de l'outil pour l'usinage 5 axes des surfaces courbées.

Yun Jae-Deuk, (2009) [18] présente un algorithme de post-processeur pour les machines 5 axes, qui peut être appliquée à 2 axes rotatifs (2R-3L) et 3 types axes rotatifs (3R-2L) types. L'usinage cinq axes nécessite un post-processeur pour la conversion de coordonnées de positionnement de l'outil (CL) en données de contrôle et commande de la machine CNC.

C. Lartigue et al (2001) [19] a étudié les trajectoires d'outil CNC en termes des courbes B-spline. Il propose une méthode précise et efficace pour générer une trajectoire de l'outil à commande numérique pour une surface lisse de forme libre en utilisant les courbes B-spline cubiques qui seront introduites dans un interpolateur. Il a supposé l'utilisation d'un outil boule pour l'usinage trois axes. Il a d'abord interpolé les points de rupture qui sont générés avec une courbe plane B-spline cubique. Puis il a évalué la hauteur de crête maximale le long d'une courbe en calculant les points stationnaires de la fonction de distance entre la courbe réelle et la courbe théorique.

D.K. Pratihari et al (2005) [20] a étudié l'optimisation de la CNC pour le décolletage isoscallop de surfaces en utilisant un algorithme générateur. Il présente l'usinage isoscallop

qui assure essentiellement l'uniformité de surface, rugosité sur toute surface de la pièce, mais pas nécessairement d'assurer la minimisation du temps l'usinage.

1.3.3 Programme NC

Raphaël Laguionie, (2007) [21] Ce travail a pour un objectif d'implanter deux nouvelles stratégies d'usinage, le tréfilage et l'usinage trochoïdal, au sein du format Step-NC . La construction de ces courbes se fait par répétition d'un motif le long d'une courbe guide. Pour mettre en avant la faisabilité de l'implantation de ces stratégies à motifs dans le format Step_NC, dans ce travail l'auteur a développé une chaîne numérique complète permettant, à partir du modèle CAO, de créer le fichier Step-NC, de générer les trajectoires et d'usiner la pièce sur la machine à commande numérique.

Manoche Djassemi (1998) [22] Ce travail présente l'application de la programmation paramétrique pour l'usinage CNC. Comme l'un des traits moins fréquemment utilisé pour des machines à commande numérique, la programmation paramétrique a le potentiel d'accroître l'efficacité des opérations de CNC. L'utilisation de deux études de cas, les capacités de programmation paramétrique pour les machines CNC sont illustrés.

Hongbin Liang (2009) [23] propose une nouvelle instruction NC (code G) pour l'interpolation directe 5 axes des surfaces NURBS. Les mécanismes de transfert d'informations de la fabrication et du traitement des données sont également présentés. La méthode proposée a résolu le problème de l'absence des vecteurs normaux de points de contact outil CC et les vecteurs tangents de trajectoire de l'outil sur les surfaces à usiner en raison de l'approximation des surfaces dans un certain nombre de petites lignes droites et courbes lors de la l'usinage des surfaces NURBS.

Cab-sang Ryu (2002) [22] Ce travail décrit le un développeur généralisé de post-processeur CNC qui peut produire des post-processeur NC que l'utilisateur demande en fonction spécifique de la machine CNC. Le développeur nommé " MultiPost " est conçu pour les systèmes CAD / CAM avec différents types de machines CNC. MultiPost a été développé en utilisant Microsoft Visual C pour le fonctionnement sur PC avec Microsoft Windows 98, et il a été testé en utilisant le centre d'usinage CNC FZ -25 commercialisé en Corée, avec la commande FANUC 11MA contrôleur et le logiciel CAD / CAM Pro / Engineer.

1.4 Evolution des machines

L'évolution de la technique des commandes numériques et de l'usinage a commencé dans les années 50 au MIT (Massachusetts Institute of Technology, E-U) quand l'armée américaine a demandé des pièces fabriquées dans la masse. Les premières machines ne pouvaient travailler alors qu'en 3 axes. Dans les années 60 puis 70, l'utilisation des techniques à circuits intégrés ont rendu les contrôleurs plus fiables et plus petits jusqu'à l'apparition des commandes numériques à micro-processeur. Du côté des contrôleurs, sont apparues dans les années 80 les interfaces utilisateurs graphiques suivies des premiers systèmes de FAO qui ont permis une productivité beaucoup plus élevée ainsi que l'usinage de surfaces complexes. Partant de l'usinage 3 axes, les systèmes de FAO sont passés à l'usinage 3+2 axes puis à l'usinage 5 axes simultanés. Les besoins actuels en automatisation pour une productivité plus élevée ont conduit à de fortes exigences envers les systèmes de FAO. Notamment en ce qui concerne l'usinage 5 axes, qui exige une collaboration étroite entre le système de FAO, et la cinématique de la machine et le contrôleur.

Les parcours 3 axes sont suffisants tant que la pièce n'est pas trop profonde par rapport au diamètre de l'outil. Si la pièce est très profonde et présente des cavités étroites, l'utilisation d'un simple parcours 3 axes n'est pas suffisante pour réaliser la finition complète de la pièce. En particulier si l'usinage se fait sur des matériaux durs, l'utilisation d'outils longs entraîne une mauvaise qualité des surfaces et des temps d'usinage longs. La figure 1.4 illustre le cas pour un parcours 3 axes. Ici, la longueur minimale de l'outil doit être très importante pour atteindre toutes les zones verticales du parcours. Pour cette raison, la broche est inclinée de façon à permettre l'usinage d'une zone spécifique de la pièce avec un outil plus court. Le procédé consistant à définir un angle constant pour la broche est l'usinage 3+2 axes. Quand les pièces sont complexes, il est fréquent de devoir définir une douzaine de vues pour couvrir complètement toute la pièce. Les parcours obtenus doivent se recouvrir, ce qui entraîne non seulement un prolongement du temps d'usinage, mais également des difficultés dans le recouvrement parfait des différentes vues d'usinage. En même temps, le nombre d'engagements et de dégagements augmente considérablement, occasionnant des problèmes de qualité des surfaces et davantage de mouvements de

l'outil. Enfin, ce type de programmation est particulièrement difficile pour l'utilisateur et souvent la somme de toutes les vues ne couvre pas toute la géométrie.

La figure 1.5 montre quatre vues de la pièce. Il reste toutefois une zone non couverte au centre de la pièce. Il faudrait des vues supplémentaires pour cette zone où celle-ci doit être érodée. En résumé, il est clair qu'il est possible d'usiner la pièce avec un outil plus court, mais à un prix plus élevé. Il faut définir de nombreuses vues qui se recouvrent, ce qui occasionnent des problèmes de qualité des surfaces en raison du nombre plus élevé d'engagements et de raccords machine. La programmation prend du temps, nécessite une intervention manuelle et est source d'erreurs très court, il n'est pas nécessaire de générer des vues qui se recouvrent, la probabilité d'oublier une zone est beaucoup plus faible et l'usinage peut s'effectuer en continu sans engagement ni dégagement supplémentaires (figure1.6). [23]

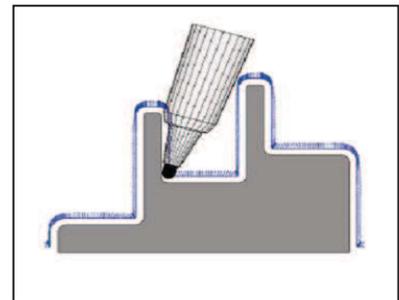
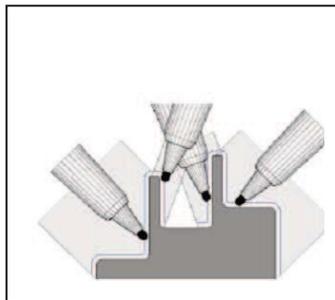
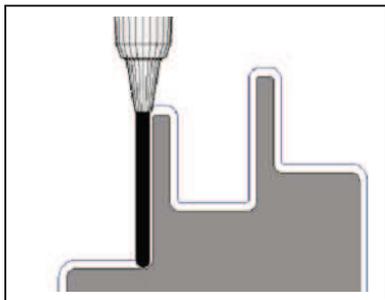


Figure. 1.4 Parcours 3 axes

Figure.1.5 Parcours 3+2axes

Figure.1.6 Parcours 5 axes [23]

1.5. Différentes architectures de machine CNC

Pour réaliser le lien structurel entre l'outil et la pièce, deux familles d'architecture existent (Figure 1.7)

- ✓ L'architecture série : Une seule chaîne cinématique réalise le lien entre l'outil et la pièce, elle est constituée de l'association en série de liaisons paramétrées élémentaires.
- ✓ L'architecture parallèle : L'outil est relié à la pièce par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes qui sont chacune constituées d'une ou plusieurs liaisons paramétrées élémentaires associées en série.

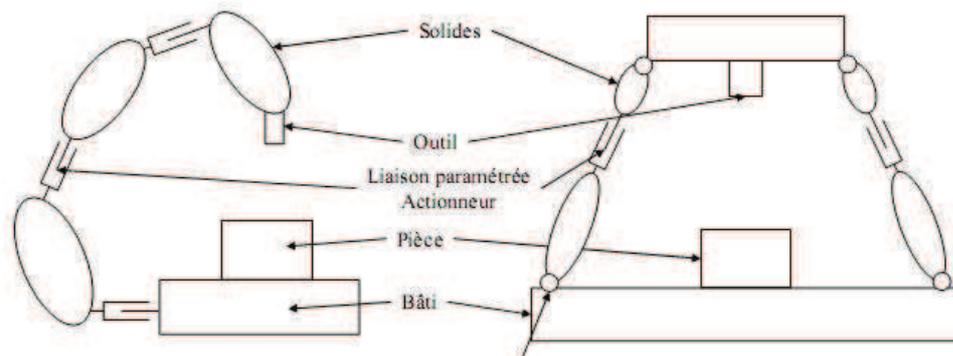


Figure 1.7 : Les deux architectures de machine[24]

1.5.1. L'architecture série

C'est l'architecture dite classique qui a été mise en œuvre dans les premières machines de production, il y a plus d'un siècle, et qui est encore utilisée aujourd'hui dans la majorité des machines. Elle est donc constituée d'une seule chaîne cinématique permettant la mise en position de l'outil par rapport à la pièce. Sa commande est assez simple dans la mesure où les trajectoires élémentaires sont obtenues avec la mise en mouvement d'une seule liaison paramétrée.

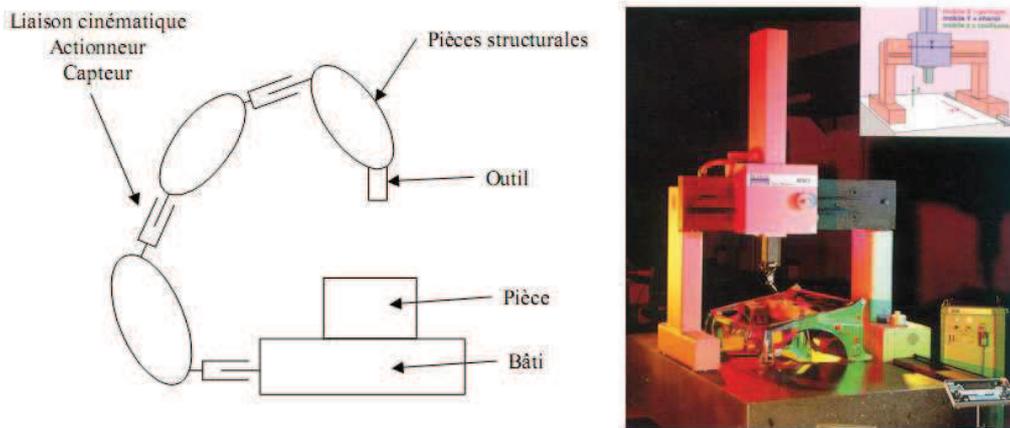


Figure 1.8: Architecture série[24]

La position de l'outil par rapport à la pièce s'obtient, simplement, à partir des paramètres des différents actionneurs. C'est le modèle en cinématique directe qui correspond au passage de l'espace articulaire (paramètres des actionneurs) à l'espace opérationnel (coordonnées de l'outil). Il est unique : un vecteur dans l'espace articulaire ne donne qu'un seul vecteur dans l'espace opérationnel.

Le modèle en cinématique inverse est parfois plus complexe, en particulier pour les machines ayant des liaisons pivot, car il peut être non unique. Pour un vecteur dans l'espace opérationnel, il peut exister plusieurs vecteurs solutions dans l'espace articulaire.

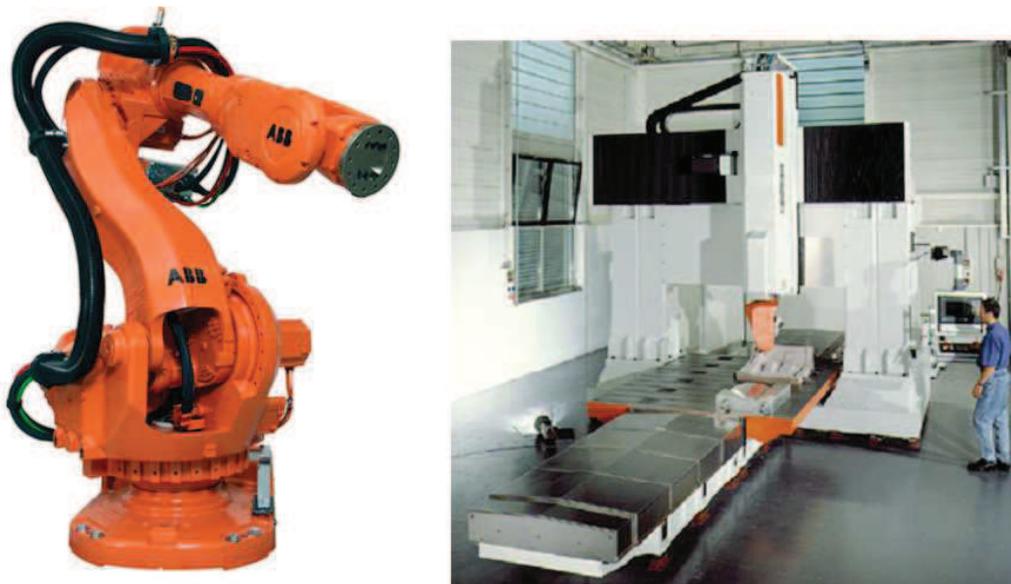


Figure 1.9 : architecture série[24]

1.5.2. L'architecture parallèle

L'outil est relié à la pièce par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes. Actuellement beaucoup d'industriels présentent des prototypes, voire des machines commercialisées, qui utilisent cette structure. La première utilisation de cette architecture est la machine de Gough pour le test de pneumatique. Actuellement l'architecture de Gough (ou plateforme de Stewart) est surtout utilisée pour les simulateurs de vol. D'autres architectures parallèles sont utilisées dans le domaine industriel. Par exemple, le robot Delta [est employé pour des applications de « pick and place » dans les industries agroalimentaires ou en robot de la commande de cette architecture est relativement complexe, c'est pourquoi elle ne commence son essor que depuis quelques années, avec l'arrivée des nouvelles commandes numériques et de leur capacité de calcul. Pour une machine à structure série, la réalisation d'un mouvement simple ne demande bien souvent que de commander un ou deux actionneurs en simultanément. Pour une machine à structure parallèle, quelque soit le mouvement, il est nécessaire de commander l'ensemble des actionneurs en simultanément. [24]

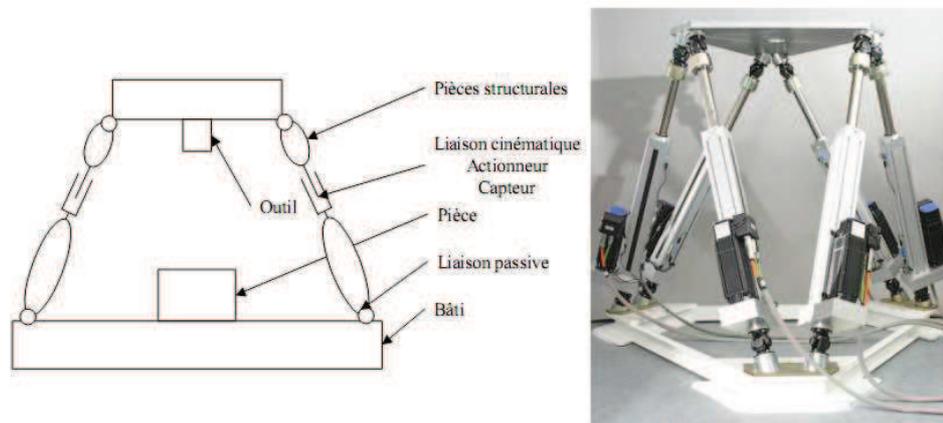


Figure 1.10: Architecture parallèle [24]

1-6 Classification des machines CNC a 5-axes

En général, Il y a trois axes de translation et deux axes de rotation pour une machine CNC à 5-axes.

Typiquement les axes de translation sont perpendiculaires aux directions x , y , et Z du système de coordonnées de la machine. Les axes de rotation sont perpendiculaires entre eux. Suivant les indications de la figure 1-11, l'axe de rotation autour de l'axe des abscisses est appelé axe A , autour de l'axe des ordonnées appelé axe B , et autour de l'axe Z est appelé axe C . Les machines de Cinq-axe peuvent être classifiées dans des groupes basés sur les éléments de rotation : la table ou bien le porte outil.

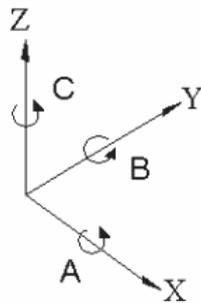


Figure 1-11 : Définition d'axes pour la machine CNC a 5-axes [25].

Pour la machine de 1-12, il y a deux axes de rotation de la table. Pour les machines 2 ou 3, il y a deux axes de rotation du porte-outil. Pour la machine de la figure 1-12, un axe de rotation est sur la table et l'autre est sur le porte-outil. [25]

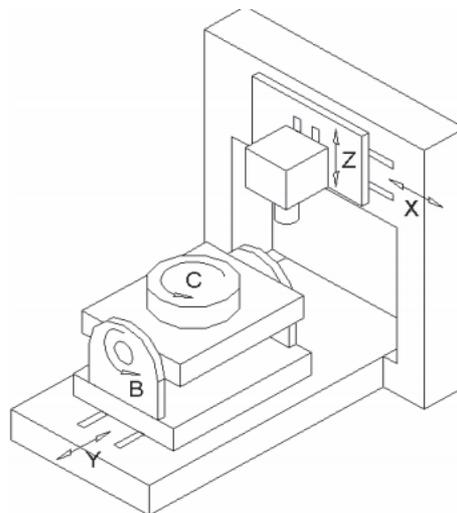


Figure 1-12 Machine CNC à 5-axes type rotation de la table et inclinaison [25]

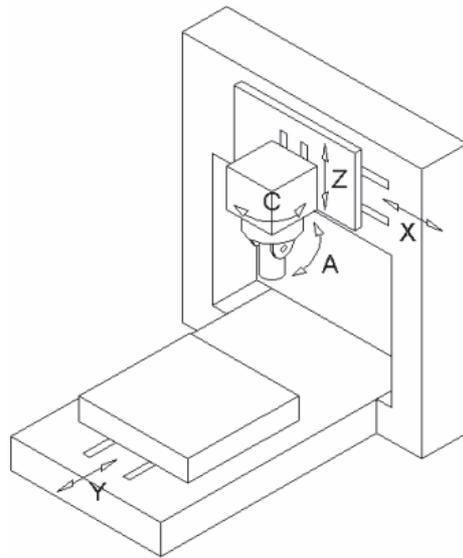


Figure 1-13 Machine CNC a 5-axes type rotation et inclinaison du porte outil. [25]

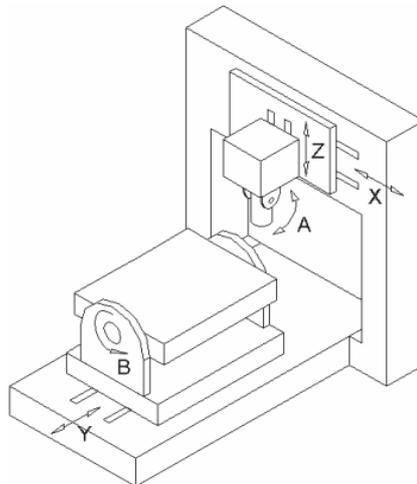


Figure 1-14 : type d'axe-table-inclinaison machine MAM72-25V CNC a 5-axes. [25]

1.7 Choix de la machine

Le choix d'une machine à 5 axes pour une certaine application n'est pas une tâche facile. Il peut être fait en analysant des caractéristiques de l'objet telles que le poids et la taille.

Par exemple, un objet très lourd exige une machine avec une table horizontale qui le rend plus commode pour fixer et manipuler l'objet.

Pour notre étude nous avons pris comme exemple la machine Matsuura MAM72-25V CNC 5 axes.

