



**Université de Batna 2- Mostefa Ben Boulaïd**  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique



## **Thèse**

Préparé au sein du Laboratoire de Recherche en Productique (LRP)

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat en Science**

**Option : Construction Mécanique**

Sous le Thème :

---

### **Correction du Comportement Cinématique d'Orientation Relative entre Pièce/Outil pour les Machines à 5 Axes**

---

Présenté par

**BETTINE Farid**

Devant le jury composé de :

Mr. MAZOUZ Hammoudi	Prof	Université de Batna 2	Président
Mr. MANAA Rabah	MCA	Université de Batna 2	Rapporteur
Mr. AMEDDAH Hacène	MCA	Université de Batna 2	Co-Rapporteur
Mr. BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud	Prof	Université d'Annaba	Examineur
Mr. LAOUAR Lakhdar	Prof	Université d'Annaba	Examineur
Mr. DERFOUF Chems-eddine	MCA	Université de Biskra	Examineur

*Cette thèse a été réalisée au sein de Laboratoire de Recherche en Productique (LRP), Département de Mécanique, Faculté de Technologie de l'Université de Batna 2.*

*Avant toute chose, je remercie mon **Dieu** le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.*

*Je remercie chaleureusement mon directeur de thèse le Docteur **MANAA Rabah**, Maître de Conférences 'A' à l'université de Batna2, pour ses nombreux conseils, son aide et sa patience.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur le Docteur **AMEDDAH Hacène**, Maître de Conférences 'A' à l'université de Batna-2 pour avoir proposé ce thème de recherche, Co-encadré cette thèse et de sa disponibilité et son soutien qu'il a toujours porté à mes travaux.*

*J'adresse mes remerciements les plus vifs à Monsieur : **MAZOUZ Hammoudi**, Professeur à l'université de Batna 2 qui a accepté d'examiner et de présider mon jury de thèse.*

*Je remercie également les membres de jury :*

*Monsieur : **BOUCHELAGHEM Abdelaziz Mahmoud**, Professeur à l'université de Badji Mohktar-Annaba,*

*Monsieur : **LAOUAR Lakhdar**, Professeur à l'université de Badji Mohktar-Annaba,*

*Monsieur : **DERFOUF Chems-eddine**, Maître de Conférences 'A' à l'université de Mohamed Khider-Biskra,*

*Pour l'honneur qui m'ont fait d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir consacré de leur temps à la lecture de cette thèse.*

*Enfin, je remercie tout particulièrement mes **parents**, ma **famille**, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études, ainsi pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis.*



# TABLE DES MATIERES

**Table des matières** .....i  
**Introduction** .....1

## **Chapitre I : Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations**

I.1 Introduction .....6  
I.2 Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe.....6  
I.3 Evolution des machines .....8  
    I.3.1 Machine d'usinage à 5 axes .....9  
    I.3.2 Architecture machine 5 axes .....10  
        I.3.2.1 L'architecture série .....11  
        I.3.2.2 L'architecture parallèle .....12  
    I.3.3 Classification des machines-outils a 5-axes.....13  
    I.3.4 Choix de la machine-outil 5 axes .....15  
I.4 Sources des erreurs dans les machines 5 axes.....20  
    I.4.1 Erreurs quasi-statiques.....21  
        I.4.1.1 Erreurs géométriques.....21  
        I.4.1.2 Erreurs thermiques.....24  
    I.4.2 Erreurs dynamiques.....25  
I.5 Etat de l'art concernant les machine 5 axes .....25  
    I.5.1 Comportements cinématiques des machines à 5 axes.....26  
    I.5.2 Génération de trajectoire d'outil .....27  
    I.5.3 Techniques d'optimisations.....30  
I.6 Conclusion.....37

## Chapitre II : Modélisation de la machines CNC à 5 axes

II.1 Introduction.....	39
II.2 Modélisation géométrique.....	39
II.2.1 Transformation homogène.....	40
II.2.2 Paramètre Denavide & Hartenberg.....	43
II.2.3 Modélisation géométrique direct.....	45
II.2.4 Modèle géométrique inverse.....	46
II.3 Modélisation cinématique .....	50
II.3.1 Modélisation cinématique direct .....	50
II.3.2 Modélisation cinématique inverse .....	54
II.4 Conclusion .....	55