Cette machine possède les caractéristiques présentées dans le tableau 1.1



Figure1.15 Matsuura MAM72-25V [26]

Tableau 1-1 Caractéristiques de machine Matsuura MAM72-25V [26]

Voyage:X/Y/Z	Mm	550 / 410 / 450 (21,65 / 16,14 / 17,71)
Voyage:B/C	Deg	-110 ~ +110 / 360
Surface de travail	mm (.)	Ø170 <input type="checkbox"/> standard Ø130 <input type="checkbox"/> avec PC
Max. Travail taille	Mm	Ø300 x H250 (Ø11.81 x H9.84 destinée au secteur de.) <input type="checkbox"/> standard Ø250 x H250 (Ø9.84 destinée au secteur x H9.84 destinée au secteur de.) <input type="checkbox"/> avec PC
Capacité de chargement	kg (lb.)	40 (88)
Vitesse de rotation	min ⁻¹	15 000 : BT40 <input type="checkbox"/> standard 20 000 : BT40 <input type="checkbox"/> Option 33 000 : BT30 <input type="checkbox"/> Option
Vitesse Rapide:X/Y/Z	m/min (ipm)	50 (1 968,5)
Vitesse Rapide:B/C	min ⁻¹	30 / 50
Nombre d'outils		<input type="checkbox"/> Norme 30 : BT40 40 / 80 : BT40 <input type="checkbox"/> Option 90 / 120 / 150 / 180 / 210 / 240 : BT40 <input type="checkbox"/> Option <input type="checkbox"/> Option 30 : BT30
Nombre de Palettes		Fixe TableStandard <input type="checkbox"/> Option 2 Option 10 Option 40
Systeme NC		<i>Koichiro Matsuura a G-Tech 840di</i> <i>Koichiro Matsuura a G-Tech 30i</i>

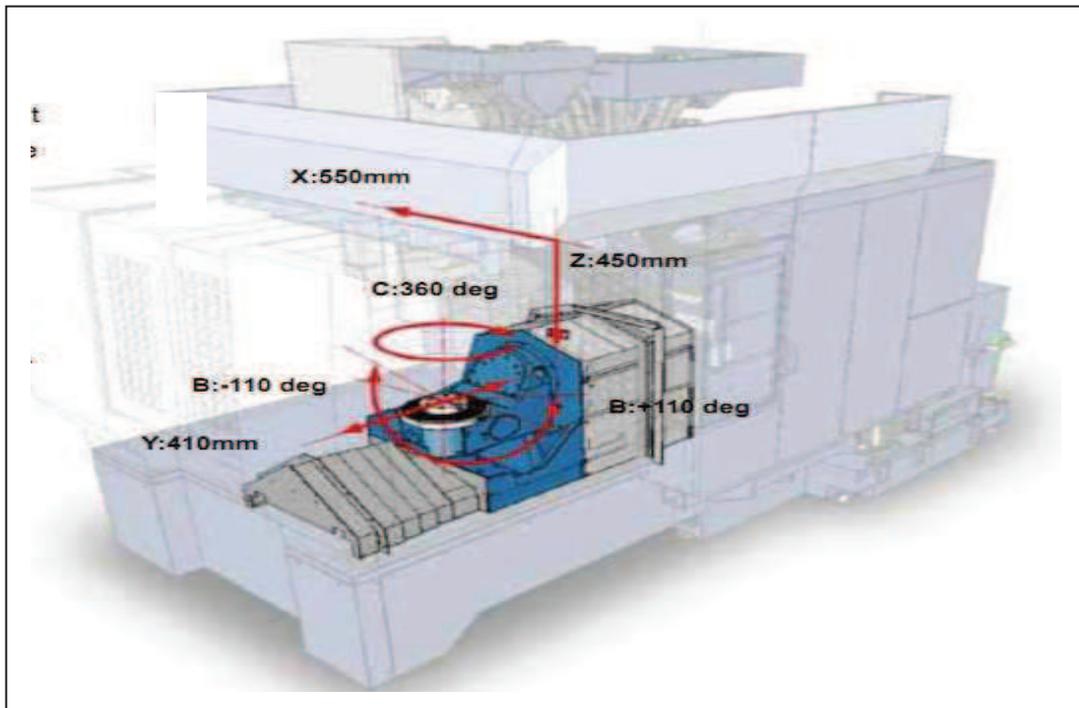


Figure 1.16 Matsuura MAM72-25V

*Chapitre 2 :
Modélisation géométrique et cinématiques des
machines 5 axes*

2.1 Modélisation géométrique

La modélisation géométrique des machines CNC à 5 axes consiste à calculer la relation entre les paramètres de configuration (coordonnées généralisées) et les paramètres de position de l'organe terminal (coordonnées opérationnelles).

D'une façon générale ces transformations requièrent la connaissance de la longueur de l'outil par rapport au plan de jauge de la broche et/ou, la position de la pièce par rapport au référentiel attaché à table de la machine pour résoudre le modèle géométrique inverse et transférer les informations sur la position et l'orientation de l'outil (espace opérationnel), en coordonnées articulaires de la machine (espace articulaire). La figure 2.1 montre la transformation de l'espace opérationnel en espace articulaire par le modèle géométrique inverse (MGI) et vice versa par le modèle géométrique direct (MGD). [29]

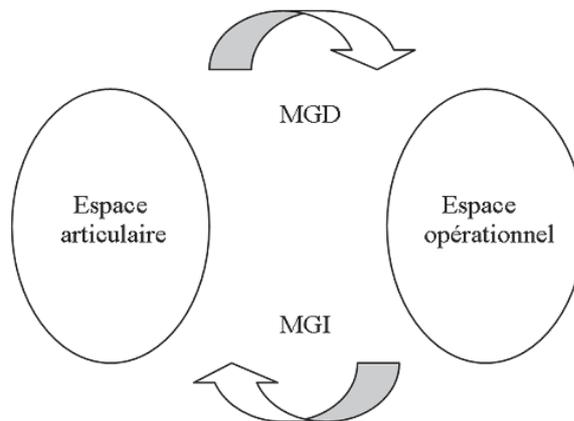


Figure 2-1: Relation entre les espaces articulaires et opérationnels [29]

Notons que le MGD des machines-outils (qui sont en général des chaînes cinématiques sérielles) donne un système d'équations linéaires et donc facile à résoudre. Par contre le MGI donne un système modal, non linéaire et beaucoup plus difficile à résoudre.

2.1.1 Modélisation géométrique direct

Le modèle géométrique direct décrit la position que prend le segment terminal de la structure (en général) lorsque les valeurs des variables articulaires sont connues c'est-à-dire pour une configuration donnée de la structure. Il est constitué de l'expression des coordonnées du

repère lié au segment terminal dans le repère de la base du mécanisme, à savoir (R_0/ R_n) et exprimé en fonction des coordonnées articulaires.

La solution du MGD peut être trouvée par plusieurs méthodes mathématiques. Dans notre étude nous avons opté pour la méthode Denavit-Hartenberg (D-H) (1955) [24] pour obtenir la MGD d'un centre usinage Matsuura MAM72-25V CNC à 5 axes.

Les directions positives du mouvement des joints articulaires sont illustrées sur la Figure 2. 2.

La pièce P est rattachée au centre du plateau et orienté au départ de la même façon que le référentiel global. Le référentiel T (outil) est rattaché au centre du bout demi sphérique de la fraise, son axe Z est pointé vers le haut de la broche.

La Figure. 2-3 représente la chaîne cinématique de la machine ainsi que les notations des différentes matrices de transformation qui permettent de passer d'un référentiel à un autre.

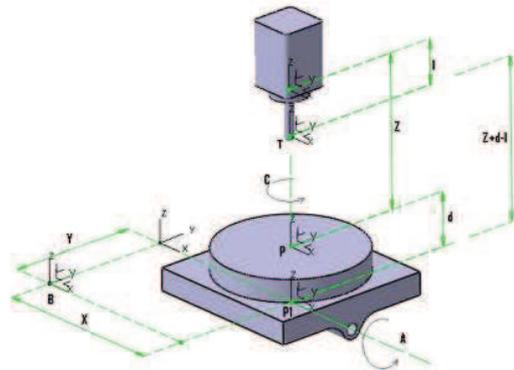


Figure 2.2 : Le schéma du centre de fraisage Matsuura à 5 axes MAM72-25V [29]

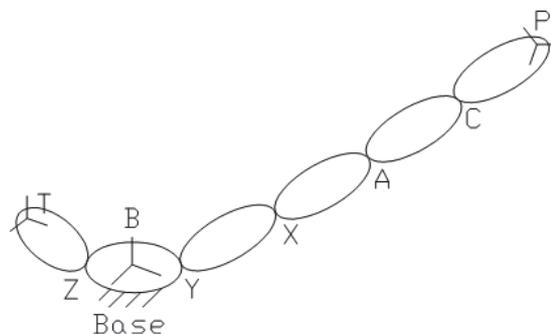


Figure 2-3 : chaîne cinématique du centre de fraisage Matsuura MAM72-25V 5-axes [29]

2.1.2 LA CONVENTION DENAVIT-HARTENBERG

En général, selon la méthode de HTM, pour deux articulations disjointes, trois translations et trois rotations seraient requises, soit six matrices homogènes HTMs, Denavit et Hartenberg (D-H) (1995) [26] ont proposé une méthode qui réduit le nombre des HTMS de base nécessaires entre les deux repères F_i et F_{i-1} à seulement quatre HTMS.

Les joints sont numérotés $0, 1, \dots, n$, la i ème paire étant défini comme étant le couplage du joint $(i-1)$ avec le joint i . Par conséquent, le manipulateur est supposé être composé de $n+1$ joints et n paires, chacune de la lettre peut être R ou P , où le lien 0 est la base fixe, tandis que n est le lien de effectuer. Ensuite, un repère de coordonnées F_i est définie par l'origine O_i et les axes X_i , Y_i et Z_i . Ce repère est fixé au joint $(i-1)$ et pas au joint i , où $i = 1, \dots, n+1$. Pour les premiers n repères, les règles suivantes sont données:

1- Z_i est l'axe de la paire i . Notez qu'il y a deux possibilités de définir les sens positif des axes, puisque chaque axe de la paire est seulement une ligne, et pas un segment dirigé. En outre, l'axe Z_i d'un couple prismatique peut être situé de manière arbitraire, puisque sa direction est définie par l'axe de cette paire.

2. X_i est définie comme la perpendiculaire commune à Z_{i-1} et Z_i , dirigé premier vers ce dernier, comme le montre la Figure 2.4a. Notez que si ces deux axes se croisent, la direction positive de X_i est indéfinie et donc, peut être librement assignée. Désormais, dans ce cas nous allons suivre la règle de la main droite. Cela signifie que les vecteurs d'unité \hat{i}_i , \hat{k}_{i-1} , et \hat{k}_i sont attachés à des axes X_i , Z_{i-1} et Z_i , respectivement, comme indiqué sur la Figure 2.4b, le \hat{i}_i est défini comme $\hat{k}_{i-1} \times \hat{k}_i$. En outre, si Z_{i-1} et Z_i sont parallèles, l'emplacement de X_i est indéfini. Pour le définir de manière unique, nous fixons que X_i passant par l'origine du repère $((i-1))$, comme le montre la figure 2.4 c.

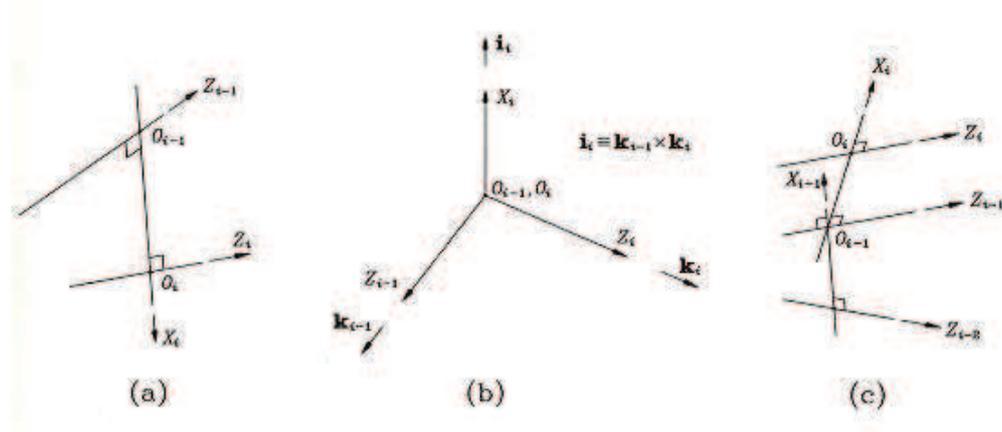


Figure 2.4: Définition de X_i lorsque Z_{i-1} et Z_i : (a) sont gauches; (b) se croisent, et (c) sont parallèles

- 3 La distance entre Z_i et Z_{i+1} est définie comme a_i qui est donc non négative.
4. La coordonnée Z_i de l'intersection O'_i de Z_i avec X_{i+1} est désigné par deux fois. Puisque cette quantité est une coordonnée, elle peut être positive ou négative. Sa valeur absolue est la distance entre X_i et X_{i+1} , appelé aussi le décalage entre perpendiculaires communes successives.
5. L'angle entre Z_i et Z_{i+1} est défini comme α_i et est mesurée sur la direction positive de X_{i+1} . Cet élément est connu comme l'angle de torsion entre les axes paire successive.
6. L'angle entre X_i et X_{i+1} est défini comme θ_i et est mesurée sur la direction positive de Z_i .

En résumé, un manipulateur à n -axes est composé de $n+1$ joints and $n+1$ repères de coordonnées comme F_1, F_2, \dots, F_n . Ces règles sont mises en évidence par un exemple. L'architecture du robot PUMA est représentée sur la Figure (2.5). Les sept joints, numérotés de 0 à 6, et sept systèmes de coordonnées numérotés de 1 à 7. Notez que le dernier repère est définie arbitrairement, mais son origine est placée au point spécifique de effectuer, à savoir, au point de fonctionnement, P.

Par conséquent, selon ces règles, chaque HTM relatives aux systèmes de coordonnées $(i-1)$ et i

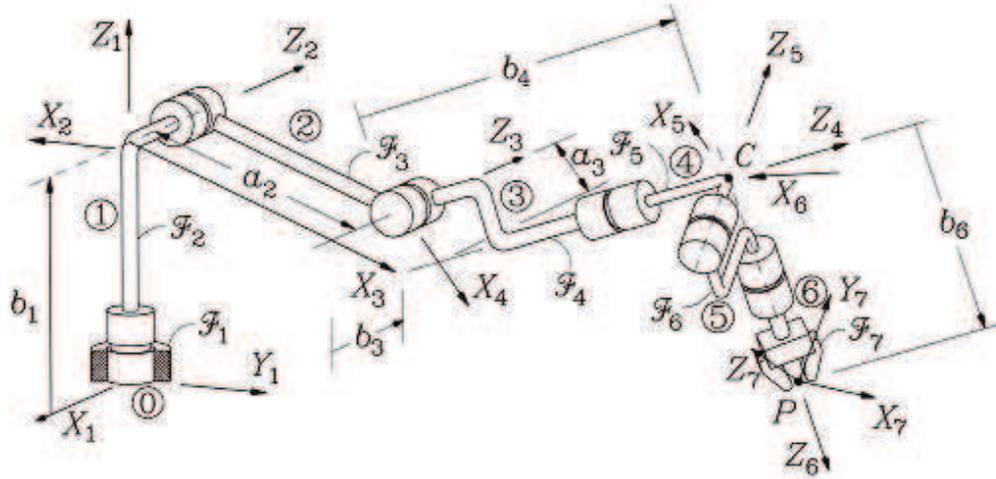


Figure 2.5: Coordonnées les cadres de robot PUMA

peut être défini à partir de la composition de quatre HTMS de base comme suit :

1. Tourner autour de l'axe de Z_{i-1} d'un angle de θ_i pour aligner le X_{i-1} axe avec les axes X_i .
2. Se déplacer le long de l'axe Z_{i-1} sur une distance b_i et faire coïncider les axes X_{i-1} et X_i .
3. Se déplacer le long de l'axe X_i sur une distance de a_i et ramener les deux origines ainsi que les axes X en coïncidence.
4. Tourner autour de l'axe X_i un angle de α_i et ramener les deux systèmes de coordonnées dans coïncidence.

Ces rotations et translations entre deux systèmes de coordonner F_{i-1} et F_i est représenté sur la Figure 2.5. Les matrices de transformation homogènes DH, notées ${}^{i-1}A_i$, exprimant la position de F_i rapport à F_{i-1} . Par conséquent, ${}^{i-1}A_i$, est donnée comme suit :

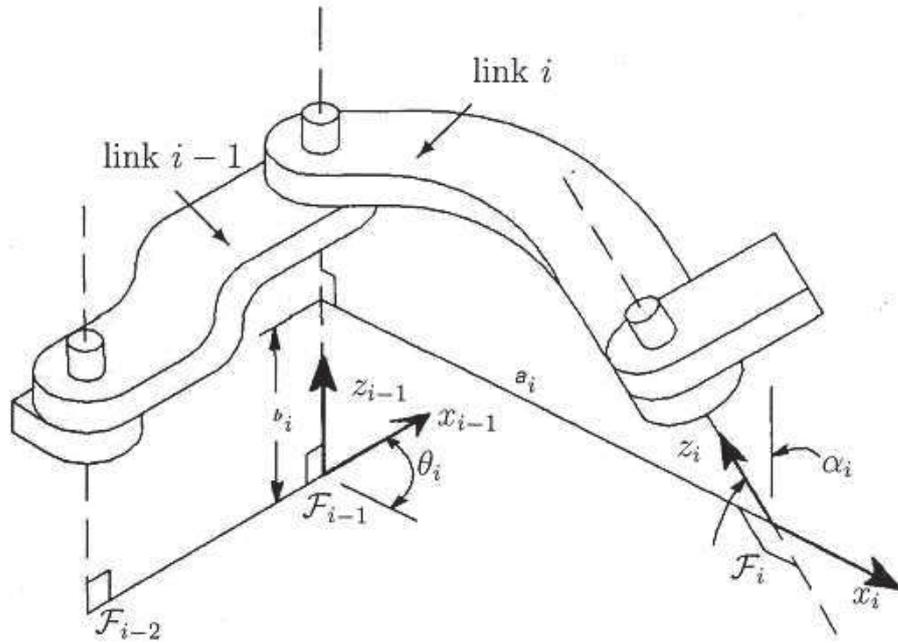


Figure 2.6 : Paramètres de D-H [26]

$${}^{i-1}A_i = \text{Rot}(Z, \theta_i) \text{Trans}(Z, b_i) \text{Trans}(X, a_i) \text{Rot}(X, \alpha_i) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ainsi, à partir de multiplications ci-dessus, nous obtenons la matrice de transformation DH suivante :

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \sin\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

La géométrie de chaque joint est décrite par quatre paramètres que : θ_i ; a_i ; b_i et α_i .

Ces quatre paramètres définissent complètement n'importe quelles articulations rotoïdes et prismatiques. Le a_i et α_i sont les paramètres fixes de la liaison et déterminent la structure de la liaison. θ_i est variable quand il s'agit d'une rotoïde et b_i est variable pour l'articulation

prismatique. Ainsi, un manipulateur à n axes a n variables articulaires. L'architecture d'un manipulateur est parfaitement définie par les paramètres D-H, ces paramètres peuvent être résumés en un tableau. Figure (2.7 a) montre le robot Fanuc M16iB dans sa position initiale à titre d'exemple. Figure (2.7 b) illustre ses systèmes de coordonnées et les paramètres DH. L'architecture du robot Fanuc M16iB est parfaitement définie par ses paramètres DH résumés dans le tableau 2.1.

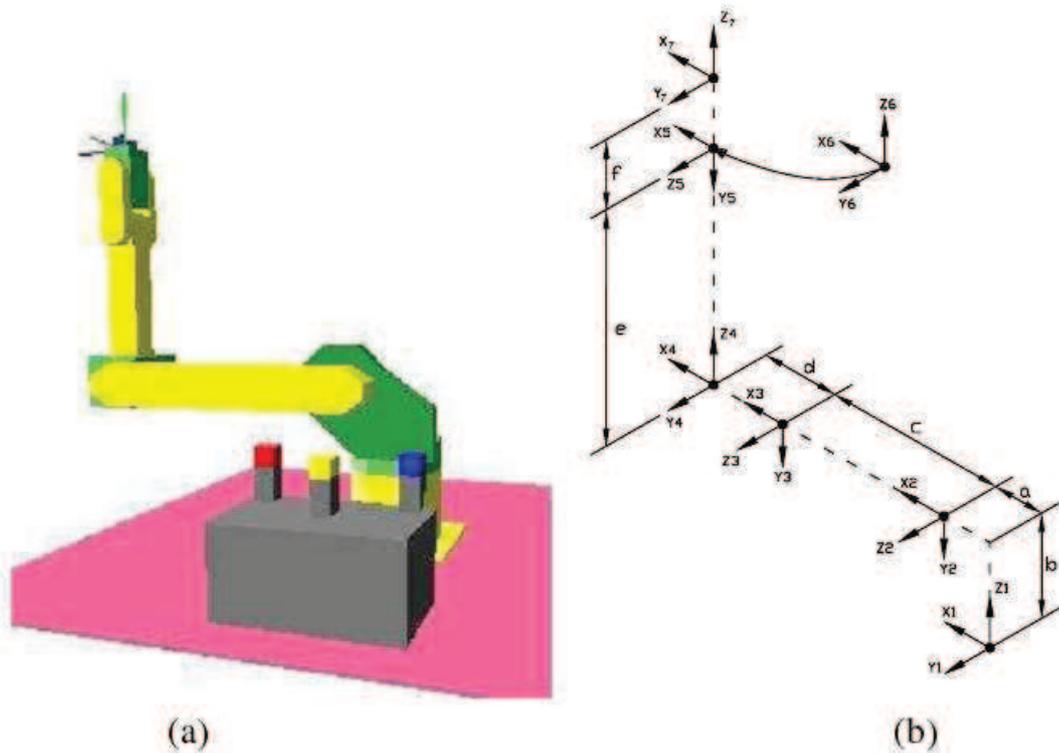


Figure 2.7 : (a) Le robot FanucM16iB dans sa position initiale; (b) Les systèmes de coordonnées du robot FanucM16iB. [29]

i	θ_i°	a_i	b_i	α_i°	$i+1$
1	θ_1	a	B	-90	2
2	θ_2	c	0	0	3
3	θ_3	d	0	90	4
4	θ_4	0	E	-90	5
5	θ_5	0	0	90	6
6	θ_6	0	F	0	7

Tableau 2.1 : Paramètres de D-H du robot FanucM16iB [29]

2.2.2 Modélisation de D-H du Matsuura

Dans cette partie le modèle géométrique direct du centre de fraisage à 5 axes Matsuura est étudié en utilisant la méthode D-H. La figure (2.3) montre la chaîne cinématique, alors que fig. 2.8 montre la géométrie de la machine CNC à 5-axes Matsuura à sa position initiale. Dans cette configuration, l'origine des coordonnées du porte-outil G coïncide avec l'origine des coordonnées P du centre de la table. La table de la machine a deux axes rotatifs C et A, et deux axes prismatiques X et Y. La colonne de la machine est fixe et a B comme système de coordonnées, le porte-outil a un axe prismatique vertical Z. Quand nous fixons un outil sphérique et une fraise en bout dans le support d'outil, nous devons ajouter la longueur d'outil l à Z. par exemple, quand C, A, X, Y sont égales à zéro donc $Z=d+l$. La figure 2.9 montre la machine Matsuura MAM72-25V avec un outil de la longueur l quand le centre de l'outil est au centre supérieur de la table. Si nous considérons la table de la machine-outil fixe et le système de coordonnées de la pièce P de coordonnée parallèle au système de coordonnée de la base, au lieu d'une chaîne cinématique arborescente, nous aurons une chaîne cinématique série telle que la machine se déplace relativement au système de coordonnée la pièce. Nous pouvons créer des paramètres de D-H directement de la pièce à l'outil selon le tableau 2.2 en tant qu'expositions sur le figure (2.10). Les matrices de transformation homogène entre les joints voisins F_i à F_{i+1}

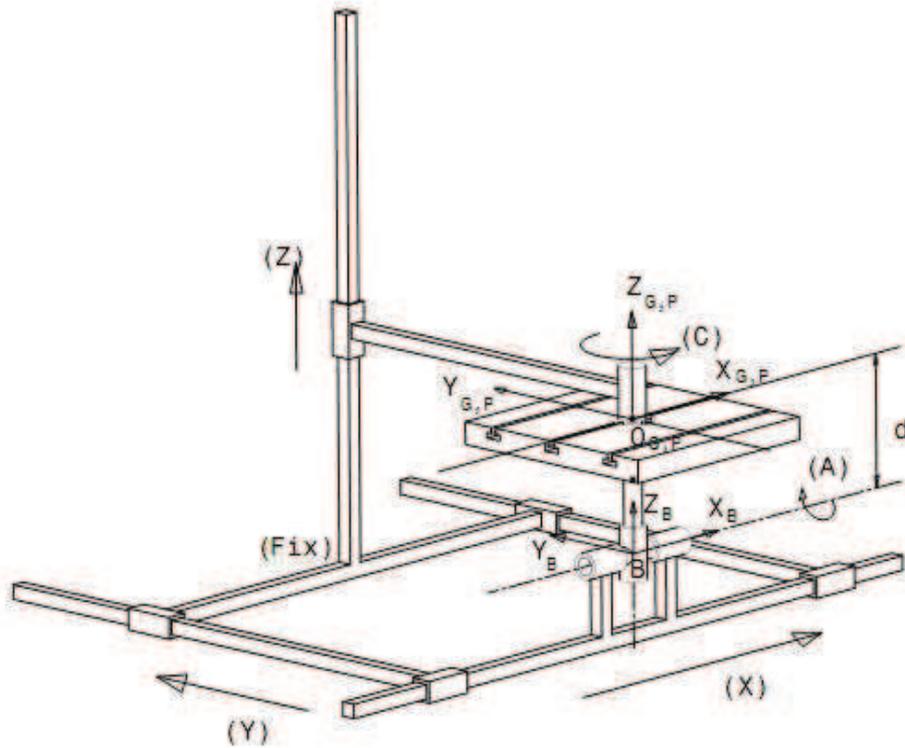


Figure 2.8 : La géométrie du centre de fraisage à 5-axes de Matsuura MAM72-25V [29]

Sont calculées à partir de l'équation (3.1), ainsi ${}^P A_I$ à ${}^5 A_T$ peut être calculé comme suit :

$$\begin{aligned}
 {}^P A_I &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1 A_2 = \begin{bmatrix} \cos(C) & 0 & \sin(C) & 0 \\ \sin(C) & 0 & -\cos(C) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^1 A_2 &= \begin{bmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^2 A_3 = \begin{bmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^3 A_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^4 A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5 A_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z + d + l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

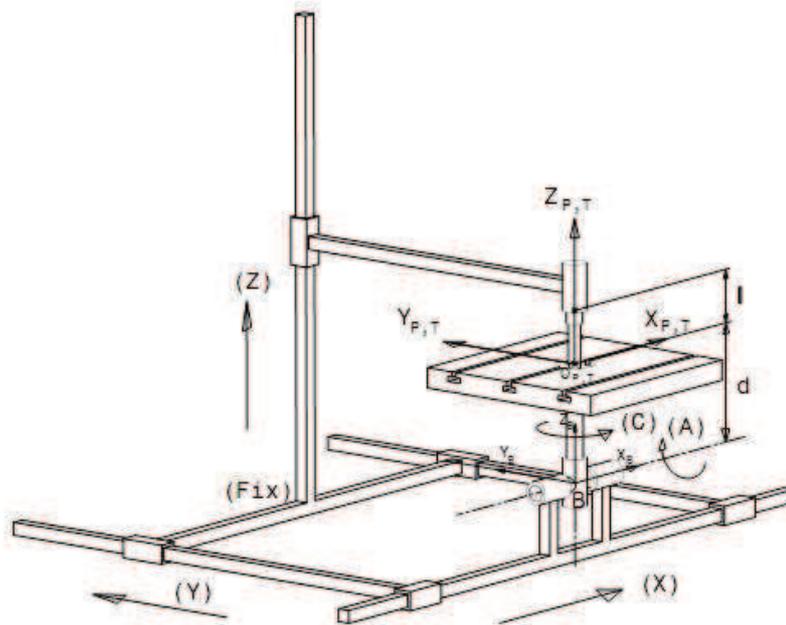


Figure 2.9 : Matsuura avec un outil sphérique et fraise en bout de longueur l à la position initiale [29]

Tableau 2.2 : Paramètres de D-H à partir des systèmes de coordonnées de la pièce à l'outil

i	θ_i	a_i	b_i	α_i	$i+1$
P	90	0	0	180	1
1	C	0	d	90	2
2	A	0	0	0	3
3	-90	0	X	90	4
4	90	0	Y	90	5
5	180	0	d+Z-1	0	T

Nous avons:

$${}^P A_T = {}^P A_1 {}^1 A_2 {}^2 A_3 {}^3 A_4 {}^4 A_5 {}^5 A_T \quad (2.2)$$

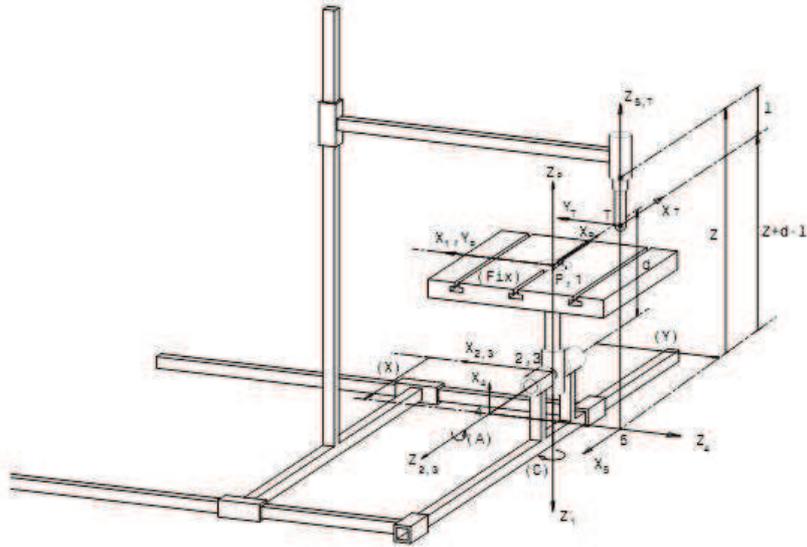


Figure 2.10 : Armatures du même rang de Matsuura [29]

$${}^P A_T = \begin{bmatrix} C_C & C_A S_C & S_A S_C & -X C_C - Y C_A S_C + (Z + d - l) S_A S_C \\ -S_A & C_A C_C & S_A C_C & X S_C - Y C_A C_C + (Z + d - l) S_A C_C \\ 0 & -S_A & C_A & Y S_A + (Z + d - l) C_A - d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} C_C : \cos C \\ C_A : \cos A \\ S_A : \sin A \\ S_C : \sin C \end{cases}$$

Les trois premières rangées des deux dernières colonnes de l'équation. 2.3 fournissent l'orientation et la position de d'outil notés O et P, respectivement. Le MGD du Matsuura est :

$$P = \begin{bmatrix} -X C_C - Y C_A S_C + (Z + d - l) S_A S_C \\ X C_C - Y C_A C_C + (Z + d - l) S_A C_C \\ Y S_A + (Z + d - l) C_A - d \end{bmatrix} \text{ et } O = \begin{bmatrix} S_A S_C \\ S_A C_C \\ C_A \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$P = [x \quad y \quad z]$$

où

$$x = -X \sin(C) - Y \cos(A) \sin(C) + (Z + d - l) \sin(A) \sin(C)$$

$$y = X \sin(C) - Y \cos(A) \cos(C) + (Z + d - l) \sin(A) \cos(C)$$

$$z = Y \sin(A) + (Z + d - l) \cos(A) - d$$

$$O = [i \quad j \quad k] \text{ où}$$

$$i = \sin(A) \sin(C)$$

$$j = \sin(A) \cos(C)$$

$$k = \cos(A)$$

2.1.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique direct d'une machine permet de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires.

Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Lorsqu'elles existent, la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles constitue le modèle géométrique inverse.

2.1.2.1 Obtention de la solution

Le MCI exprime la position de l'articulation quand la position et l'orientation du système des coordonnées de l'outil (T) lié au système des coordonnées de la pièce P est connue. De l'équation (2.4) du MCD du Matsuura MAM72-25V, le vecteur O présente les angles A et C, tandis que le vecteur P fournit X, Y et Z.

Si le vecteur $O = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_A S_C \\ S_A C_C \\ C_A \end{bmatrix}$ nous aurons :

$$A = \pm \arccos(k) \text{ où } A \neq 0 \quad (2.5)$$

$$c = \arctan2(i/\sin A, j/\sin A) \quad \text{ou } C = \arctog(i/j)$$

Si le vecteur

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -XC_C - YC_A S_C + (Z + d - l)S_A S_C \\ XS_C - YC_A C_C + (Z + d - l)S_A C_C \\ YS_A + (Z + d - l)C_A - d \end{bmatrix}$$

On obtient le développement :

$$\begin{bmatrix} -C_C & -C_A S_C & S_A S_C \\ S_C & -C_A C_C & S_A C_C \\ 0 & S_A & C_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - (d - l)S_A S_C \\ y - (d - l)S_A C_C \\ z + d - (d - l)C_A \end{bmatrix}$$

Il y a un système $AX=b$ où A est une matrice orthogonale et $A^{-1}=A^T$, ainsi $X = A^T b$. En simplifiant, le MGI devient :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_C x + S_C y \\ -C_A S_C x - C_A C_C y + S_A(z + d) \\ S_A S_C x + S_A C_C y + C_A(z + d) - (d - l) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$X = -x \cos(C) + y \sin(C)$$

$$Y = -x \cos(A) \sin(C) - y \cos(A) \cos(C) + (z + d) \sin(A)$$

$$Z = x \sin(A) \sin(C) + y \cos(A) \cos(C) + (z + d) \cos(A) - (d - l)$$

2.2 Modélisation cinématique

2.2.1 Modélisation cinématique direct

Le modèle cinématique direct (MCD) permet de passer de la vitesse articulaire de la machine à la vitesse dans le domaine cartésien.

2. 2.1.1 Modélisation de la vitesse

Au niveau déplacement, si X représente la position et θ représente les angles articulaires, l'équation $X = f(\theta)$ représente le modèle cinématique direct (MCD) d'un manipulateur. Au niveau vitesse, la relation entre \dot{X} et $\dot{\theta}$ est

$$\dot{X} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (2.7)$$

où \dot{X} représente le torseur de l'effecteur, $\dot{\theta}$ représente la vitesse articulaire le long de la chaîne soit rotoïde ou prismatique, et $J(\theta)$ est la matrice Jacobienne du manipulateur. Ils sont définies par l'équation :

$$\dot{X} \equiv \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{p} \end{bmatrix} \in R^6 ; J(\theta) \equiv \frac{\partial f}{\partial \theta} \in R^{6 \times n}, \dot{\theta} \equiv \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

De l'équation (2,8), \dot{X} est une matrice colonne à six dimensions qui se compose de ω ,

le vecteur vitesse angulaire de l'origine des F_n dans F_0 , et le vecteur vitesse \dot{p} de l'origine des F_n dans F_0 . Ici, la matrice de jacobienne est une fonction qui mappe le taux mixte dans torseur de l'effecteur, et qui dépend de θ , la position de l'articulation. La matrice jacobienne peut être déterminée de deux manières : forme différentielle et forme vectorielle.

2.2.1.2 Forme différentiel de la matrice jacobienne

Selon l'équation. (2,2), la matrice jacobéenne peut être déterminée comme dérivées partielles de la position de l'effecteur X par rapport à la position de l'articulation θ à partir du modèle CD des manipulateurs :

$$J(\theta) = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial \theta_6} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \in R^{6 \times n} \quad (2.9)$$

où n est le nombre de joints. Le modèle CD de la Matsuura, est donné par l'équation. (2,4).

La position du joint θ et la position de l'outil X sont définis comme suit :

$$\theta \equiv \begin{bmatrix} C \\ A \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \in R^5, X \equiv \begin{bmatrix} O \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_O(\theta) \\ f_P(\theta) \end{bmatrix} \in R^6, \text{ and } P \in R^3 \quad (2.10)$$

Malheureusement, l'écart total de O par rapport au temps n'est pas le même que celui du vecteur vitesse angulaire, c'est-à- $\dot{o} \neq \omega$ et donc, nous n'avons pas d'autre alternative que de faire une interprétation géométrique pour déterminer ω .

Selon la figure 2.2, le vecteur vitesse angulaire de l'articulation C lié à P est $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

Le vecteur vitesse angulaire de l'articulation A est $\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, en multipliant ce vecteur par la

matrice de rotation $\begin{bmatrix} C_C & S_C & 0 \\ -S_C & C_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ nous obtenons le vecteur vitesse angulaire de l'articulation

$$\text{A liée P} \quad \begin{bmatrix} -C_C \\ S_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_C & S_C & 0 \\ -S_C & C_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Il est clair que, nous avons la même vitesse angulaire de trois articulations prismatiques. Par conséquent, la vitesse angulaire de l'outil exprimé dans le système de coordonnées de la table est donnée par :

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \dot{C} + \begin{bmatrix} -C_C \\ S_C \\ 0 \end{bmatrix} \dot{A} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{Y} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{Z} \quad (2.11)$$

De l'équation (2,9) \dot{P} , la vitesse de l'outil lié à P est obtenue comme suit :

$$\dot{P} = \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} f_P(\theta) = \frac{\partial f_P}{\partial C} \dot{C} + \frac{\partial f_P}{\partial AC} \dot{A} + \frac{\partial f_P}{\partial X} \dot{X} + \frac{\partial f_P}{\partial Y} \dot{Y} + \frac{\partial f_P}{\partial Z} \dot{Z}$$

La dérivée par rapport au temps de P, donnée à partir de l'équation. (2,4) est alors :

$$\begin{aligned} \dot{P} = & \begin{bmatrix} S_A C_C (z - l + d) \\ -S_A S_C (z - l + d) \\ 0 \end{bmatrix} \dot{C} + \begin{bmatrix} C_A S_C (z - l + d) \\ C_A C_C (z - l + d) \\ -S_A (z - l + d) + C_A Y \end{bmatrix} \dot{A} + \begin{bmatrix} -C_C \\ S_C \\ 0 \end{bmatrix} \dot{X} + \begin{bmatrix} -C_A S_C \\ -C_A C_C \\ S_A \end{bmatrix} \dot{Y} + \\ & \begin{bmatrix} -S_A S_C \\ S_A C_C \\ C_A \end{bmatrix} \dot{Z} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Par conséquent, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} W \\ \dot{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -C_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_C & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_A C_C (z - l + d) & C_A S_C (z - l + d) & -C_C & -C_A S_C & -S_A S_C \\ -S_A S_C (z - l + d) & C_A C_C (z - l + d) & S_C & -C_A C_C & S_A C_C \\ 0 & -S_A (z - l + d) + C_A Y & 0 & S_A & C_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{C} \\ \dot{A} \\ \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Où

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -C_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_C & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_A C_C (z-l+d) & C_A S_C (z-l+d) & -C_C & -C_A S_C & -S_A S_C \\ -S_A S_C (z-l+d) & C_A C_C (z-l+d) & S_C & -C_A C_C & S_A C_C \\ 0 & -S_A (z-l+d) + C_A Y & 0 & S_A & C_A \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Est la matrice jacobienne de la machine Matsuura a exprimée dans le repère pièce.

2.2.1.3 Forme vectorielle de la matrice jacobienne

Whitney (1972) [37] a redéfini la matrice jacobienne sur la base de vecteurs. La Figure (2.11) montre un manipulateur général à n axes, O_i est l'origine du système de coordonnées i , attaché à la liaison ($i-1$) . Un vecteur unitaire e_i est associé à chaque axe de révolution. Le vecteur P désigne la vecteur position du point P attaché à l'effecteur et aussi le vecteur r_i est défini comme la vecteur position de la origine O_i avec le point p dirigée du premier au second, c'est à dire

$$r_i \equiv a_i + a_{i+1} + \dots + a_n \quad (2.15)$$

et a_i est défini d'après la Fig. (3.6) et l'équation (3,1) comme :

$$a_i \equiv \begin{bmatrix} a_i \cos \theta_i \\ a_i \sin \theta_i \\ b_i \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Il a montré que la matrice jacobéenne peut être définie comme :

$$J(\theta) = [J_1 \ J_2 \ \dots \ J_{1n}]_{6 \times n} \quad (2.17)$$

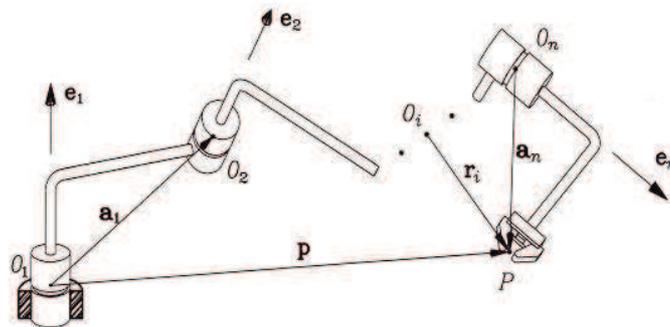


Figure 2.11: General n -axe manipulateurs [29]

où $J_i \in R^6$ est la i colonne de la matrice jacobienne et n est le nombre d'articulation du manipulateur.

J_i est défini comme; $\begin{bmatrix} e_i \\ e_i \times r_i \end{bmatrix}$ pour l'articulation rotoïde et $\begin{bmatrix} 0 \\ e_i \end{bmatrix}$ pour l'articulation prismatique.

Figure 2.12 illustre vecteurs unitaires de la position e_i et les vecteurs position r_i de la machine Matsuura à 5 axes.

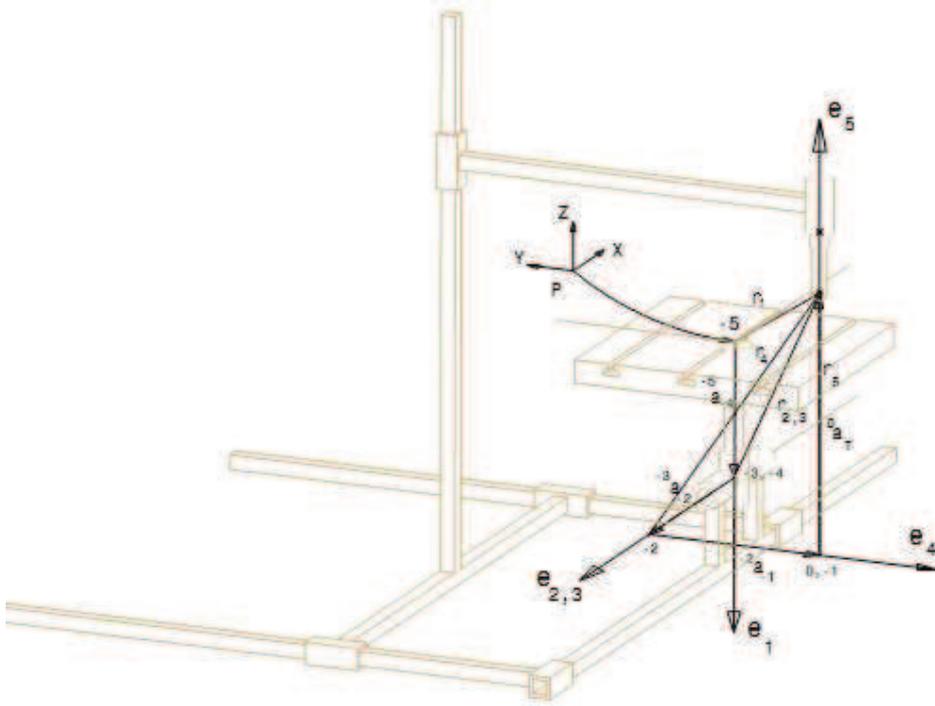


Figure 2.12: La définition de e_i et r_i pour la Matsuura [29]

Par conséquent la matrice jacobienne est donnée comme :

$$J = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & 0 & 0 & 0 \\ e_1 \times r_1 & e_2 \times r_2 & e_3 \times r_3 & e_4 \times r_4 & e_5 \times r_5 \end{bmatrix}_{6 \times 5}$$

Cette matrice est utilisée pour trouver la solution numérique de MCI .