## Chapitre III : Génération des Trajectoires d'Outils

III.1 Introduction .....	57
III. 2 Caractéristiques d'un trajet d'outil.....	57
III. 2.1 Calculs des trajectoires d'outils.....	58
III. 3 Positionnement outil. ....	60
III. 4 Méthodes des générations de trajectoires d'outil.....	62
III. 4. 1 Méthode cartésienne.....	63
III 4. 2 Méthode des plans parallèles.....	63
III. 4. 3 La méthode des surfaces guides.....	64
III. 4. 4 La méthode iso paramétrique.....	65
III. 4. 5 La méthode des surfaces offset.....	67
III. 5 Stratégies d'usinage de cavités.....	67
III. 5. 1 Classification des cavités.....	67
III. 5. 2 Usinage 2D1/2.....	69

III. 5. 3 Usinage 3D.....	70
III. 5. 4 Stratégies conventionnelles.....	71
III. 5. 4. 1 Stratégie d'usinage en Zigzag.....	71
III. 5. 4. 2 Stratégie d'usinage en Contours parallèles.....	73
III. 5. 4. 3 Stratégie d'usinage en Contours Spiral.....	74
III. 6 Stratégies d'usinage à grande vitesse.....	74
III. 6. 1 Usinage trochoïdal.....	74
III. 6. 2 Usinage en tréflage.....	76
III.7 Conclusion .....	78

## **Chapitre IV : Méthode d'optimisation par les réseaux de neurones artificiels**

IV.1 Introduction.....	80
IV.2 Réseaux de neurones artificiels.....	80
IV.2.1 Fonctions de transfert.....	82
IV.2.2 Architecture de réseau.....	85
IV.3 Le perceptron multicouche (Multi Layer Perceptron MLP).....	87
IV.3.1 Apprentissage des réseaux de neurones artificiels.....	88
IV.3.2 Accélération de l'algorithme avec le momentum.....	92
IV.4 Réseaux à Fonction Radiale de Base (RBF).....	92
IV.5 Conclusion.....	96

## **Chapitre V : Application de la méthode de Réseaux neurone pour optimisation de la Cinématique inverse**

V.1 Introduction.....	98
V.2 Description géométrique de la Matsuura MX330.....	98
V.3 Modélisation géométrique.....	100

V.3.1 Modèle géométrique inverse .....	103
V.4..Modélisation cinématique.....	105
V.5 Application de la Méthode d'optimisation par les RNA pour les Stratégie trochoïdal.....	108
V.5.1 Formulation du réseau perceptron multicouche.....	109
V.5.2 Stratégie trochoïdal.....	111
V.5.2.1 Usinage UGV d'Ebauche sur Machine CNC Application de La Stratégie Trochoïdal.....	113
V.5.3 Résultats et discussions.....	114
V.6 Conclusion.....	120
<b>Conclusion générale</b> .....	121
<b>Références</b> .....	122



## LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Processus d'élaboration des pièces de forme complexe	7
Figure I.2	Parcours 3 axes, 3+2 axes ,5 axes	9
Figure I.3	Les deux architectures de machine-outil	11
Figure I.4	Architecture série	11
Figure I.5	Architecture parallèle	13
Figure I.6	Matsuura MX330	15
Figure I.7	Vue de gauche de la Machine Matsuura MX330	17
Figure I.8	Vue de face de la machine Matsuura Mx330	18
Figure I.9	Vue de droit de la machine Matsuura Mx330	19
Figure I.10	Effets des sources d'erreurs dans les machines	20
Figure I.11	Erreurs de position et d'orientation de l'axe C	22
Figure I.11	Écart de mouvement angulaires et linéaires pour un déplacement le long d'une trajectoire nominale parallèle à l'axe X	23
Figure II.1	Relation entre les espaces articulaires et opérationnels	39
Figure II.2	Transformation de repère	42
Figure II.3	Paramètres de Denavit & Harteberg	43
Figure II.4	Transformations entre l'organe terminal et le repère atelier	48
Figure II.5	Articulation prismatique	51
Figure II.6	Articulation rotoïde	52
Figure III.1	Génération de trajectoire	57
Figure III.2	Paramètres de la génération de trajectoire	58
Figure III.3	Points de contact outil/pièce et points de contrôle outil	59
Figure III.4	Discrétisation polyédrique d'une surface	60
Figure III.5	Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil	61
Figure III.6	Paramétrisation de l'orientation de l'axe outil	61
Figure III.7	Définition d'un contact multipoints	62
Figure III.8	Stratégie d'usinage par plans parallèles	64
Figure III.9	Stratégie d'usinage par surface guide	65
Figure III.10	Trajectoire iso-paramétrique	65
Figure III.11	Stratégie iso paramétrique	66