2.2.2. MODELE CINEMATIQUE INVERSE

L'objectif du modèle cinématique inverse (MCI) des machines CNC à cinq axes est de calculer tous les ensembles possibles des angles articulaires qui pourraient être utilisés pour atteindre la position et l'orientation de l'outil. Le MCI n'est pas aussi simple que le MCD, parce que les équations de la cinématique sont non linéaires pour la majorité des manipulateurs et la solution analytique n'est pas facile (ou même parfois impossible) à résoudre. La cinématique inverse pour les machines-outils 5 axes dans la plupart du temps peut être trouvée comme une solution analytique. Le Calcul de la solution analytique est rapide et il est également facile d'appliquer les règles de choix d'une solution parmi plusieurs solutions possibles. En outre, la cinématique inverse peut être résolue en tant que solution itérative numérique. Dans la partie suivante, la solution analytique de la machine Matsuura à 5 axes est représentée, à titre d'exemple, suivie par la solution itérative numérique.

2.2.2.1 Solution analytique

Le MCI exprime la position commune lorsque la position et l'orientation du système de coordonnées (T) lié au système de coordonnées à la pièce P est connue. De l'équation (2.4) le MCD de la Matsuura, le vecteur O représente les angles A et C, alors que le vecteur P fournit X, Y et Z.

Si le vecteur $O = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_A S_C \\ S_C C_C \\ C_A \end{bmatrix}$ nous aurons

$$\begin{aligned} A &= \pm \arccos(k) \text{ where } A \neq 0, \\ C &= \arctan 2\left(\frac{i}{\sin(A)}, \frac{j}{\sin(A)}\right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Si le vecteur $P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -XCC - YCASC + (Z + d - l)SASC \\ XSC - YCACC + (Z + d - l)SACC \\ YSA + (Z + d - l)CA - d \end{bmatrix}$, il peut être développé :

$$\begin{bmatrix} -C_C & -C_A S_C & S_A S_C \\ S_C & -C_A C_C & S_A C_C \\ 0 & S_A & C_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - (d - l)S_A S_C \\ y - (d - l)S_A C_C \\ z + d - (d - l)C_A \end{bmatrix}$$

Il y a un système de formule $AX = b$ où A est une matrice orthogonale et $A^{-1} = A^T$

ainsi $X=A^Tb$, En développant et en simplifiant le MCI on obtient :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_C x + S_C y \\ -C_A S_C x - C_A C_C y + S_A(z + d) \\ S_A S_C x + S_A C_C y + C_A(z + d) - (d - l) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Par conséquent, les équations (2.5) et (2.6) représentent la MCI du Matsuura.

4.2.2 Solution itérative numérique

La solution itérative numérique est de trouver de la valeur du vecteur de variables articulaires $\theta(t_{k+1})$ lorsque la valeur de $\theta(t_k)$ est donnée. L'algorithme 1.2 peut être utilisé pour trouver cette valeur.

Algorithm 1.2 [1]

$\theta \leftarrow \theta(t_k)$

1 find correction $\Delta\theta$

if $\|\Delta\theta\| \leq \epsilon$, then stop

else

$\theta \leftarrow \theta + \Delta\theta$

go to 1

Différentes procédures sont disponibles pour trouver la correction $\Delta\theta$ de l'algorithme 1,2. La pratique est basée sur la méthode de Newton- Gauss ou Newton- Raphson (Dahlquis et Björck) (1974). En 1969, Whitney a proposé une méthode cinématique différentielle pour résoudre le MCI des manipulateurs. Cette méthode utilise la relation entre la vitesse de l'effecteur et la vitesse articulaire, qui est représentée par une équation algébrique linéaire. Le coefficient de l'équation linéaire est la matrice jacobéenne qui est une fonction non linéaire des angles articulaires. Whitney a nommé cette méthode « Resolved-Motion-Rate » (RMR). Si X représente la position et l'orientation et θ représente les angles des articulations, l'équation $X = f(\theta)$ représente le MCD du manipulateur.

Au niveau vitesse, l'équation (2.7) montre la relation entre \dot{X} (le torseur de l'effecteur) et $\dot{\theta}$ (la vitesse articulaire). Lors d'un court intervalle de temps commun, les vitesses de l'effecteur et de l'articulation peuvent être approchées par les déplacements de l'effecteur et de l'articulation, à savoir :

$\dot{X} = \Delta X$ et $\dot{\theta} \equiv \Delta\theta$ et donc, l'équation (2,7) peut être réécrite comme :

$$\Delta X = J(\theta)\Delta\theta \quad (2.18)$$

Par conséquent, les déplacements communs $\Delta\theta$ peuvent être trouvés à partir ΔX , le petit déplacement de la position réelle de l'effecteur $X_i = f(\theta_i)$:

$$\Delta\theta = J(\theta)^{-1}\Delta X \quad (2.19)$$

ΔX est défini comme :

$$\Delta X \equiv \begin{bmatrix} Q \text{vect}(\Delta Q) \\ \Delta p \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

et $\Delta p = p_d - P$, $\Delta Q = Q^T Q_d$ où P , Q et p_d , Q_d le vecteur position réel et celui désiré et la matrice de rotation de l'effecteur. La solution itérative numérique se compose essentiellement des équations (4.13) et (1,14), comme initialement proposé par Pieper (1968) [31]. La fonction $\text{vect}(\Delta Q)$ représente le vecteur axial d'une matrice de rotation 3×3 ΔQ , et elle est calculée comme suit :

$$\text{vect}(\Delta Q) \equiv \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_{32} - q_{23} \\ q_{13} - q_{31} \\ q_{21} - q_{12} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Ainsi, la méthode « Resolved-Motion-Rate » (RMR) peut être illustrée par l' Algorithme 1.3.

Algorithme 1.3 la méthode Résolu -Motion- Taux

1 $\{P_d, Q_d\} \leftarrow$ desired pose of the EE

$\theta \leftarrow$ initial guess

$\{P, Q\} \leftarrow f(\theta)$

$\Delta Q \leftarrow Q^T Q_d$

$\Delta P \leftarrow P_d - P$

2 $\Delta \theta \leftarrow J^{-1} \Delta t$

If $\|\Delta \theta\| \leq \epsilon$, then stop;

$\theta \leftarrow \theta + \Delta \theta$,

$\Delta Q \leftarrow Q^T Q_d$

$\Delta P \leftarrow P_d - P$

go to 1

Il ya différentes versions modifiées de cet algorithme 1.3 dans la littérature. Par exemple, un facteur d'amortissement $0 < \rho < 1$ est souvent utilisé dans l'étape $\theta \leftarrow \theta + \Delta \theta$, qui devient $\theta \leftarrow \theta + \rho \Delta \theta$ afin d'éviter le dépassement de $\Delta \theta$, lorsque la procédure passe par une singularité de $J(\theta)$. Le J^{-1} est l'inverse de la matrice jacobéenne où, $J J^{-1} = J^{-1} J = I$.

L'existence de J^{-1} dépend du nombre condition de J. Le nombre condition de J, noté $k(J)$, est défini comme le rapport entre la plus grande valeur singulière σ_l de J à la plus petite, σ_s , à savoir

$$k(J) \equiv \frac{\sigma_l}{\sigma_s} (k(J) \geq 1) \quad (2.21)$$

Le $k(J)$ peut être utilisé comme une mesure de l'amplification de l'erreur dans la méthode cinématique différentiel (Salisbury et Craig 1982) [32]. Le $k(J)$ peut atteindre des valeurs allant de 1 à l'infini.

Les matrices singulières ont une plus petite valeur singulière qui s'annule, et par conséquent, leur nombre condition est infini. En d'autres termes une matrice Jacobéenne avec un grand nombre condition est proche d'une singularité, qui peut impliquer de grandes erreurs de calculs.

Chapitre 3 :
Usinage des surfaces gauches -application à
l'aide du logiciel CATIA

3.1. Introduction

Dans le cadre de l'Usinage à Grande Vitesse UGV, de nombreuses typologies de pièces sont qualifiées de formes complexes. D'un point de vue mathématique, les formes complexes sont souvent associées aux courbes ou surfaces décrites à partir de modèles polynomiaux (Bézier, B-Spline, NURBS) dans les modeleurs CAO. Néanmoins, l'analyse topologique de certaines pièces de formes complexes montre que des entités géométriques régulières sont exploitées dans leur modèle CAO. Dans le cadre de l'usinage de pièces mécaniques, la notion de formes complexes ne se limite donc pas à l'aspect géométrique du modèle de définition de la pièce. Ainsi, du point de vue des usineurs, la notion de formes complexes est plus particulièrement liée aux difficultés d'adéquation du processus d'usinage avec la géométrie à usiner. Par exemple, le choix de ressources d'usinage (outils, machines...) est parfois lié aux difficultés d'accessibilité de certaines surfaces de la pièce (surface en contre dépouille...). La difficulté d'obtenir directement la forme désirée en usinage de forme complexe engendre parfois le choix de stratégies d'usinage par balayage (figure 3.1).

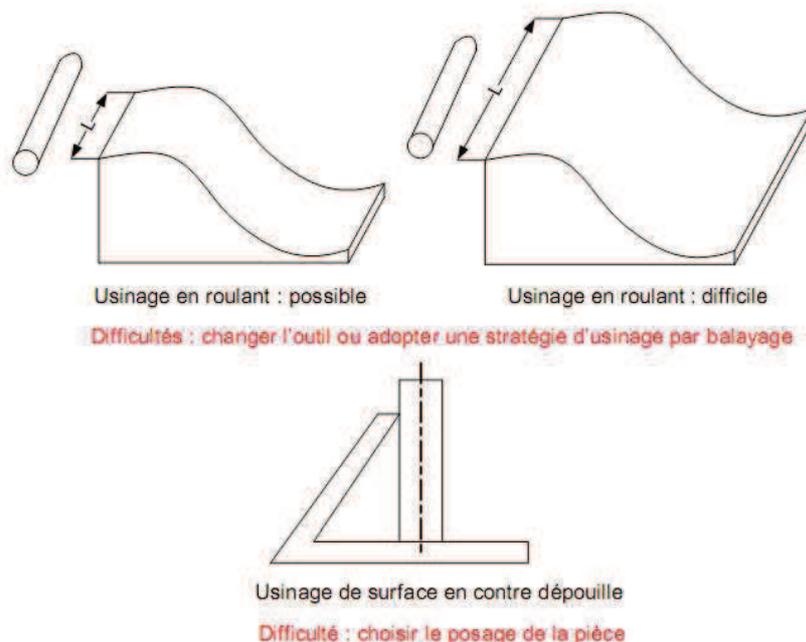


Figure 3.1 : Exemple de difficultés d'usinage

Etant donné les spécificités topologiques de chaque géométrie de pièce, il est aisé de constater que l'association du processus d'usinage est fortement liée aux compétences du préparateur à l'usinage.

Dans ce contexte, l'évolution des modèles géométriques des pièces fournis au préparateur et l'introduction de l'UGV ont fortement contribué à une évolution des pratiques industrielles au niveau du processus de fabrication et donc de sa préparation. Ceci a conduit de nombreux experts à classer les pièces usinées de formes complexes (figure 3.2):[33]

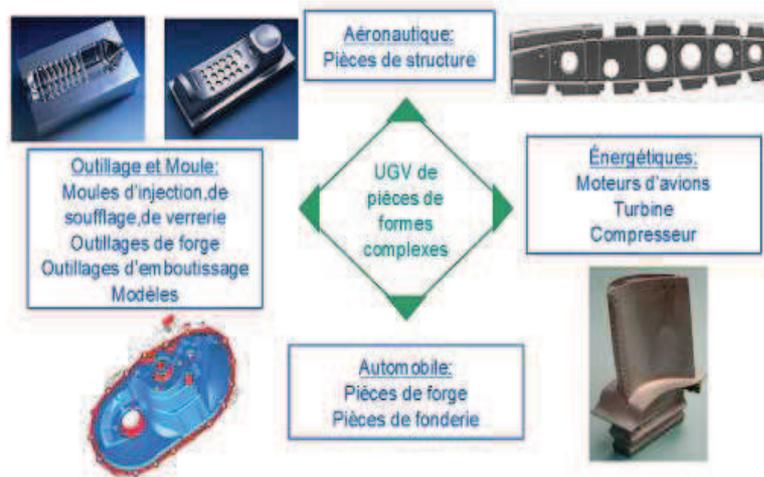


Figure 5.2 : Typologies des pièces usinées de formes complexes [33]

3.2 Modélisation des formes complexes

Les courbes et les surfaces incurvées fournissent des moyens mathématiques commodes de décrire un modèle géométrique. Au lieu d'employer des schémas, les bandes en métal, ou les modèles d'argile, les concepteurs peuvent employer des expressions mathématiques pour représenter les surfaces utilisées sur des ailes d'avion, des corps d'automobile, des pièces de machine, ou d'autres courbes et surfaces douces. L'inventeur emploie un type particulier de polynôme paramétrique, un NURBS, pour représenter des courbes et des surfaces.

3.2.1. Courbes et surface de Bézier :

3.2.1.1 Courbes de Bézier :

Pierre E. Bézier de la compagnie automobile Renault, s'est attaché à concevoir une approche mathématique qui reproduirait la pratique des concepteurs dans les processus de design géométrique des objets. Le fruit de ses recherches est le célèbre système Unisurf, utilisé par Renault depuis 1962, pour dessiner ses profils d'automobile. Il est basé sur les concepts de courbes et de surfaces de Bézier. Le principe fondamental est que tout point d'un segment de courbe est donné par une fonction paramétrique de la forme [34] :

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i \times f_i(u) \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (3.1)$$

où les P_i sont les $(n+1)$ points de contrôle, et les f_i sont les fonctions de pondération ou de forme.

Plusieurs fonctions de pondération f_i respectent ces conditions ; celles que P.

Bézier a choisie des fonctions définies par les polynômes de Bernstein $B_i(u)$.

$$f_i(u) = B_{i,n} = C_n^i u^i (1-u)^{n-i} \quad (3.2)$$

où C_n^i est le coefficient binomial défini par :

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

Notez que pour $n+1$ points de contrôle, $B_{i,n}(u)$ donnent un polynôme de degré n .

Et que pour $p(0) = P_0$ et $p(1) = P_n$, le segment de courbe passe bien par les deux points extrémité.

On peut présenter l'équation (5.1) sous forme matricielle suivante :

$$p(u) = [u^n \dots u^0] \begin{bmatrix} m_{00} & \dots & m_{0n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ m_{n0} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix}$$

Ou

$$p(u) = [U][M][B] \quad (3.3)$$

où :

[U] Vecteur de la base polynomiale d'approximation.

[M] Matrice des coefficients algébriques de Bézier

[B] Matrice des points de contrôle

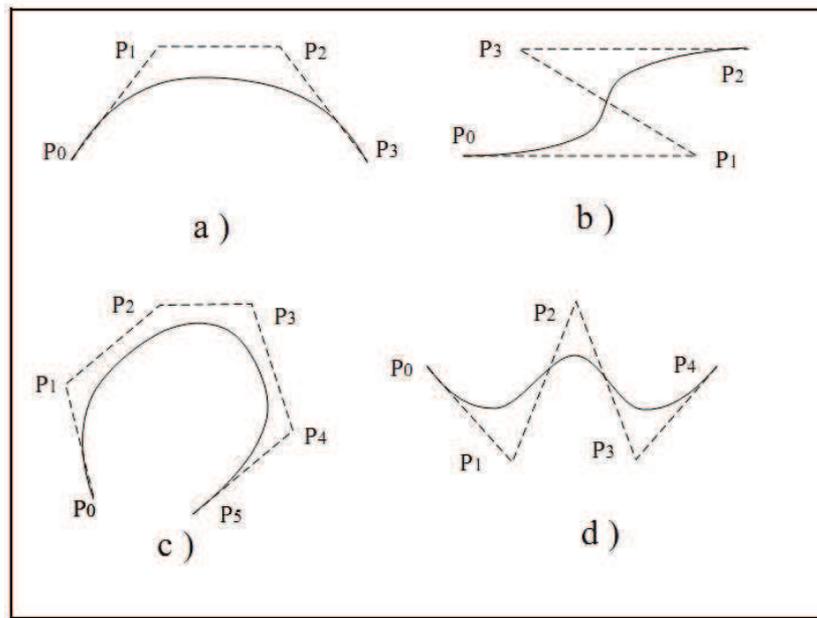


Figure 3.3 : courbes de Bézier [34]

3.2.1.2. Surfaces de Bézier :

Ici on fait une extension des principes vus sur les courbes de Bézier on cas de surface produit tensoriel de Bézier. Les surfaces sont définies de la même manière que les courbes. Dans une représentation sous forme paramétrique, l'élément de base est un carreau de surface (figure 3.4). [34]

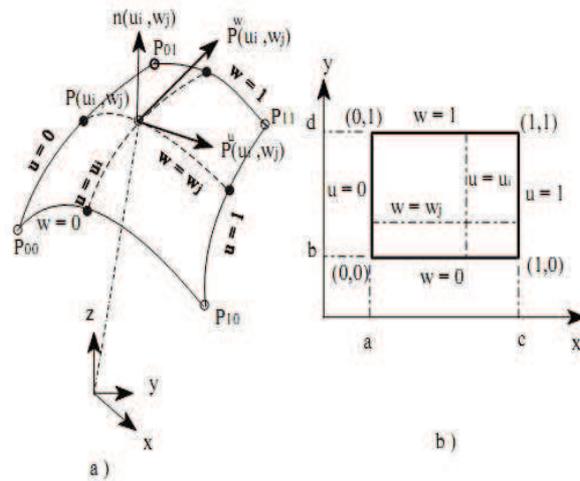


Figure 3-4 : carreau élémentaire, a) coordonnées cartésiennes, b) espace paramétrique [34].

Un carreau de surface est défini par :

$$P(u, w) = [x(u, w), y(u, w), z(u, w)] \quad u \in [0, 1], w \in [0, 1] \quad (3.4)$$

et les courbes frontières sont :

$$P(u, 0), P(u, 1), P(0, w), P(1, w)$$

Une surface de Bézier est définie par :

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,j} J_{n,i}(u) K_{m,j}(w) \quad (3.5)$$

où $J_{n,i}(u)$ et $K_{m,j}(w)$ sont des fonctions de la forme de Bernstein dans les directions paramétriques u et w définies par :

$$J_{n,i}(u) = \binom{n}{i} u^i (1 - u)^{n-1} \quad (3.6)$$

$$K_{m,j}(w) = \binom{m}{j} w^j (1 - w)^{m-1}$$

avec :

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}; \binom{m}{j} = \frac{m!}{j!(m-j)!}$$

3.2.2 Courbes et surfaces B-splines

3.2.2.1 Courbes B-splines :

Une courbe B-spline est une carte continue d'une collection d'intervalle

$t_0 < \dots < t_1$ vers \mathbb{R} , qui applique chaque intervalle $[t_i, t_{i+1}]$ vers un segment de courbe polynomiale. Chacun des nombres réels t_i est appelé nœud ou point d'arrêt et la suite des t_i définit la suite des nœuds ou vecteur nodal. Pour chaque valeur de t on peut avoir un point correspondant $p(t)$ sur la courbe. Soit alors t la valeur de $t \in [t_i; t_{i+1}]$, on peut introduire une coordonnée locale u de l'intervalle $[t_i; t_{i+1}]$ en posant :

$$u = \frac{(t-t_{i+1})}{(t_{i+1};t)} = \frac{(t-t_{i+1})}{\Delta_i} \quad (3.6)$$

Les courbes B-splines paramétriques d'ordre k (degré $k-1$) sont définies de façon générale, (comme c'était le cas pour les courbes de Bézier) par leurs points de contrôle d'après la formule

$$P(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) P_i \quad u \in [u_0, u_{max}] \quad (3.7)$$

$$2 \leq k \leq n + 1$$

où :

$P_i \quad i=0, 1, 2, \dots, n$ sont les $n+1$ points de contrôle, chacun ayant des

coordonnées x, y et z . Les points P_i définissent un polygone de contrôle.

$N_{i,k}(u)$: sont les fonctions de base B-spline normalisées (fonctions de forme) définies dans l'espace paramétrique :

$$\begin{cases} N_{i,k}(u) \begin{cases} 1 \text{ si } u \in [t_i, t_{i+1}] \\ 0 \text{ autrement} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u-t_i}{t_{i+k-1}-t_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u-t_{i+1}}{t_{i+k}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases} \quad (3.8)$$

les valeurs de t sont des éléments d'un vecteur nodal tels que $t_i \leq t_{i+1}$; ces

éléments divisent l'espace paramétrique en intervalles :

$$[t_i, t_{i+1}] \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad t_i \leq t_{i+1}$$

chacun supportant un segment polynomial de la courbe B-spline.

Le choix des nœuds, ou vecteur nodal T , influence fortement les fonctions de base B-splines $N_{i+1}(u)$ et donc la forme de la courbe résultante. Les valeurs nodales t_i au nombre de $n + k + 1$ valeurs, forment une suite monotone non décroissante de i nombres réels tels que : $t_i \leq t_{i+1}$

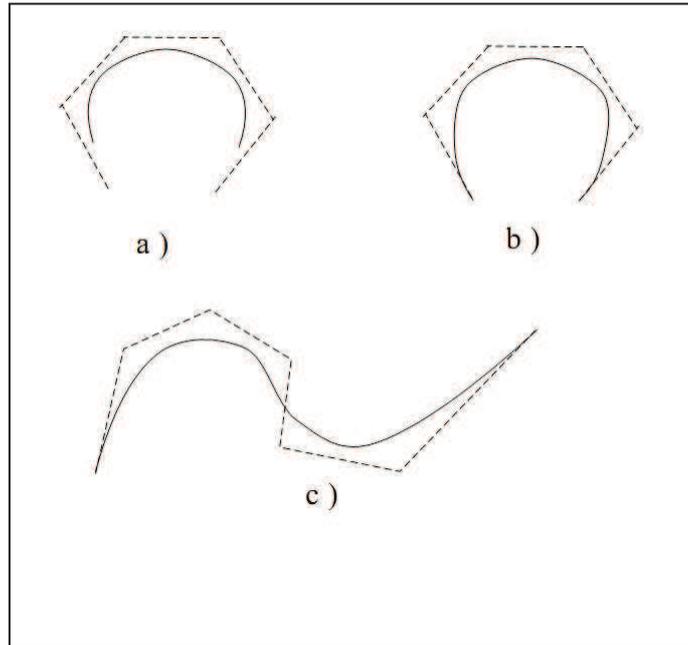


Figure 3-5 : a) la courbe B-spline uniforme périodique. b) la courbe B-spline uniforme ouvert. c) la courbe B-spline non uniforme [34].

- Propriétés des courbes B-splines :

Les propriétés intrinsèques des courbes B-splines du point de vue CAO sont :

- Les différents segments de courbes sont joints aux extrémités avec une continuité d'ordre $k-2$.

On peut abaisser l'ordre de continuité de la dérivée en augmentant la multiplicité à un ou plusieurs nœuds (répétition i.e. $t_i = t_{i+1}$).

- L'équation $p(u)$ et ses dérivées d'ordre $1, 2, \dots, k-2$ sont continues sur toute la courbe. La courbe B-spline la plus utilisée en pratique est une B-spline cubique i.e. d'ordre $k = 4$.

- Les fonctions de forme sont normalisées et forment une partition de l'unité, i.e.

pour tout u , on a :

$$\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) = 1 \quad u \in [u_0, u_n] \quad (3.9)$$

5.2.2.2. Surfaces B-spline :

Elles sont définies de la même manière que les courbes B-spline, soit :

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(w) \quad (3.10)$$

où

$N_{i,j}(u)$ est la fonction de forme dans la direction paramétrique u . i, j

$N_{i,j}(w)$ est la fonction de forme dans la direction paramétrique w . j, l

$B_{i,j}(u)$ sont les points du polyèdre de contrôle i, j

Tout comme pour les courbes B-splines, les surfaces B-splines peuvent être définies à l'aide de différents vecteurs nodaux : ouvert, périodique et non-uniforme.

Bien que généralement le même type de vecteur nodal soit utilisé dans les deux directions paramétriques, ceci n'est pas nécessaire. Une surface peut être définie par un type de vecteur nodal en direction de u et par un autre type de vecteur nodal en direction w .

Étant donné que les courbes frontières, ainsi que les courbes intérieures, sont définies à l'aide de fonctions de forme B-spline, plusieurs caractéristiques des courbes B-spline se transportent au niveau des surfaces B-splines :

- L'ordre maximal de la surface dans chacune des directions paramétriques est égal au nombre de points du polyèdre de définition dans cette direction.
- La continuité dans chacune des directions paramétriques est l'ordre de la surface dans cette direction moins deux (i.e. C^{k-2}).
- La surface est transformée en transformant le polyèdre de définition.

- Si l'ordre de la surface dans chaque direction paramétrique est égal au nombre de points du polyèdre de définition dans cette direction, et qu'il n'y a pas de nœuds intérieurs, alors la surface est une surface de Bézier.
- La surface est à inclure dans l'enveloppe convexe définie par le polyèdre de définition formé par les polygones de définition dans les deux directions paramétriques.

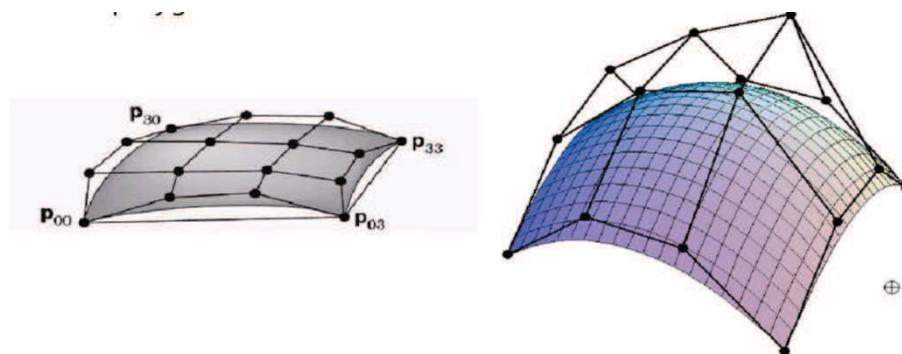


Figure 3.6 Surfaces de B-spline :

3.2.3 Courbe et surface NURBS

3.2.3.1. Courbes NURBS.

Un des outils les plus polyvalents pour la modélisation de la courbe est les non-uniformes rotationnels courbes B-spline ou une courbe NURBS comme elle est populairement appelée. Le modèle NURBS est désormais si largement utilisée qu'il est presque un standard industriel. Sa base est le ratio de deux non-uniformes de rotationnels B-Spline fonctions qui est en fait un vectoriel morceau polynôme rationnel. Comme une forme rationnelle, elle expose les propriétés d'invariance même que le fondement rationnel de Bézier en utilisant des coordonnées homogènes et les caractéristiques de la géométrie projective. Cela signifie que les courbes NURBS sont invariantes par translation, rotation, échelle, cisaillement, et en parallèle et de projection en perspective. Comme la rationnel Courbe de Bézier, nous pouvons utiliser une courbe non-uniforme rationnelle B-Spline pour représenter exactement les courbes coniques avec l'avantage supplémentaire de points locaux de contrôle. Les

courbes Non-rationnels B-Spline et les courbes Bézier rationnelles et non rationnelles sont des cas particuliers du rationnel B-splines.

Les points sur une courbe NURBS sont donnés par :

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n h_i p_i N_{i,k}}{\sum_{i=0}^n h_i N_{i,k}} \quad (3.11)$$

où (h_i) est le poids. Si le poids $h_i = 1$ pour tout i alors la fonction de base de l'équation (5.6) se réduit à la forme non-rationnelle B-splines.

Toutefois, si le poids ($h_i = 1$) pour tous (i) et si le vecteur de nœud a la forme

$T = [0,0,\dots, 0,1,1,\dots, 1]$ où 0 et 1 ont chacun K multiplicité, puis la fonction de base de cette équation se réduit à aux polynômes de base Bernstein non rationnels de degré $K - 1$ pour la courbe de Bézier. Si un poids ($h_i = 0$) alors les points de contrôle (P_i) ne contribuent pas à la forme de la courbe [35].

$$B_{i,K-1}(u)$$

Il ya trois façons de modifier la forme d'une courbe NURBS:

- Changer le vecteur de nœud.
- Déplacer les points de contrôle.
- Changer le poids.

La figure (3.8) montre une construction de forme convexe de courbe NURBS en utilisant poids différents

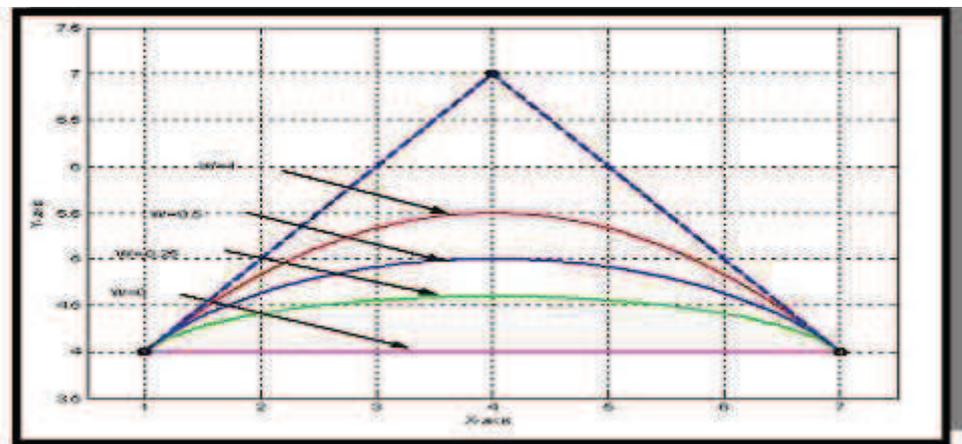


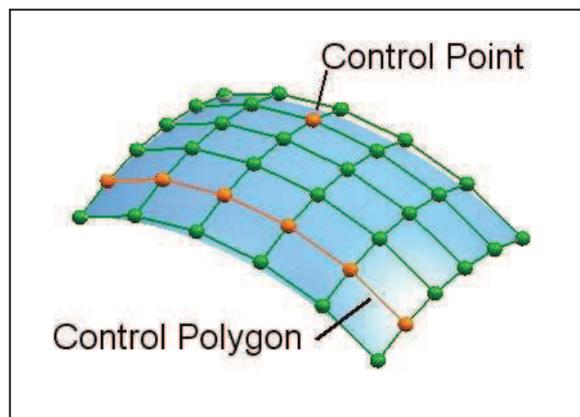
Figure (3.8): différents poids de courbe NURBS [3]

3.2.3.2 surfaces NURBS

Une surface NURBS dans \mathbb{R}^3 , c'est la projection centrale d'une surface B-spline produit t en sériel dans \mathbb{R}^4 . Autrement dit, on se donne deux vecteurs de nœuds, un polyèdre de contrôle et un poids w_{ij} pour chaque point de contrôle P_{ij} , et la surface associée est paramétrée par :

$$(u, v) \rightarrow X(u, v) = \frac{\sum_{i,j} B_{i,k}(u)B_{j,k'}(v)w_{ij}P_{ij}}{\sum_{i,j} B_{i,k}(u)B_{j,k'}(v)w_{ij}} \quad (3.12)$$

De la sorte, les courbes à u constant et à v constant sont des NURBS



Figuer (3.9) surface NURBS

3.2.4. Positionnement outil CC et CL

Le positionnement de l'outil sur la surface consiste à déterminer un couple (P, u) , où P représente le point piloté, caractéristique de la géométrie de l'outil, et u le vecteur directeur de l'axe de l'outil.[33]

Classiquement, le point piloté de l'outil est le point C_L , point extrémité. Ce couple est défini localement par rapport à la surface à usiner, au niveau du point de contact outil-pièce C_C . Le repère local associé (C_C, f, n, t) est tel que f représente le vecteur tangent à la courbe suivie, n le vecteur normal à la surface, et t le vecteur issu du produit vectoriel de f par n . La figure (3-10) positionne les points caractéristiques de l'outil suivant sa géométrie par rapport à la base locale ; C_E représente le centre de l'outil, R le rayon principal de l'outil et r le rayon de coin.

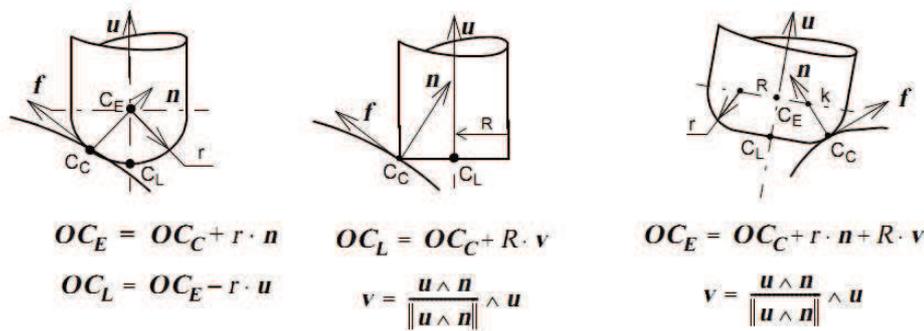


Figure 3-10 : Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil.[33]

Une fois la position de l'extrémité de l'outil déterminée, il reste à définir l'orientation de son axe. Elle est donnée dans le repère local (C_C, f, n, t) par deux angles de rotation. La figure (3.11) présente les deux méthodes utilisées pour définir l'orientation de l'axe de l'outil

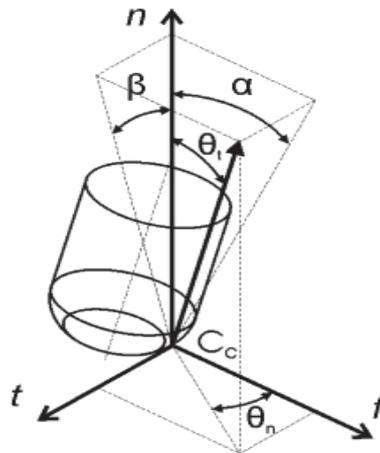


Figure 3-11 : Paramétrisation de l'orientation de l'axe outil. [33]

La notation la plus communément utilisée dans la littérature, consiste à définir le couple d'angles (θ_t, θ_n) , θ_t représente l'angle d'inclinaison (« inclination angle »), angle entre u et n , θ_n l'angle de pivotement (« screw angle ») autour de n ; l'orientation de l'axe de l'outil est obtenue par une première rotation de θ_t autour de t puis une seconde rotation de θ_n autour de n .

- La seconde notation, utilisée notamment dans les logiciels de FAO, est définie par le couple (α, β) , où α est l'angle de détalonnage (« lead angle »), défini dans le plan

contenant la direction d'avance, autour de t , et β est l'angle d'inclinaison latérale (« tilt angle »), défini dans le plan perpendiculaire à la direction d'avance autour de f .

Ce positionnement basé sur un point de contact est celui qui est le plus communément utilisé aujourd'hui. Nous pouvons noter un positionnement plus atypique qui consiste à mettre deux points C_{C1} et C_{C2} en contact entre l'outil et la pièce (figure 3-12). L'orientation de l'axe de l'outil est définie par un seul angle représentant l'inclinaison de l'outil autour de la droite (C_{C1}, C_{C2})

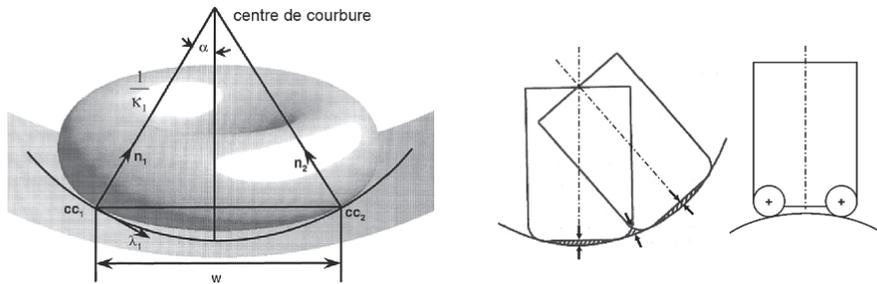


Figure 3-12 : Définition d'un contact multipoints.[33]

Nous retiendrons de cette partie que le positionnement de l'outil sur la surface à usiner est donné par le couple (C_L, u) définissant la position de l'outil et l'orientation de son axe. Ces deux éléments sont calculés à partir du point de contact outil-pièce C_C et de deux angles (θ_t, θ_n) définis dans la base locale (f, n, t) . La trajectoire est donc localement définie par le choix de ces trois paramètres. Le parcours de l'outil sur la surface permet ensuite d'enchaîner et de situer de manière relative ces positions discrètes.

3.3 Programme d'usinage APT et G-code

La programmation (CN) permet de piloter des machine-outils à commande numérique. C'est le directeur de commande numérique (DCN) qui interprète les instructions, reçoit les informations des capteurs et agit (par l'intermédiaire d'un variateur électronique) sur les moteurs. Il existe plusieurs fabricants de DCN : Fanuc, NUM, Siemens Heidenhain, Philips, Makino, Fagor, Selca, Fidia, Real Meca, MAZAK, B&R Automation. [37]

3.3.1 Programme d'usinage APT

3.3.1.1 Le Système APT

APT est le premier langage d'aide à la programmation CN. Il a été développé au MIT en 1955. C'est l'un des langages les plus utilisés dans l'industrie. Plusieurs autres langages dérivés de APT ont été développés comme NELAPT, EXAPT, UNIAPT, ADAPT et IFAPT.

Des langages non dérivés de APT ont été aussi développés. Ils sont pourvus de fonctionnalités similaires à celle de APT. Parmi ces langages, on peut citer, GNC développé en Angleterre; ELAN développé en France; GTL développé en Italie; et COMPACT II développé au USA. Les concepts utilisés dans ces systèmes sont généralement similaires à ceux de APT. Dans ce qui suit on portera notre intérêt sur le langage APT standard.

Deux composantes constituent le système APT : le processeur qui est le langage de base et le post-processeur. [38]

3.3.1.1.1 Le processeur APT

Le processeur prend comme entrée le programme source écrit par l'utilisateur et par une série de traitement vérifie les erreurs de syntaxe, de géométrie et de mouvement d'outil. Une fois le programme source corrigé par l'utilisateur, le processeur génère un fichier contenant toutes les données relatives à la position de l'outil (Cutter Location Data : CLdata) ainsi que les données technologiques telles la définition des outils coupants, les vitesses de coupe et d'avance et la lubrification. Ce fichier est appelé fichier de position d'outil (Cutter Location File : CLfile).

Le CLfile est écrit dans le même langage que le fichier source à savoir le langage APT mais il ne comprend pas les données géométriques initialement présentes dans le fichier source APT. Le CLfile n'est pas directement exploitable par le contrôleur de la machine. Une deuxième étape est donc nécessaire pour traduire le CLfile en un fichier spécifique à la CN de la machine (programme CN). La traduction est effectuée à l'aide du post-processeur, la deuxième composante du système APT. La figure suivante

illustre les différentes composantes d'un système APT ainsi que les différentes étapes nécessaires à la génération du fichier CN :

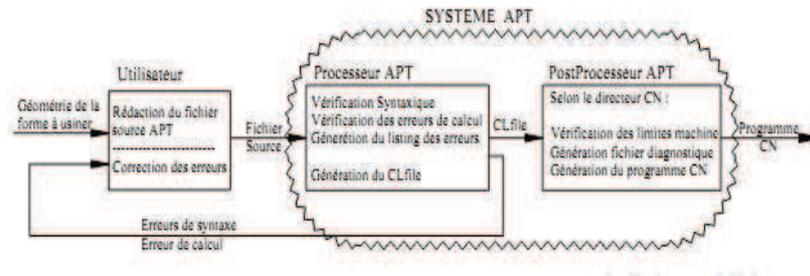


Figure 3-13 : Structure du système APT [38]

Comme les contrôleurs sont différents d'une machine à une autre, il faut avoir autant de postprocesseurs que de contrôleurs différents.

3.3.1.1.2 Le postprocesseur APT

Le postprocesseur joue un rôle important dans le système APT d'aide à la programmation CN. Le processeur génère un fichier CLfile qui définit les positions de l'outil nécessaires aux opérations d'usinage. Le CLfile contient également des informations relatives aux outils utilisés et les conditions technologiques.

Les données générées du CLfile doivent être ensuite converties par le postprocesseur dans un format spécifique à la machine. Les différentes fonctions du postprocesseur sont entre autres :

- Conversion du CLdata dans le système de coordonnées de la machine outil.
- Vérification de la violation des limites de déplacement de la machine.
- Vérifications de la violation de la vitesse limite d'avance et de rotation de la broche.
- Choix des commandes appropriées en utilisant les instructions disponibles en code G.
- Exploitation des fonctions spécifiques à la machine.
- Génération de fichiers de diagnostique, d'instructions opératoires et du programme CN.
- ...

3.3.1.2 Eléments du Langage APT

Un programme d'une pièce en APT est constitué d'instructions permettant de définir la géométrie à usiner, l'outil à utiliser et les conditions technologiques (vitesse de coupe et d'avance) ainsi les déplacements ou mouvements de l'outil dans chaque opération à exécuter. Chaque instruction est composée d'éléments respectant un certain nombre de règles de syntaxe. Ces éléments sont :

- la ponctuation,
- les mots réservés du vocabulaire APT (mots clefs),
- les nombres,
- les symboles
- et les étiquettes.

3.3.1.2.1 Ponctuation

Pour supporter le calcul, APT possède des opérateurs arithmétiques comme l'addition (+), la multiplication (*), la division (/) et la puissance (**). Une instruction APT comprend également des caractères spéciaux pouvant être utilisés comme opérateur spécifique tels que :

/ La barre oblique est utilisée pour séparer une instruction en mots mineurs et mots majeurs. Le mot majeur est situé à gauche et le mot mineur à droite.

, La virgule est utilisée pour séparer les éléments dans une instruction.

. Le point indique la partie décimale d'un nombre réel.

= Le signe égal est utilisé pour assigner une valeur à un paramètre.

) La parenthèse est utilisée pour terminer une étiquette.

() La paire de parenthèse est utilisée pour imbriquer une définition.

; Le point virgule est utilisé pour séparer les instructions sur une même ligne.

\$ Le signe dollar indique la suite d'une ligne sur la ligne suivante.

\$\$ Le double dollar est utilisé pour indiquer un commentaire.

3.3.1.2.2 Mots du langage APT

Chaque instruction dans un programme APT consiste en un ou deux mots majeurs. Le mot majeur détermine le type de l'instruction, tel que la définition de la géométrie ou les commandes de mouvement. Selon les instructions le mot majeur est généralement suivi par une barre oblique (/) et un ou plusieurs mots mineurs suivis par des paramètres. Un mot du langage APT est constitué de un à six caractères alphanumériques. Certains mots sont réservés au système (mots clefs).

Les mots clefs d'une instruction APT sont de différents types :

- mots de définition de la géométrie : POINT, PLANE, SPHERE, etc.
- mots utilisés pour les calculs : IF, SIN, COS, SQRT, etc.
- mots utilisés pour les instructions du postprocesseur : STOP, END, etc.
- mots utilisés comme modificateurs : XLARGE, LEFT, SMALL, etc.
- mots utilisés pour définir les déplacements : GO, GODLTA, GOTO, etc.
- mots utilisés pour spécifier les modes opératoires : NOPOST, CLPRINT, etc.