Figure III.12	Inconvénients de la stratégie isoparamétrique	67
Figure III.13	Usinage d'une surface quelconque. (a) modèle de surfaces décomposées, (b) Traçage des points de donnés, (c) Trajectoires de l'outil	67
Figure III.14	Concept de poche généralisée : (a) poche 2D1/2, (b) poche 3D	68
Figure III.15	Planification des trajectoires	69
Figure III.16	Décomposition d'une forme complexe	70
Figure III.17	Stratégies d'usinages prédéfinies	70
Figure III.18	18 Procédure de planification de trajet en Zigzag: (a) avec inclinaison 90°, (b) Trajets d'outil élémentaires, (c) Sous trajets (AA'- BB'), (d) Liaison des trajets	72
Figure III.19	Influence de la direction de l'usinage sur le nombre de retraits: (a) Inclinaison 90° sans retrait, (b) Inclinaison 0° avec deux retraits	72
Figure III.20	20 Direction d'usinage: (a) inclinaison 0° avec trois segments élémentaires, (b) inclinaison 90° avec dix segments élémentaires	73
Figure III.21	Trajectoires de la stratégie contour parallèle	74
Figure III.22	Trajectoires de la stratégie contour spirale	74
Figure III.23	Trajectoire d'usinage en trochoïdale	75
Figure III.24	Trajet trochoïdale généré en Zigzag	76
Figure III.25	Types d'engagement en tréflage	77
Figure IV.1	Modèle d'un neurone artificiel	81
Figure IV.2	Représentation matricielle du modèle d'un neurone artificiel	82
Figure IV.3	Fonction de transfert : (a) du neurone «seuil» ; (b) du neurone «linéaire», et (c) du neurone «sigmoïde	84
Figure IV.4	Couche de S neurones	85
Figure IV.5	Représentation matricielle d'une couche de S neurones	86
Figure IV.6	Représentation matricielle d'un réseau de trois couches	86
Figure IV.7	Structure d'un réseau de neurone multicouche	88
Figure IV.8	Fonction sigmoïde	90
Figure IV.9	Représentation d'un RBF	93
Figure V.1	Machine Matsuura MX330 à structure RRTTT	99
Figure V.2	Le schéma du centre de machine à 5 axes	99
Figure V.3	Chaîne cinématique de Machine-outil Matsuura MX330 à 5-axes	101
Figure V.4	Géométrie direct du Matsuura MX330 à 5 axes	103
Figure V.5	Géométrie inverse du Matsuura MX330 à 5 axes	104
Figure V.6	Structure de perceptron multicouche MLP	108
Figure V.7	Flow chart du réseau de neurones MLP	96

Figure V.8	Mouvement trochoïdal	111
Figure V.9	Vérification de la courbure de la trajectoire	112
Figure V.10	Définition du pas d'outil	113
Figure V.11	Définition de la pièce	113
Figure V.12	Représentation de la trajectoire d'outils	114
Figure V.13	Désirées et prédites de l'axe X	115
Figure V.14	Désirées et prédites de l'axe Y	115
Figure V.15	Désirées et prédites de l'axe Z	116
Figure V.16	Désirées et prédites de l'axe A	116
Figure V.17	Désirées et prédites de l'axe A	117
Figure V.18	Erreur de validation de l'axe X	118

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Déférente types des machines 5 axes	14
Tableau I-2	Caractéristiques de machine Matsuura MX330	16
Tableau I.3	Notations pour définir les erreurs géométriques de différents axes	24
Tableau I.4	Les méthodes d'optimisation utilisées pour améliorer les facteurs d'usinage lors de recherches précédentes	36
Tableau IV.1	Fonctions de transfert	83
Tableau V.1	Mouvement de l'outil	100
Tableau V.2	Paramètres de D-H à partir des systèmes de coordonnées de la pièce à l'outil	101
Tableau V. 3	Les paramètres MLP obtenus	119

## ***NOTATIONS ET ACRONYMES***

<b>A</b>	Axe révolutée de machine-outil
<b>ai</b>	Vecteur de position entre chaque image en fonction de D-H
<b>ai</b>	Notation D-H
<b>B</b>	Axe révolutée de machine-outil
<b>bi</b>	Notation D-H.
$V_n$	Vitesses linéaire
$w_n$	Vitesses angulaire
<b>C:</b>	Axe révolutée de machine-outil
<b>CC</b>	Points de Cutter de contact
<b>CN</b>	Commande Numérique
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control
<b>D-H</b>	Denavit & Hartenberg
<b>FAO</b>	Fabrication Assistée par Ordinateur
<b>CAO</b>	Conception Assistée par Ordinateur
$e_i$	Vecteur unitaire associé à chaque axe révolutée
<b>J</b>	Matrice jacobienne
<b>HTM</b>	Matrice de transformation homogène
<b>LC</b>	Localisation de cutter de l'outil
<b>MGD</b>	Modèle Géométrique Direct
<b>MGI</b>	Modèle Géométrique Inverse
<b>MCD</b>	Modèle cinématique Direct
<b>MCI</b>	Modèle cinématique Inverse
<b>MIT</b>	Massachusetts Institue of Technology
<b>N</b>	Vecteur d'orientation plus mignon
<b>p</b>	Vecteur de position dans l'espace cartésien
<b>Q</b>	Matrice de rotation entre deux trames
<b>R<sub>3x3</sub></b>	Matrice de rotation
<b>t</b>	Outil de coupe
$\dot{\theta}$	Joint de vitesse

<b>X</b>	Axe prismatique de machine-outil
<b>Y</b>	Axe prismatique de machine-outil
<b>Z</b>	Axe prismatique de machine-outil
<b>T</b>	Translation d'outil
<b>R</b>	Rotation d'outil
<b>GA</b>	Algorithme Génétique
<b>AIS</b>	Systèmes Immunitaires Artificiels
<b>PSO</b>	Optimisation par Essaim de Particules
<b>ACO</b>	Optimisation par Colonies de Fourmis
<b>ARN</b>	Réseaux de Neurones
<b>MLP</b>	Multi-Layer Perceptron
<b>RBF</b>	Radial Basic Functions

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Le monde industriel en général et de la fabrication des machines-outils en particulier a connu ces dernières années de nombreuses évolutions en termes de structures de machines, de types d'usinages conventionnels ou non conventionnels, d'outils performants, de stratégies d'usinage émergentes, liées à l'apparition de nouveaux besoins et notamment la qualité attendue et la complexité des pièces mécaniques, en parallèle, le monde de la consommation tel que nous le voyons aujourd'hui impose des coûts de production réduits avec une qualité de pièces accrue. Ces deux grands facteurs sont à l'origine de l'utilisation de l'usinage 5 axes et de la progression de l'Usinage Grande Vitesse avec de nouvelles stratégies émergentes en ébauche et en finition, en  $2D^{1/2}$  ou en 3D.

La technologie des machines s'est aussi fortement améliorée, en particulier au niveau de la commande numérique et des axes d'entraînement. Les axes de translation et de rotation sont beaucoup plus dynamiques notamment avec l'utilisation des moteurs couples. Les outils coupants ayant suivis la même dynamique, l'UGV a connu une forte évolution, permettant de diminuer les temps de production de façon radicale.