3.3.1.2.3 Nombres

Tous les nombres utilisés dans un programme APT sont des nombre réels. La forme exponentielle peut être utilisée. Un nombre peut être présenté de l'une des manières suivantes:

125	12.365
-2.025E-1	+269
-189.3244	.563236E2

3.3.1.2.4 Symboles

Les mots utilisés pour définir les entités géométriques sont appelés symboles. Les symboles peuvent aussi être utilisés comme paramètres de valeurs numériques. Ainsi, un symbole est utilisé pour définir une entité (géométrique ou scalaire) qui va être référencé ultérieurement dans le programme APT (c'est l'équivalent d'une variable dans un langage de programmation telle que Pascal ou Basic).

Les symboles sont constitués de un à six caractères alphanumériques, commençant obligatoirement par un caractère. L'exemple suivant montre comment un symbole peut être utilisé :

RAYON = 25.325

X1 = 123

Y1 = 96

CENTR1 = POINT / X1 , Y1

CERCL1 = CIRCLE / CENTER , CENTR1 , RADIUS , RAYON

TAB(1) = 10 \$\$ 10 EST AFFECTEE AU PREMIER ELEMENT DU TABLEAU TAB

TAB(I) = J \$\$ J EST AFFECTEE AU I ième

ELEMENT DU TABLEAU TAB

3.3.1.2.5 Etiquettes (Label)

Une instruction d'un programme APT peut avoir une étiquette de sorte que une autre instruction du programme peut la référencer. Les étiquettes sont constituées de un à six caractères numériques ou alphanumériques commençant par un caractère ou un nombre. Les exemples suivants montrent comment un symbole peut être utilisé :

Exemples :

IF(M) NEG , 111 , 41E

NEG) I = 5 \$\$ Si M < 0 Alors I = 5

•••

111) J = 9 \$\$ Si M = 0 Alors J = 9

41E) K = 0 \$\$ Si M > 0 Alors K = 0

•••

DEBUT) I = I + 1

•••

JUMPTO DEBUT \$\$ Saut inconditionnel

Pour les mots clefs du langage APT voir la annexe 4

3.3.2 Langage G-Codes – fraisage

La programmation actuelle des machines outils se fait par l'intermédiaire du langage G ou G-code dont les principes sont regroupés dans la norme Iso 6983 et annexes.

3.3.2.1 La norme Iso 6983

A l'origine, le code G est basé sur un principe de programmation qui remonte à la période des cartes perforées, au début des années 60. Il a tout d'abord été développé par l'EIA (Electronic Industries Alliances) et a été normalisé sous la référence RS274D ou ISO 6983 en février 1980. [37]

Cette programmation s'appuie sur des fonctions préparatoires de type G. Elle est complétée par des fonctions auxiliaires (de type M) et technologiques (F, S, etc...). Par l'intermédiaire de ce code, l'utilisateur communique à la machine un ensemble d'instructions explicites. Un programme en G-code est donc la traduction d'une suite d'actions et de déplacements élémentaires (ligne droite ou arc de cercle par exemple) qui permettent de générer des conditions d'usinage ainsi qu'une trajectoire plus ou moins approximée, ce qu'il en est aujourd'hui du respect de la norme ISO dans la programmation des MOCN :

Depuis l'établissement de la norme ISO 6983, et avec l'évolution rapide des technologies, de nombreuses extensions ont été ajoutées pour tenir compte des nouveautés et des nouvelles capacités des machines-outils. Ces extensions, bien que souvent utiles chez des constructeurs différents de Directeur de Commande Numérique, n'entrent pas dans la norme et compliquent la tâche des logiciels de FAO, qui doivent créer les lignes de ce langage pour un DCN particulier. À côté de l'ISO, de nouveaux codes sont apparus, différents selon le Directeur de Commande Numérique. Ils intègrent de plus en plus, en plus de ISO, des langages propres aux constructeurs de DCN (symbolique, C, etc.) ainsi que des interfaces de programmation conversationnelle destinées à simplifier la programmation (CN Mazak, Heidenhain, Selca, Siemens, etc.). [37]

3.3.2 .2 G-code

Fonctions préparatoires (G), fonctions d'appel de mode d'interpolation (G 0), cycles machine :

Coordonnées de points (X, Y, Z, I, J, K)

Vitesses, avances... (S, F)

Fonctions auxiliaires (M) qui permettent d'enclencher la lubrification, de changer d'outil, ou de déclencher des accessoires.

Tableau 3.1. Liste de more de Lattre

X	Position absolue
Y	Position absolue
Z	Position absolue
A	Position (rotation autour de l'axe X)
B	Position (rotation autour de l'axe Y)
C	Position (rotation autour de l'axe Z)
U	Position Relative OU axe secondaire
V	Position Relative OU axe secondaire
w	Position Relative OU axe secondaire
D	Associations d'un correcteur de jauge outil
F	vitesse de déplacement
S	vitesse de rotation
N	Numéro de ligne
V	Permet de contrôler une vitesse de rotation dans une machine avec diverses configurations
R	Rayon d'arc ou option passée à un sous programme
P	Temps de pause ou option passée à un sous programme ou appel de sous programme (Précédé de M98 par ex)
T	Sélection d'outil
I	Axe X des données d'un arc
J	Axe Y des données d'un arc
K	Axe Z des données d'un arc
D	Diamètre de coupe/décalage pour l'épaisseur d'outil
H	Décalage pour la hauteur de l'outil

Tableau 3.2. Liste de G- codes

G00	Positionnement linéaire de Rapide
G01	Interpolation linéaire
G02	Interpolation circulaire/hélicoïdale
G03	Interpolation circulaire/hélicoïdale de CCW
G04	Angle de saturation
G05	Usinage à grande vitesse de cycle
G06	Usinage de NURBS
G07	Désignation imaginaire d'axe
G08	Mode acculant rapide
G09	Exiger l'arrêt
G10	Arrangement de valeur excentrée
G11	Annulation d'arrangement de valeur excentrée
G15	Annulation de commande de coordonnées polaires
G16	Commande de coordonnées polaires
G17	Choix plat DE X/Y
G18	Choix plat de ZX
G19	Choix plat de YZ
G20	Entrée en pouce
G21	Entrée en millimètre
G22	Stocké charger la limite dessus
G23	Stocké charger la limite au loin
Le G-24	Espace libre Pocket circulaire
G25	Finition circulaire à l'intérieur
G26	Finition circulaire dehors
G27	Contrôle de retour de point de référence
G28	Revenir au point de référence
G29	Retourner du point de référence
G30	Revenir au 2ème, 3ème et 4ème point de référence
G31	Sauter la fonction
G32	Z au changement d'outil
G33	Découpage de filet
G34	Espace libre Pocket rectangulaire
G35	Finition rectangulaire à l'intérieur

G36	Finition rectangulaire dehors
G39	Interpolation circulaire excentrée de coin
G40	Annulation de compensation de coupeur
G41	Compensation de coupeur laissée
G42	Droite de compensation de coupeur
G43	Compensation + direction de longueur d'outil
G44	Compensation de longueur d'outil - direction
G45	Augmentation excentrée d'outil
G46	Diminution excentrée d'outil
G47	Augmentation excentrée d'outil double
G48	Diminution excentrée d'outil double
G49	Annulation de compensation de longueur d'outil
G50	Mesurage au loin
G51	Graduation dessus
G52	Arrangement local de système du même rang
G53	Choix de système de coordonnées de machine
G54	Choix du système du même rang 1 de travail
G55	Choix du système du même rang 2 de travail
G56	Choix du système du même rang 3 de travail
G57	Choix du système du même rang 4 de travail
G58	Choix du système du même rang 5 de travail
G59	Choix du système du même rang 6 de travail
G60	Positionnement simple de direction
G61	Exiger le mode d'arrêt
G62	Dépassement faisant le coin automatique
G63	Mode de filetage
G64	Mode de découpage
G65	Macro-instruction simple
G66	Macro appel modal fait sur commande
G67	Macro annulation modale faite sur commande d'appel
G68	Rotation de système du même rang
G69	Annulation de rotation de système du même rang
G70	Entrée en pouce
G71	Entrée en millimètre
G73	Cycle Drilling de picotin

G74	Contre- cycle de filetage
G76	Sondage fin
G80	Annulation en boîte de cycle
G81	Cycle Drilling, sondage de tache
G82	Cycle Drilling, contre- sondage
G83	Cycle Drilling de picotin
G84	Cycle de filetage
G85	Cycle ennuyeux - alimentation dehors
G86	Cycle ennuyeux - arrêter, Rapid dehors
G87	Soutenir le cycle ennuyeux
G88	Cycle ennuyeux
G89	Cycle ennuyeux - l'angle de saturation, alimentent dehors
G90	Programmation absolue
G91	Programmation par accroissement
G92	Programmation d'au zéro absolu
G94	Alimentation par minute
G95	Alimentation par révolution
G96	Contrôle de vitesse extérieur constant
G97	Annulation extérieure constante de contrôle de vitesse
G98	Revenir au point initial dans le cycle en boîte
G99	Revenir au point de référence dans le cycle en boîte

3.4 APPLICATION A L'AIDE DU LOGICIEL CATIA

3.4 .1 PRESENTATION DE CATIA V5

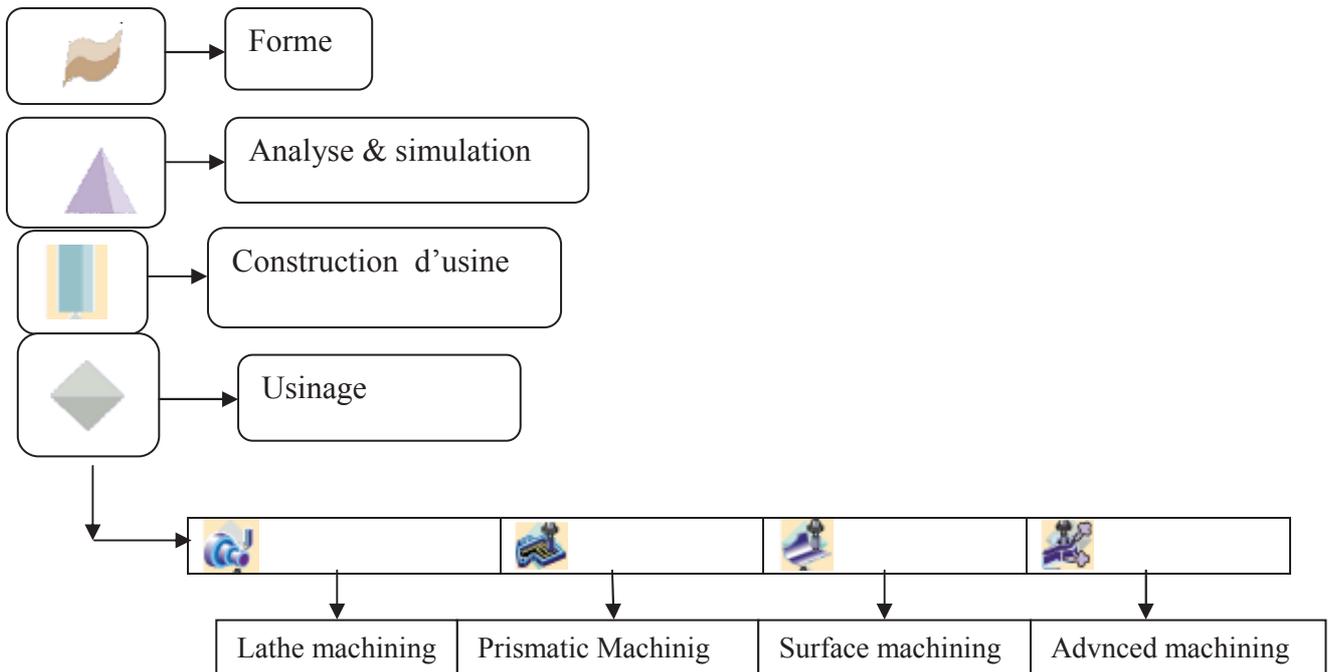
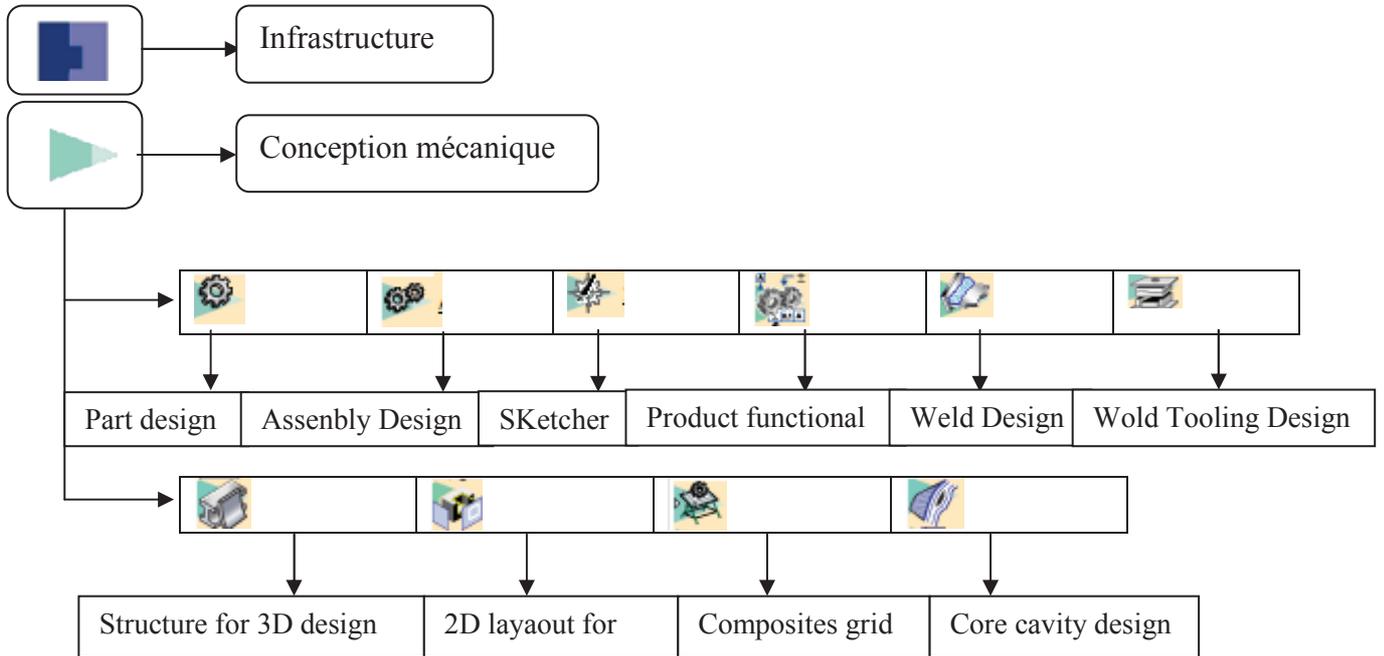
3.4.1.1 Définition

CATIA est un puissant logiciel de CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur), conçu par Dassault Systèmes (France). Il est très utilisé en aéronautique et en automobile. Le logiciel fournit une large gamme de solutions intégrées pour couvrir tous les aspects de design et de fabrication. Parmi les nombreuses fonctionnalités de base, on peut citer :

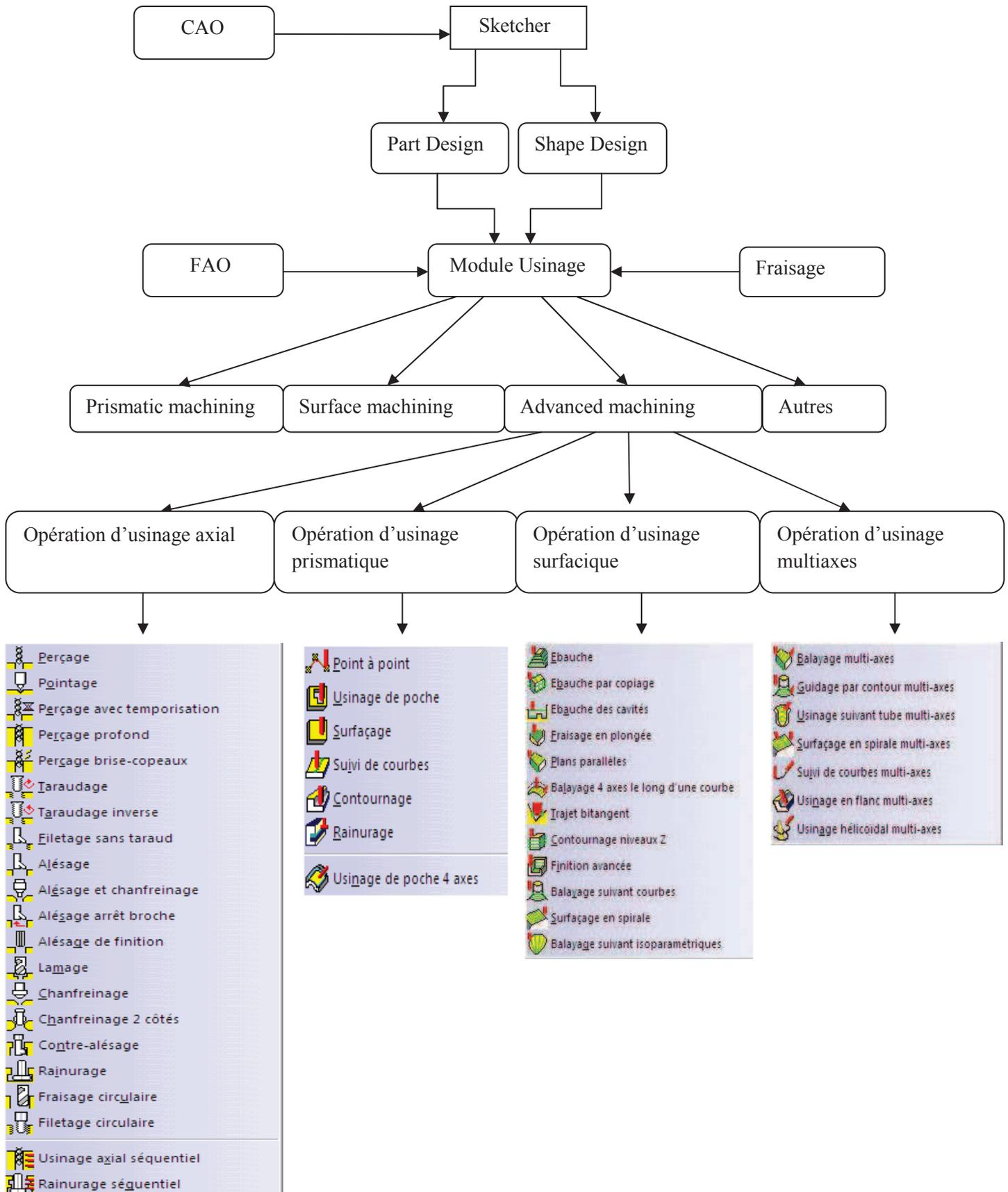
- Conception de pièces,
- Assemblages,
- Rendre réaliste un objet,
- Dessin interactif et génératif.

Il permet ainsi de concevoir des pièces et des assemblages de pièces directement en 3 dimensions sans dessiner de plan. Lorsqu'on parle de la version 5, on utilise souvent la notion de maquette numérique. Ce terme désigne l'ensemble des données informatiques qui permet de manipuler un objet aussi bien ou mieux qu'on ne pourrait le faire avec une maquette réelle. On peut tester sa résistance à diverses contraintes, vérifier qu'un sous-ensemble est montable ou démontable, s'assurer que la mobilité des composants les uns par rapport aux autres ne génère pas de collisions,...etc.

3.4.1.2 Architecteur du logiciel CATIA V5



3.4.1.3 Architecteur d'usinage avec CATIA V5



3.4 .2 Etude l'usinage de la forme complexée par CATIA V5

La création d'une pièce 3D apatrié d'une courbe complexe (b-spline)

3.4 .2.1 Etape de création

Sélectionner : « Démarrer », « Conception mécanique », « part Design »

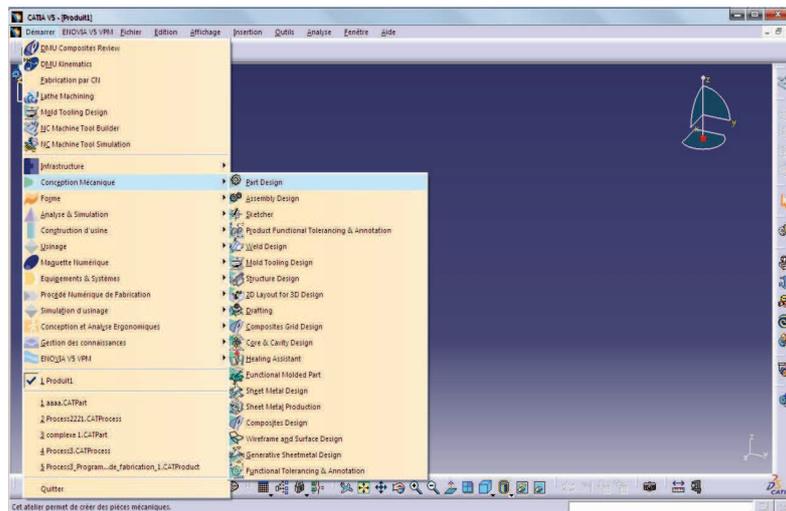


Figure 3.14 : fenêtre de part Design

Sélectionner, dans l'arbre, le plan ZX et démarrer l'éditeur d'esquisse



A l'aide des outils « droite » et « courbe », créer le contour ferme suivant. La courbe étant en 5 points de contrôle choisis arbitrairement d'outil splin voire figure 6.2

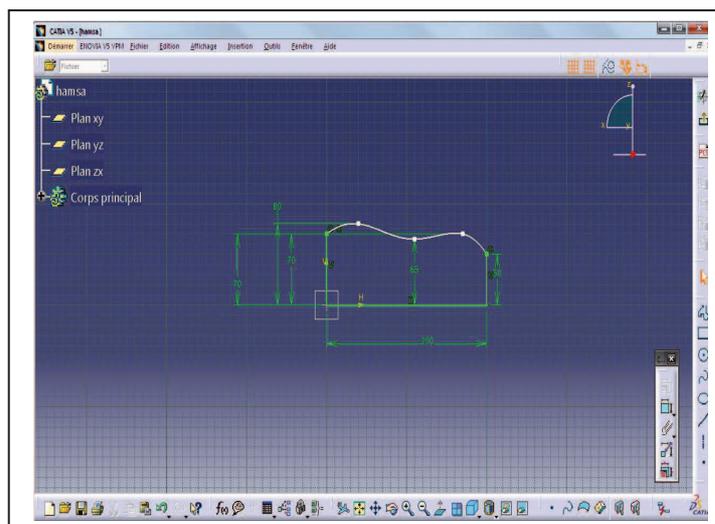


Figure 3.15 pièce 2D

Après création du contour on choisit le mode d'obtenir de la pièce 3D « notre cas Extrude »

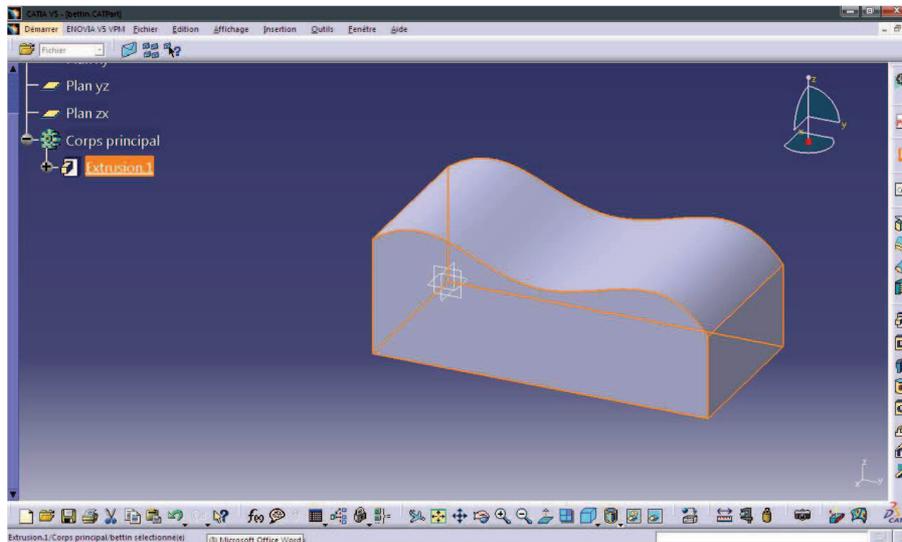


Figure 3.16 pièce 3D

3.4 .2.2 Etape de fabrication

Sélectionner : « Démarrer », « Usinage », « Advanced Machining ».

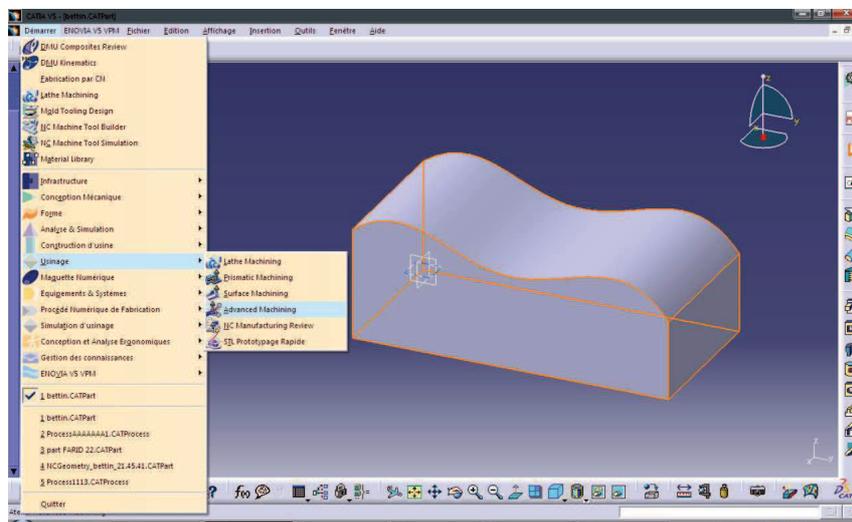


Figure 3 .17 fenêtre d'Usinage

La pièce créée précédemment est prise par défaut.

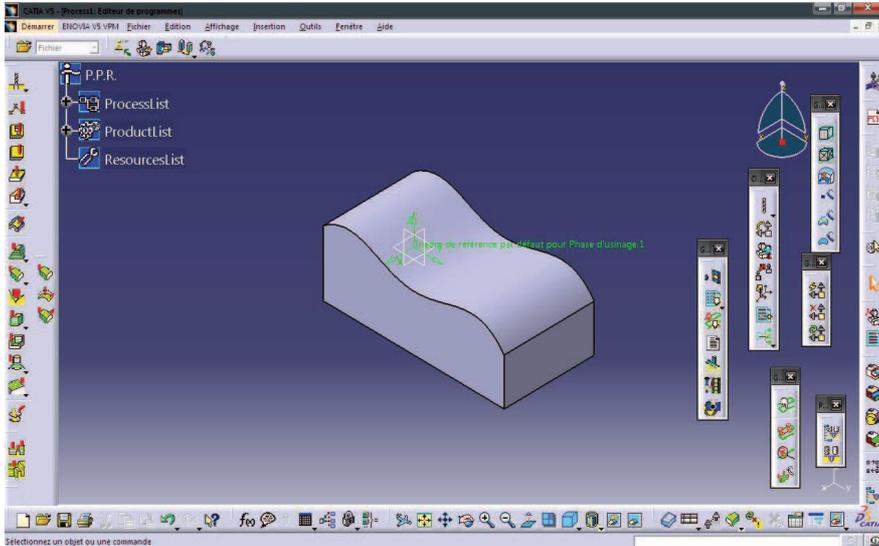


Figure 1.18 fenêtre « Advanced Machining »

La surface supérieure est quelconque, afin de l'usiner on choisit le fraisage de finition de la pièce avec une fraise boule en effectuant des passes balayage multi-axes entre elles. L'usinage s'effectuera par plans balayage multi-axes à la surface finie .

Après la sélection de l'opération d'usinage, il faut sélectionner une activité-mère, comme indiqué dans la barre d'état, en bas à gauche de la fenêtre. Sélectionner, dans l'arbre, le programme de fabrication 1.

Une nouvelle fenêtre s'ouvre alors, permettant de définir tous les paramètres nécessaires à la génération d'un programme usinage.

Il y a 5 onglets, correspondant chacun à une famille de paramètres à définir.

- 1- définir la stratégie d'usinage Figure 3.19a
- 2- définir la géométrie à usiner Figure 3.19b
- 3- définir l'outil à utiliser Figure 3.19c
- 4- éditer les paramètres de la coupe Figure 3.19 d
- 5- définir des macros d'approche de pièce Figure 3.19 f

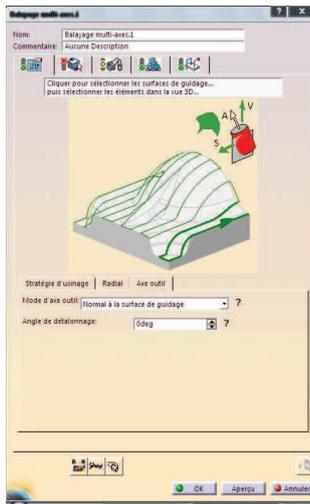


Figure 3.19a : stratégie d'usinage



Figure 3.19b : géométrie à usiner

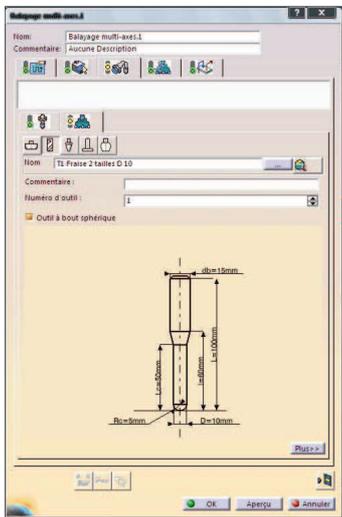


Figure 3.19c l'outil à utiliser



Figure 3.19d paramètres de la coupe

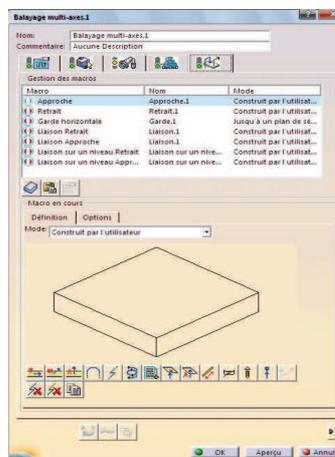


Figure 3.19f macro d'approche de pièce

Nous allons passer en revue les paramètres principaux de chaque onglet, permettant la génération de la phase d'usinage et le programme.

-Simulation d'usinage à 5 axes

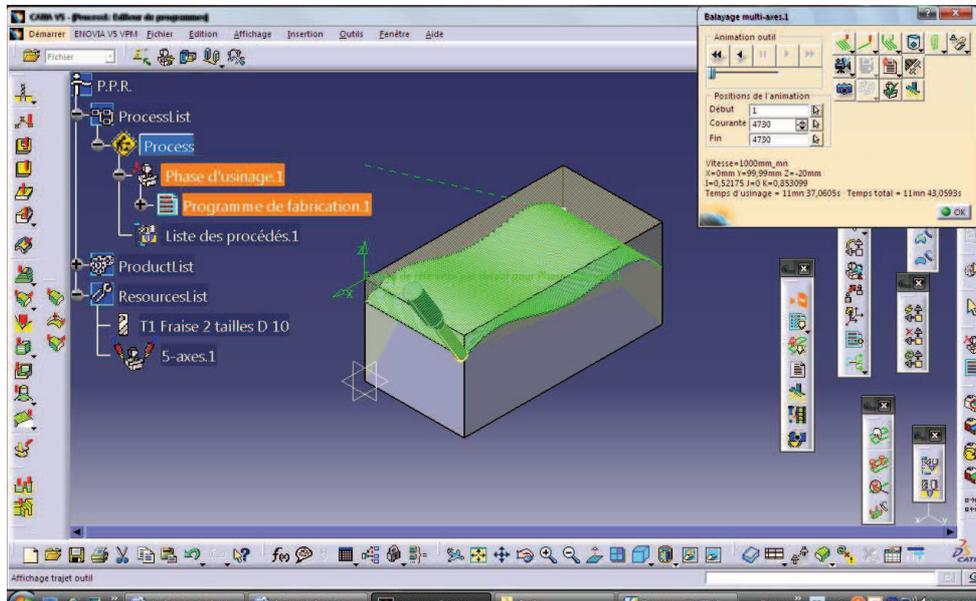


Figure 3.20 : simulation d'une pièce 3D avec stratégie zigzag

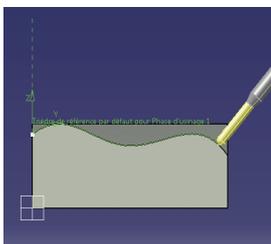


Figure 3.21a l'outil au début

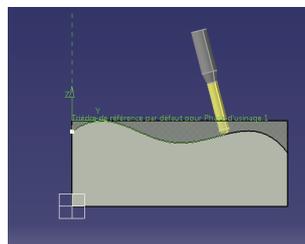


Figure 3.21b l'outil intermédiaire

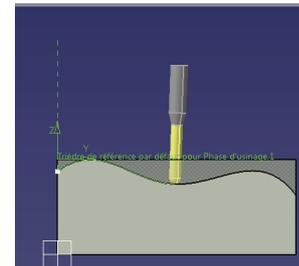


Figure 3.21c l'outil intermédiaire

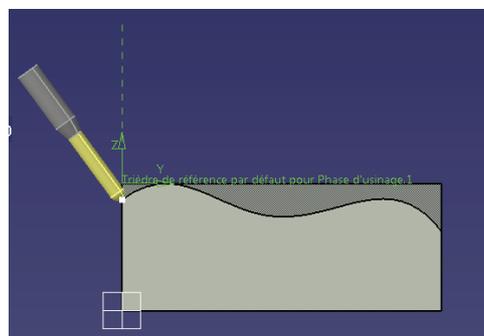


Figure 3.21e l'outil à position finale

- simulation l'usinage sur module brut

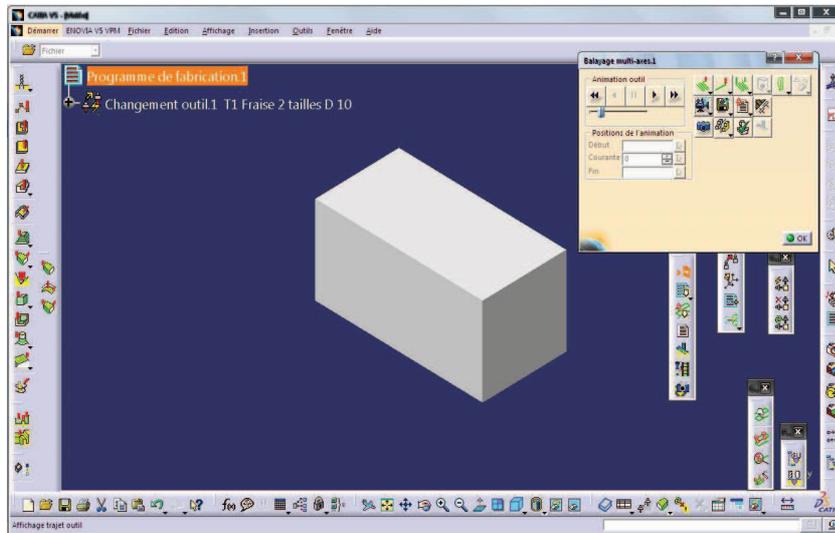


Figure 3.22 la pièce ce forme brut

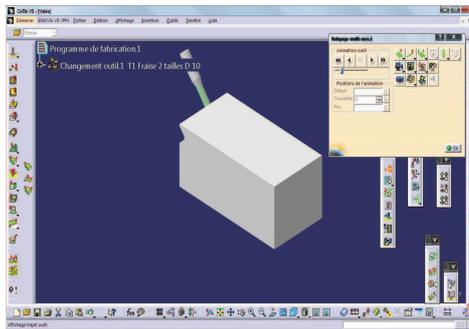


Figure 3.23a début l'usinage

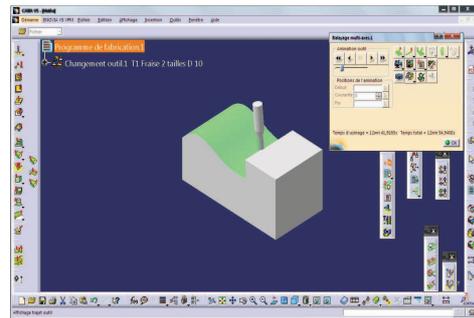


Figure 3.23b en cours l'usinage

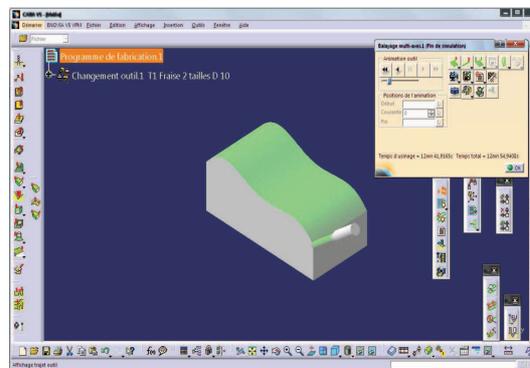


Figure 3.23c fin l'usinage

Divers types de format de sortie de programme NC on été obtenus:

Format APT (Annexe -1-)

Format g-code (Annexe -2-)

Format NURBS (Annexe -3-)

CONCLUSION

Dans cette étude nous avons défini les différentes étapes de la mise en œuvre du processus d'usinage des surfaces complexes en usinage à 5axes.

Nous avons effectué une modélisation géométrique pour trouver la relation entre les paramètres de configuration (coordonnées générations) et les paramètres définissant les coordonnées opérationnels de la machine.

Ensuite nous avons fait une modélisation cinématique pour déterminer les vitesses articulaires de la machine.

Les deux modélisations ont été appliquées pour la machine Matsuura MAM 72-25V CNC à 5 axes.

Finalement nous avons utilisé le logiciel CATIA V5 R20 en maintenant la démarche à suivre pour l'usinage 5axes des surfaces complexes est la génération des programmes d'usinage en langage APT et G-code.

Annexes

Annexe 1

Programme d'usinage par Format NURBS

```

$$ -----
$$   Généré le samedi 19 novembre 2011 22:01 VALR
$$   CATIA APT VERSION 1.0
$$ -----
$$ Programme de fabrication.1
$$ Phase d'usinage.1
$$*CATIA0
$$ Programme de fabrication.1
$$ 1.00000 0.00000 0.00000 100.00000
$$ 0.00000 1.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 0.00000 1.00000 80.00000
PARTNO Phase d'usinage.1
$$ OPERATION NAME : Changement outil.1
$$ Début de génération de: Changement outil.1
MULTAX
$$ TOOLCHANGEBEGINNING
FEDRAT/60000.0000,MMPM
GOTO / 0.00000, 0.00000, 100.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
CUTTER/ 10.000000, 5.000000, 0.000000, 5.000000, 0.000000,$
      0.000000, 50.000000
TOOLNO/1,MILL, 10.000000, 5.000000,, 100.000000,$
      60.000000,, 50.000000,4, 1000.000000,$
MMPM, 70.000000,RPM,CLW,ON,$
AUTO, 0.000000,NOTE
TPRINT/T1 Fraise 2 tailles D 10,,T1 Fraise 2 tailles D 10
LOADTL/1,1,1
$$ TOOLCHANGEEND
$$ Fin de génération de: Changement outil.1
$$ OPERATION NAME : Balayage multi-axes.1
$$ Début de génération de: Balayage multi-axes.1
FEDRAT/ 1000.0000,MMPM
SPINDL/ 70.0000,RPM,CLW
BEGIN NURBS_SIEMENS (D=3,F=1000.000,AXIS=VAR,LENGTH= 50.000)
N0, XT= -99.99057, YT= 0.01001, ZT= -9.99269, XH= -99.99057, YH=$
-29.48976, ZH= 30.37764,DK= 0.00000,W= 1.00000;
N1, XT= -66.66038, YT= 0.01001, ZT= -9.99269, XH= -66.66038, YH=$
-29.48976, ZH= 30.37764,DK= 0.00000,W= 1.00000;
N2, XT= -33.33019, YT= 0.01001, ZT= -9.99269, XH= -33.33019, YH=$
-29.48976, ZH= 30.37764,DK= 99.99057,W= 1.00000;
N3, XT= 0.00000, YT= 0.01001, ZT= -9.99269, XH= 0.00000, YH=$
-29.48976, ZH= 30.37764,DK= 0.00000,W= 1.00000;
END NURBS
BEGIN NURBS_SIEMENS (D=3,F=1000.000,AXIS=VAR,LENGTH= 50.000)
N0, XT= 0.00000, YT= 0.01001, ZT= -9.99269, XH= 0.00000, YH=$
-29.48976, ZH= 30.37764,DK= 0.00000,W= 1.00000;
N1, XT= -0.00314, YT= 0.46541, ZT= -9.66807, XH= -0.00314, YH=$
-28.71171, ZH= 30.93220,DK= 0.00000,W= 1.00000;
N2, XT= -0.00629, YT= 0.92080, ZT= -9.34346, XH= -0.00629, YH=$
-27.93366, ZH= 31.48675,DK= 2.86638,W= 1.00000;
N3, XT= -0.00943, YT= 1.37620, ZT= -9.01884, XH= -0.00943, YH=$

```

-27.15561, ZH= 32.04131, DK= 0.00000, W= 1.00000;
END NURBS

.....
.....
.....
END NURBS
BEGIN NURBS_SIEMENS (D=3,F=1000.000,AXIS=VAR,LENGTH= 50.000)
N0, XT= -0.00943, YT= 199.38028, ZT= -29.18794, XH= -0.00943, YH=\$
238.93726, ZH= 1.39384, DK= 0.00000, W= 1.00000;
N1, XT= -33.33892, YT= 199.38028, ZT= -29.18794, XH= -33.33892, YH=\$
238.93726, ZH= 1.39384, DK= 0.00000, W= 1.00000;
N2, XT= -66.66840, YT= 199.38028, ZT= -29.18794, XH= -66.66840, YH=\$
238.93726, ZH= 1.39384, DK= 99.98844, W= 1.00000;
N3, XT= -99.99788, YT= 199.38028, ZT= -29.18794, XH= -99.99788, YH=\$
238.93726, ZH= 1.39384, DK= 0.00000, W= 1.00000;

END NURBS
BEGIN NURBS_SIEMENS (D=3,F=1000.000,AXIS=VAR,LENGTH= 50.000)
N0, XT= -99.99788, YT= 199.38028, ZT= -29.18794, XH= -99.99788, YH=\$
238.93726, ZH= 1.39384, DK= 0.00000, W= 1.00000;
N1, XT= -99.99541, YT= 199.58353, ZT= -29.45422, XH= -99.99541, YH=\$
239.26453, ZH= 0.96510, DK= 0.00000, W= 1.00000;
N2, XT= -99.99294, YT= 199.78678, ZT= -29.72050, XH= -99.99294, YH=\$
239.59180, ZH= 0.53635, DK= 1.61815, W= 1.00000;
N3, XT= -99.99048, YT= 199.99003, ZT= -29.98677, XH= -99.99048, YH=\$
239.91907, ZH= 0.10761, DK= 0.00000, W= 1.00000;