Ainsi l'industrie présente un large éventail de machines qu'elles soient flexibles ou spécifiques, de petites ou de grandes dimensions, UGV ou non, à 3 axes, 5 axes ou plus. Cependant, la littérature présente différentes structures de machines outil 5 axes. Généralement trois types de machines outil sont utilisées, suivant l'architecture et la position relative des axes de translation (T) et des axes de rotation (R) : (RRTTT), (RTTTR), (TTTRR). Chacune de ces configurations présente certains avantages et inconvénients. Néanmoins, les machines-outils à cinq axes ont plus de sources d'erreur comparées aux machines-outils à trois axes. Il est difficile de déterminer les sources d'erreur d'une machine-outil à cinq axes en raison de la complexité de la configuration. En général, les erreurs de source des machines-outils à cinq axes peuvent être classées en quatre types : erreurs géométriques, erreurs cinématiques, erreurs induites thermiquement, erreurs de déviation causées par les efforts de coupe et autres erreurs telles que celles causées par les servomoteurs, erreurs de la rotation des axes de la machine, ou des erreurs algorithmiques d'interpolation de contrôle numérique.



Ce problème de cinématique est connu pour être non linéaire et ayant plusieurs solutions ; sa complexité dépend largement de l'ordre d'apparition et de l'orientation relative de l'axe (lien) différent le long de la chaîne cinématique, et peut être traité comme celui des manipulateurs robotisés. Cependant, les erreurs de suivi des axes rotatifs et de translation sont transmises cinématiquement à la pointe de l'outil dans les machines-outils à cinq axes, ce qui entraîne des erreurs de contournée entre les trajectoires d'outil commandées et réelles.

Dans ce contexte, ce travail présente une nouvelle approche pour prédire des solutions d'erreurs cinématiques dans une machine à cinq axes pour la stratégie de fraisage trochoïdal. Cette approche est basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN) pour la stratégie d'usinage par fraisage trochoïdal. Dans cette étude nous allons proposer un modèle de perceptron multicouche (MLP) pour trouver la solution cinématique inverse pour une machine à cinq axes. Les ensembles de données pour le modèle de réseau neuronal sont obtenues en utilisant la modélisation cinématique. La solution de chaque réseau neuronal est estimée en utilisant l'équation cinématique inverse de la machine-outil pour sélectionner la meilleure. En conséquence, la mise en œuvre du réseau neuronal améliore la performance du processus d'apprentissage. Pour cela, l'étude numérique de la stratégie trochoïdale et les résultats expérimentaux seront présentés dans le but de moudre complètement et d'assurer un contrôle de l'engagement radial.

Afin de présenter cette méthode, nous allons étudier la problématique générale de l'usinage 5 axes. Le plan du document de recherche se présente comme suit :

**Le chapitre 1** : Présente une revue de la littérature actuelle liée à la modélisation géométrique et cinématique de la machine à 5 axes et des programmes utilisés pour le développement des programmes d'usinages des pièces à usiner (cavité, poche, forme quelconque).

- Présente d'une part les généralités 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 et vers l'usinage 5 axes combiné), leurs différents types d'architectures et enfin leur classification.
- D'autre part au choix de machine spécifique à notre démarche de travail, à savoir la machine 5 axes capable d'usiner en UGV des cavités avec des stratégies émergentes.

**Le chapitre 2** : Présente la modélisation géométrique et cinématique des machines 5axes, par une modélisation géométrique directe et inverse de la structure cinématique de la machine CNC type Matsuura Mx330, dans un 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). D'autre part présente la modélisation cinématique directe et inverse, dans le but de trouver une relation entre la différentielle de la

position de l'effecteur (outil) 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 :** Consacré aux méthodes de générations de trajectoires et les stratégies déjà existantes et émergentes dans la littérature. Par une description détaillées des méthodes conventionnelles et celles dites émergentes (trochoïdales et tréfilage).

**Le chapitre 4 :** Présente en premier lieu une généralité sur les réseaux de neurones, où nous allons chercher à éclairer les concepts généraux des réseaux de neurones et la méthode de machines à vecteurs de support et essayer de détailler d'avantage les notions auxquelles nous allons faire appel pour élaborer notre travail. Cette approche d'optimisation entre dans le cas de prédiction des solutions d'erreurs cinématiques dans une machine à cinq axes pour la stratégie de fraisage trochoïdal.

**Le chapitre 5 :** Comprend la validation des résultats

Nous commençant par la description géométrique de la machine considérée pour l'étude la machine CNC Matsuura, où des modèles : Modélisation géométrique, Modèle géométrique inverse et Modélisation cinématique, sera établit ensuite, l'application de la Méthode d'optimisation par les RNA pour la Stratégie trochoïdal sera élaborée. Des résultats et discussions seront validés pour ce cas de machine CNC.