END NURBS
BEGIN NURBS_SIEMENS (D=3,F=1000.000,AXIS=VAR,LENGTH= 50.000)
N0, XT= -99.99048, YT= 199.99003, ZT= -29.98677, XH= -99.99048, YH=\$
239.91907, ZH= 0.10761, DK= 0.00000, W= 1.00000;
N1, XT= -66.66032, YT= 199.99003, ZT= -29.98677, XH= -66.66032, YH=\$
239.91907, ZH= 0.10761, DK= 0.00000, W= 1.00000;
N2, XT= -33.33016, YT= 199.99003, ZT= -29.98677, XH= -33.33016, YH=\$
239.91907, ZH= 0.10761, DK= 99.99048, W= 1.00000;
N3, XT= 0.00000, YT= 199.99003, ZT= -29.98677, XH= 0.00000, YH=\$
239.91907, ZH= 0.10761, DK= 0.00000, W= 1.00000;

END NURBS
\$\$ Fin de génération de: Balayage multi-axes.1

FINI

Annexe 2

Programmer NC format G-code

```
=====
;==== cPost Standard PP for SINUMERIK 840 D   ====
;=====
N10 G0 G90 G40
N20 ;===== TOOL CHANGE =====
N30 ; DESC : T2 Fraise 2 tailles D 10
N40 ;=====
N50 T2 M06
N60 D2
N70 G0 G90 G40 G17
N80 G94 F1000 S70 M3
N90 G64 SOFT
N100 G1 X-199.994 Y0.01 Z-39.992 F1000 G94
N110 X-198.646 Z-38.286
N120 X-197.297 Z-36.675
N130 X-195.949 Z-35.155
N140 X-194.601 Z-33.724
N150 X-193.253 Z-32.379
N160 X-191.904 Z-31.116
N170 X-190.556 Z-29.932
N180 X-189.208 Z-28.826
N190 X-187.86 Z-27.793
N200 X-186.512 Z-26.833
N210 X-185.163 Z-25.942
N220 X-183.815 Z-25.118
N230 X-182.467 Z-24.359
N240 X-181.119 Z-23.661
N250 X-179.771 Z-23.024
N260 X-178.422 Z-22.445
N270 X-177.074 Z-21.921
N280 X-175.726 Z-21.451
N290 X-174.153 Z-20.967
N300 X-172.58 Z-20.55
N310 X-171.007 Z-20.195
N320 X-169.434 Z-19.901
N330 X-167.861 Z-19.663
N340 X-166.288 Z-19.478
N350 X-164.491 Z-19.327
N360 X-162.693 Z-19.237
N370 X-160.671 Z-19.203
N380 X-158.648 Z-19.232
N390 X-156.401 Z-19.332
N400 X-154.154 Z-19.494
N410 X-151.683 Z-19.735
N420 X-148.762 Z-20.09
```

N430 X-145.166 Z-20.608
N440 X-140.672 Z-21.336
N450 X-131.235 Z-22.934
N460 X-127.19 Z-23.56
N470 X-123.595 Z-24.048
N480 X-120.449 Z-24.408
N490 X-117.303 Z-24.691
N500 X-114.607 Z-24.865
N510 X-111.91 Z-24.97
N520 X-109.214 Z-25.001
N530 X-107.416 Z-24.98
N540 X-104.72 Z-24.882
N550 X-102.023 Z-24.703
N560 X-99.327 Z-24.444
N570 X-96.63 Z-24.106
N580 X-93.934 Z-23.69

.....
.....
.....
N47190 X-37.976 Z-9.841
N47200 X-35.954 Z-9.745
N47210 X-33.932 Z-9.714
N47220 X-31.909 Z-9.751
N47230 X-30.111 Z-9.842
N47240 X-28.314 Z-9.988
N47250 X-26.516 Z-10.191
N47260 X-24.718 Z-10.451
N47270 X-22.921 Z-10.769
N47280 X-21.123 Z-11.146
N47290 X-19.325 Z-11.581
N47300 X-17.528 Z-12.076
N47310 X-15.73 Z-12.63
N47320 X-13.932 Z-13.243
N47330 X-12.134 Z-13.915
N47340 X-10.112 Z-14.743
N47350 X-8.09 Z-15.645
N47360 X-6.067 Z-16.622
N47370 X-4.045 Z-17.674
N47380 X-2.023 Z-18.8
N47390 X0 Z-20
N47400 ;===== TOOL CHANGE =====
N47410 ; DESC : T1 Fraise 2 tailles D 10
N47420 ;=====

N47430 T1 M06
N47440 D1
N47450 G0 G90 G40 G17
N47460 G94 F1000 S70 M3

N47470 G64 SOFT
 N47480 M5 M9
 N47490 M3

Annexe 3

Programme NC format APT

```

$$ -----
$$   Généré le samedi 3 décembre 2011 21:32 VALR
$$   CATIA APT VERSION 1.0
$$ -----
$$*CATIA0
$$ Programme de fabrication.1
$$ 1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 1.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 0.00000 1.00000 90.00000
PARTNO Phase d'usinage.1
MULTAX
FROM / 0.00000, 0.00000, 200.00000, 0.000000, 0.000000, 1.000000
$$ TOOLCHANGEBEGINNING
CUTTER/ 10.000000, 5.000000, 0.000000, 5.000000, 0.000000,$
      0.000000, 50.000000
TOOLNO/2,MILL, 10.000000, 5.000000,, 100.000000,$
      60.000000,, 50.000000,4, 1000.000000,$
MMPM, 70.000000,RPM,CLW,ON,$
AUTO, 0.000000,NOTE
TPRINT/T2 Fraise 2 tailles D 10,,T2 Fraise 2 tailles D 10
LOADTL/2,2,2
$$ TOOLCHANGEEND
LOADTL/2,1
FEDRAT/ 1000.0000,MMPM
SPINDL/ 70.0000,RPM,CLW
GOTO / -199.99378, 0.01000, -39.99190,-0.792960, 0.000000, 0.609273
GOTO / -198.64553, 0.01000, -38.28584,-0.775857, 0.000000, 0.630909
GOTO / -197.29732, 0.01000, -36.67479,-0.757568, 0.000000, 0.652756
GOTO / -195.94910, 0.01000, -35.15535,-0.738050, 0.000000, 0.674746
GOTO / -194.60088, 0.01000, -33.72434,-0.717269, 0.000000, 0.696797
GOTO / -193.25267, 0.01000, -32.37871,-0.695201, 0.000000, 0.718816
GOTO / -191.90445, 0.01000, -31.11554,-0.671836, 0.000000, 0.740700
GOTO / -190.55623, 0.01000, -29.93205,-0.647183, 0.000000, 0.762335
GOTO / -189.20802, 0.01000, -28.82553,-0.621266, 0.000000, 0.783600
GOTO / -187.85980, 0.01000, -27.79336,-0.594130, 0.000000, 0.804369
GOTO / -186.51158, 0.01000, -26.83303,-0.565844, 0.000000, 0.824513
GOTO / -185.16337, 0.01000, -25.94205,-0.536495, 0.000000, 0.843904
GOTO / -183.81515, 0.01000, -25.11803,-0.506194, 0.000000, 0.862419
GOTO / -182.46694, 0.01000, -24.35862,-0.475075, 0.000000, 0.879945
GOTO / -181.11872, 0.01000, -23.66149,-0.443287, 0.000000, 0.896380

```

GOTO / -179.77050, 0.01000, -23.02440,-0.410998, 0.000000, 0.911636
 GOTO / -178.42229, 0.01000, -22.44510,-0.378388, 0.000000, 0.925647
 GOTO / -177.07407, 0.01000, -21.92142,-0.345643, 0.000000, 0.938366
 GOTO / -175.72585, 0.01000, -21.45117,-0.312957, 0.000000, 0.949767

.....

 GOTO / -46.51544, 99.99000, -10.90806,-0.179071, 0.000000, 0.983836
 GOTO / -44.26834, 99.99000, -10.53058,-0.151800, 0.000000, 0.988411
 GOTO / -42.02121, 99.99000, -10.21943,-0.122093, 0.000000, 0.992519
 GOTO / -39.99879, 99.99000, -9.99989,-0.093441, 0.000000, 0.995625
 GOTO / -37.97635, 99.99000, -9.84076,-0.063168, 0.000000, 0.998003
 GOTO / -35.95398, 99.99000, -9.74470,-0.031492, 0.000000, 0.999504
 GOTO / -33.93152, 99.99000, -9.71404, 0.001356, 0.000000, 0.999999
 GOTO / -31.90912, 99.99000, -9.75081, 0.035124, 0.000000, 0.999383
 GOTO / -30.11142, 99.99000, -9.84150, 0.065707, 0.000000, 0.997839
 GOTO / -28.31372, 99.99000, -9.98788, 0.096634, 0.000000, 0.995320
 GOTO / -26.51603, 99.99000, -10.19084, 0.127725, 0.000000, 0.991810
 GOTO / -24.71833, 99.99000, -10.45112, 0.158804, 0.000000, 0.987310
 GOTO / -22.92063, 99.99000, -10.76933, 0.189706, 0.000000, 0.981841
 GOTO / -21.12294, 99.99000, -11.14595, 0.220276, 0.000000, 0.975438
 GOTO / -19.32524, 99.99000, -11.58136, 0.250374, 0.000000, 0.968149
 GOTO / -17.52754, 99.99000, -12.07583, 0.279874, 0.000000, 0.960037
 GOTO / -15.72985, 99.99000, -12.62955, 0.308670, 0.000000, 0.951169
 GOTO / -13.93215, 99.99000, -13.24262, 0.336672, 0.000000, 0.941622
 GOTO / -12.13445, 99.99000, -13.91506, 0.363808, 0.000000, 0.931474
 GOTO / -10.11204, 99.99000, -14.74250, 0.393233, 0.000000, 0.919439
 GOTO / -8.08963, 99.99000, -15.64493, 0.421439, 0.000000, 0.906857
 GOTO / -6.06723, 99.99000, -16.62215, 0.448395, 0.000000, 0.893836
 GOTO / -4.04482, 99.99000, -17.67393, 0.474091, 0.000000, 0.880476
 GOTO / -2.02250, 99.99000, -18.79993, 0.498535, 0.000000, 0.866870
 GOTO / 0.00000, 99.99000, -20.00000, 0.521750, 0.000000, 0.853099

\$\$ TOOLCHANGEBEGINNING

CUTTER/ 10.000000, 2.000000, 3.000000, 2.000000, 0.000000,\$
 0.000000, 50.000000

TOOLNO/1,MILL, 10.000000, 2.000000,, 100.000000,\$
 60.000000,, 50.000000,4, 1000.000000,\$

MMPM, 70.000000,RPM,CLW,ON,\$

AUTO, 0.000000,NOTE

TPRINT/T1 Fraise 2 tailles D 10,,T1 Fraise 2 tailles D 10

LOADTL/1,1,1

\$\$ TOOLCHANGEEND

FINI

Annexe 4

Mots clefs du langage APT

Instruction de définition de la géométrie

Mot	Description
POINT	Définition de point
LINE	Définition de ligne
CIRCLE	Définition de cercle
ELLIPS	Définition d'ellipse
VECTOR	Définition de vecteur
SPHERE	Définition de sphère
PLANE	Définition de plan
ATANGL	Modificateur : à un angle
INTERC	Modificateur : intercepte
CENTER	Modificateur : Centre
XAXIS	Modificateur : Axe X
YAXIS	Modificateur : Axe Y
RADIUS	Modificateur : Rayon
TANTO	Modificateur : Tangent à
THRU	Modificateur : A travers
INTOF	Modificateur : Intersection avec
PARLEL PERPTO	Modificateur : Pour la définition d'une ligne parallèle ou perpendiculaire à une autre ligne
XSMALL YSMALL ZSMALL XLARGE YLARGE ZLARGE	Modificateur : X petit Y petit Z petit X grand Y grand Z grand
RIGHT /LEFT	Modificateur : (à droite, à gauche)
IN /OUT	Modificateur : (à l'intérieur, à l'extérieur)
LARGE/SMALL	Modificateur : (grand, petit)
POSX POSY POSZ NEGX NEGY NEGZ	Modificateur : Positif sur X Positif sur Y Positif sur Z Négatif sur X Négatif sur Y Négatif sur Z
XYPLAN YZPLAN ZXPLAN	Modificateur : Plan XY Plan YZ Plan ZX

Instructions de définition des déplacements

Mot	Descriptio
GOTO	Déplacement en mode point à point en absolu
GODLTA	Déplacement en mode point à point en relatif
GO	Déplacement d'approche
GORG GOLFT GOFWD GOBACK GOUN GODOWN	Déplacement en mode contournage selon la direction par rapport au mouvement précédent : (à droite , à gauche, vers l'avant , vers l'arrière, vers le haut ou vers le bas
TLLFT TLRGT TLON	Spécifie la position de l'outil par rapport au profil à réaliser : (à droite du profil, à gauche du profil ou sur le profil
RAPID	Le mouvement suivant sera réalisé à vitesse rapide
TO ON PAST TANTO	Modificateur de position de l'outil par rapport à la surface d'arrêt :(jusqu'à la surface, sur la surface, après la surface ou tangent à la surface)
TLONPS TLOFPS	Modificateur de position de l'outil par rapport à la surface pièce : (sur la surface ou tangent à la surface)

Instructions diverses (Calcul, Boucle, Macro)

Mot	Description
MACRO	Définition de macro
TERMAC	Fin de macro
CALL	Appel de macro
IF	Test «SI»
JUMPTO	Saut
SINF	Sinus
COSF	Cosinus
TANF	Tangente
ATANF	Arc tangente
ATAN2F	Arc tangente
ABSF	Valeur absolue
SQRTF	Racine carrée
LOGF	Logarithme népérien
LOG10F	Logarithme base 10
EXPF	Exponentiel

Instructions de définition de l'outil

Mot	Description
CUTTER	Spécifie les dimensions de l'outil
INTOL OUTTOL	Tolérance outil / surface (tolérance à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface)
LENGTH	Correcteur de longueur de l'outil
LOADTL TURRET	Changement d'outil en fraisage ou en tournage (tourelle)
OSETNO	Numéro de correcteur de l'outil

Instructions du postprocesseur

Mot	Description
PARTNO	Spécifie la référence de la pièce à fabriquer
UNITS	Spécifie l'unité utilisé
MACHIN	Spécifie la référence du postprocesseur
NOPOST	Traitement du postprocesseur n'est pas demandé
END	Fin du programme CN
FINI	Fin du programme source APT
SPINDL	Vitesse de broche en tr/min ou en m/min selon l'unité
FEDRAT	Vitesse d'avance en mm/tr ou en mm/min selon l'unité
COOLNT	Activer ou désactiver l'arrosage
MMPR	Spécifie que l'unité de la vitesse d'avance est en mm/tr
MMPM	Spécifie que l'unité de la vitesse d'avance est en mm/min
IPM	Spécifie que l'unité de la vitesse d'avance est en inch/min
IPR	Spécifie que l'unité de la vitesse d'avance est en inch/tr
RPM	Spécifie que l'unité de la vitesse de la broche est en tr/min
SMM ou SFM	Spécifie que l'unité de la vitesse de la broche est en m/min
CLW CCLW	Spécifie le sens de la rotation de la broche (sens horaire ou trigonométrique)
CYCLE	Définition de cycle d'usinage
DRILL	Cycle de perçage centrage
DEEP	Cycle de perçage profond
BORE	Cycle d'alésage
TAP	Cycle de taraudage
REAM	Cycle d'alésage
DEPTH	Profondeur
DELAY	Temporisation en seconde
OPSTOP	Arrêt optionnel
REMARK	Commentaire
PPRINT	
INSERT	Insert une commande du programme CN

Recherche Bibliographique

- [1] CNC Programming Handbook , second Edition , Peter smid (2003)
- [2] Advanced Numeric a Methods to Optimize Cutting Operations of Five-Axis Milling Machines (2007)
- [3] Lavernhe Sylvain (2006) kinematical performances in 5-axis machining :
- [4] M Sharif addin., (2009) “Prediction of Machining Accuracy of 5-Axis Machine Tools with Kinematic Errors
- [5] Lavernhe Sylvain « Model for performance prediction in multi-axis machining »
- [6] Dong-Been Tae (2007) « a generic inverse kinematics model using the orthogonal characteristics of five-axis machine joints »
- [7]Mud-Armeen Munlin (2004) « Virtual Five-Axis Milling Machine: Tool Path Generation and Simulation »
- [8] Lavernhe Sylvain, Optimisation en fraisage 5 axes grande vitesse
- [9] A. C. Munar, “computer aided geometric modeling and 5-axis milling of a screw propeller in a single setup: a case study”
- [10]Koichi Morishige , (2007) “ Development o f Tool Fabrication CAD/CAM for Conicoid End Mill”
- [11] John C. J. Chiou1 et Yuan-Shin Lee (2007) “Five-Axis High Speed Machining of Sculptured Surfaces by Surface-Based NURBS Path Interpolation”
- [12] Xujing Yang, (2006) « A New NURBS Tool Path Generation Algorithm for Precise Sculptured Surface Machining
- [13] J, XIA et Q. J. GE (2001) “an exact representation of effective cutting shapes of 5-axis cnc machining using rational Bézier and b-spline tool motions
- [14] Chih-Hsing Chu “Tool Path Planning for Five-Axis Flank Milling with Developable Surface Approximation “
- [15]Chu A My « On 5-Axis Freeform Surface Machining Optimization: Vector Field Clustering Approach »
- [16] V.S. Rao, (2004) “ Modelling of tooth trajectory and process geometry

in peripheral milling of curved surfaces”

[17] D Rotha., S. Bedi (2000) “ Surface swept by a toroidal cutter during 5-axis machining”

[18]Yun Jae-Deuk, Jun-Ho Yoong (2009) «A Geometric Postprocessing Method Using Joint Positions of a 5-Axis Machine »

[19] Raphaël Laguionie, (2007) « programmation avancée des machines outils : implementation de l’usinage trochoidal et du treilage dans la chaine numerique step - NC »

[20]Manoche Djassemi (A Parametric Programming Technique For Efficient CNC Machining Operations

[21] Hongbin Liang (2009) A 5-axis milling system based on a new G code for NURBS surface

[22] Cab-sang Ryu (2002) “ implementation of web-based NC postprocessor builder”

[23] Robert Endl et Jeffrey Jaje Usinage 5 axes : les défis des systèmes de FAO et des utilisateurs

[24] Ming-Che Ho (2003) Five-axis Machining Improvement via Cutting Error Control and Tool Orientation Smoothing

[25] www.matsuura.com

[26] Denavit, J. and Hartenberg, R.S., A kinematics notation for lower-pair mechanism based on matrices, ASME J. Appl. Mech. 22 (2) pp. 215–221, 1955.

[27] Angeles, J., Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods and algorithms, Springer, New York, 107, 390 pages, 2003

[28] bernad Méry (1997) Machines à commande numérique ISBN 2-86601-607-6

[29] VALIPOUR JAHANPISHEH Hojjat (2007) An optimal post-processing module for five-axis cnc milling machines

[30] Whitney, D.E., (1969). Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. IEEE Trans. Man-Machine Syst., vol. 10, no. 2, pp. 47–53.

- [31] Pieper, D.L., The Kinematics of Manipulators under Computer Control, Ph.D. thesis, Stanford University, 1968.
- [32] Salisbury, J.K. and Craig, J.J., Articulated hands: force control and kinematic issues, The Int. J. of Robotics Research, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982.
- [33] Sylvain LAVERNHE (2006) Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoires 5 axes UGV
- [34] HAMID SHARIFI (1995) maillage automatique par la méthode de quadtree/octree modifiée
- [35] Abbas M. Jabber Al - Enzi (2008) studying curve interpolator for cnc system
- [36] Xun Xu (2009) Integrating Advanced Computer-Aided Design, Manufacturing, and Numerical Control: Principles and Implementations ISBN 978-1-59904-716-4
- [37] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation de commande numérique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation_de_commande_numerique)
- [38] BEN YOUNES Jalel (2004) fabrication assistée par ordinateur

ملخص

يمكن الاطلاع علي أسطح معقدة من التطبيقات الصناعية مثل السيارات , وهياكل القوارب وقطع المستعمل في الصناعة الفضائية .ويتم عادة في مثل هذه الحالات من السطوح استخدام الآلات ذات 5 محاور.

طبقتنا في عملنا هذا على النمذجة الهندسية الحركية على آلة ذات 5 محاور و استعملنا آلة ماتسورا MAN 72-25

ذات 5 محاور لإنشاء برنامج APT و G-code لقطعة ذات سطح معقد وهذا بمساعدة برنامج CATIA V5R20

Résumé

Les surface complexes peuvent être trouvé dans de nombreuse applications industrielles telles que les pièces d'automobile, les coques de bateaux et les pièces en aérospatial. L'usinage de telles surfaces est réalise en général en utilisant le fraisage 5 axes. Notre travail est axé sur la modélisation géométrique et la modélisation cinématique de l'usinage 5 axes , nous avons appliqué des modélisation pour machine matsuura MAN72-25 CNC à 5 axes . Nous avons utilisé logiciel CATIA V5R20 pour génération des programmes APT et G-code

summary

The complex surface can be found in many industrial applications such as automotive parts, boat hulls and parts in aerospace. The machining of such surfaces is generally performed using 5-axis curling. Our work focuses on geometric modeling and kinematics modeling of 5-axis machining, we applied the modeling machine matsuura MAN72-25 5-axis CNC. We used CATIA V5R20 generation programs for APT and G-code