Et en fin conclusion et perspectives.

# *Chapitre :*

## *I*

*Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

# **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

## **I.1 Introduction**

Ces dix dernières années ont vu l'apparition de nouvelles technologies qui ont contribué à la réduction des temps de conception et de production. De nombreuses applications peuvent tirer parti de l'usinage 5 axes, permettant d'obtenir une plus grande liberté dans le positionnement de l'outil pour faciliter l'usinage des formes complexes élaborées en CAO pour les pièces industrielles telles que les pièces d'automobiles, les coques de bateaux ou les pièces d'aérospatial, ce qui était très difficile voire impossible sur des machines à 3 axes.

Dans ce premier chapitre nous allons passer en revue la littérature liée à l'évolution des machines à 5 axes, ainsi qu'une synthèse bibliographique sur les travaux concernant les techniques d'optimisations des machines à 5 axes.

## **I.2 Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe [1]**

Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe doit permettre de garantir la fidélité entre la pièce et les spécifications fonctionnelles exprimant l'idée initiale du designer (Figure I. 1). Le processus se découple en une activité de conception et une activité de fabrication. On construit tout d'abord un modèle géométrique à partir des spécifications fonctionnelles. Il constitue le modèle de référence de la maquette numérique. Les trajectoires de l'outil permettant l'usinage de la pièce ou de son empreinte (dans un moule ou une matrice) sont calculées par le module de FAO. Finalement la pièce est usinée selon les trajectoires précédemment calculées.

# Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

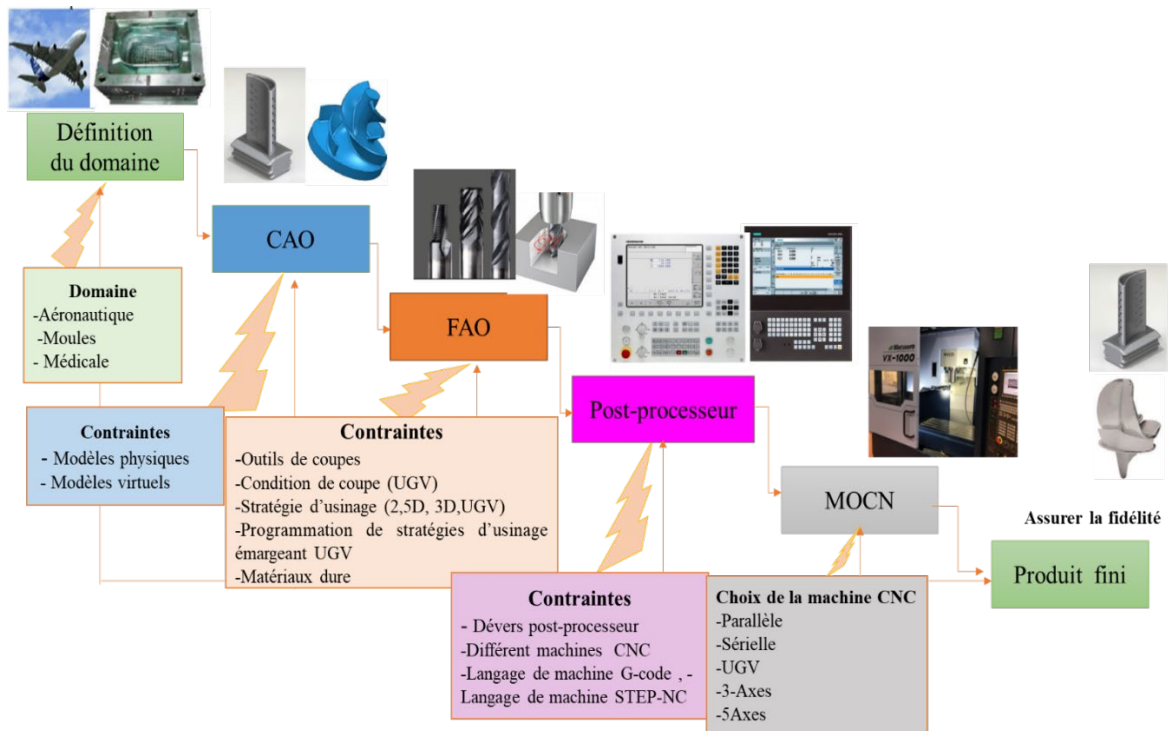


Figure I.1 : Processus d'élaboration des pièces de forme complexe

Chaque maillon du processus est susceptible d'introduire des écarts entre la géométrie de la pièce réalisée et celle escomptée. Le premier problème est la dégradation de l'information lors de l'expression de l'idée du concepteur en données géométriques dans le modèleur 3D. En effet, les techniques de construction des surfaces restent limitées, elles ne permettent pas toujours de réaliser les formes souhaitées par le concepteur ainsi que les raccords entre surfaces nécessaires à un usinage précis. L'utilisateur est tributaire des fonctionnalités du logiciel mis à sa disposition.

La forme résultante ne correspond donc pas forcément à l'intention du concepteur mais est la plus proche représentation géométrique que le modèleur permette d'obtenir. En outre, les spécifications fonctionnelles ne sont pas exprimées en tant que telles, seule la géométrie les satisfaisant est définie dans le modèle CAO.

### **I.3 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 I.2 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.

## Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

La Figure I.2 montre trois 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 (Figure I.2) [2].

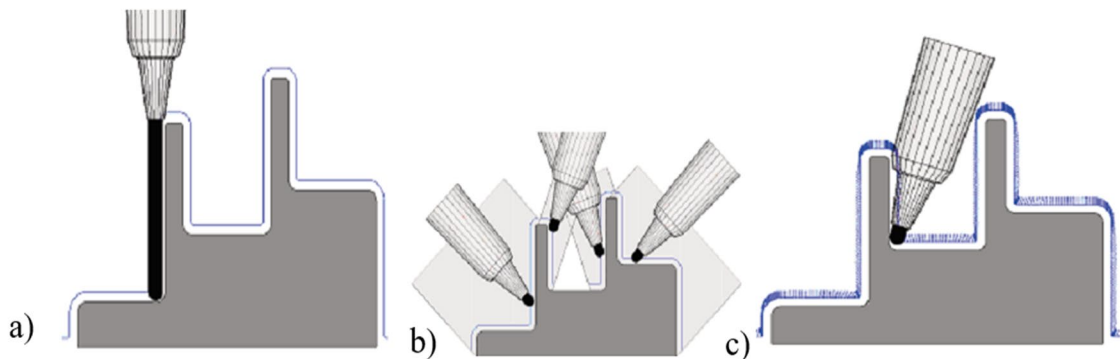


Figure I.2 (a) Parcours 3 axes, (b) Parcours 3+2 axes, (c) Parcours 5 axes.

Dans notre cas d'évolution de machine on s'intéresse à la machine 5 axes.

### I.3.1 Machine d'usinage à 5 axes

Une machine d'usinage 5 axes se distingue par l'existence de deux axes de rotation en supplément et 3 axes de translation. Ces axes supplémentaires permettent d'orienter l'axe de l'outil T par rapport à la pièce, au point de contact CC (Cutter Contact) entre la pièce et l'outil on définit le repère local. Initialement les deux axes rotatifs avaient pour objectif de réduire le nombre de phases en permettant d'orienter la pièce différemment. Dans ce cas, les axes rotatifs n'interviennent pas lors de l'opération d'usinage [3].

Le but d'orientation l'axe l'outil par rapport à les pièces :

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

### *d'optimisations*

- d'atteindre des surfaces inaccessibles ou d'éviter des collisions entre l'outil, le porte outil et la broche d'une part et la pièce et le montage d'usinage d'autre part ; cela concerne par exemple l'usinage des turbines ou des rouets [4].
- de changer d'outil pour augmenter la productivité ; le remplacement d'un outil hémisphérique par un outil torique ou cylindrique permet de réduire le nombre de passes ; cela concerne l'usinage des ailes, des pales, des matrices d'emboutissage ou l'usinage des poches de pièces de structures aéronautiques [5].
- d'orienter la partie active de l'outil par rapport au point de contact avec la surface à usiner de manière à contrôler la vitesse de coupe ou l'usure de l'arête de l'outil ; cela peut être utile pour usiner certains matériaux difficiles

### **I.3.2 Architecture machine 5 axes**

Deux types de machines existent pour l'usinage en 5 axes : les machines à structures sérielles et les machines parallèles. Par la classification qu'il propose, Bohez présente les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles et donne des critères de choix tels que le volume de travail, les fonctionnalités à attendre de la part de la commande numérique ou la nécessité d'avoir une broche horizontale ou verticale [6].

- 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



# Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

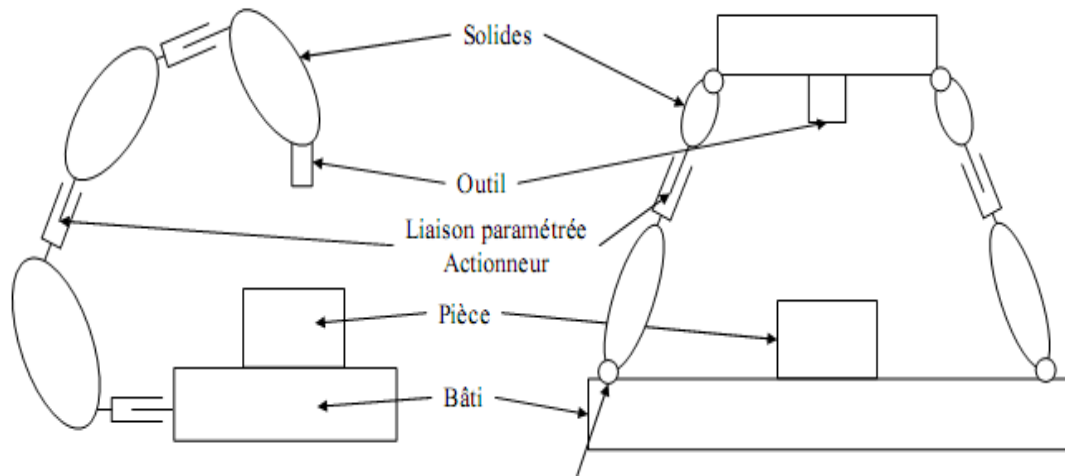


Figure I.3 : Les deux architectures de machine-outil

## I.3.2.1 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.

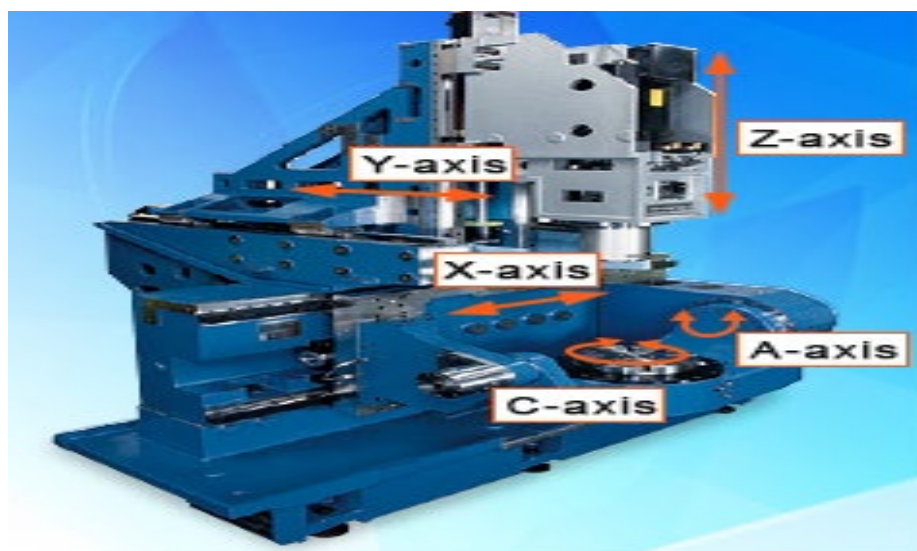


Figure I.4 : Architecture série [7].

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

### *d'optimisations*

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.

#### **I.3.2.2 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 simultané. Pour une machine à structure parallèle, quel que soit le mouvement, il est nécessaire de commander l'ensemble des actionneurs en simultané [8].

## Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

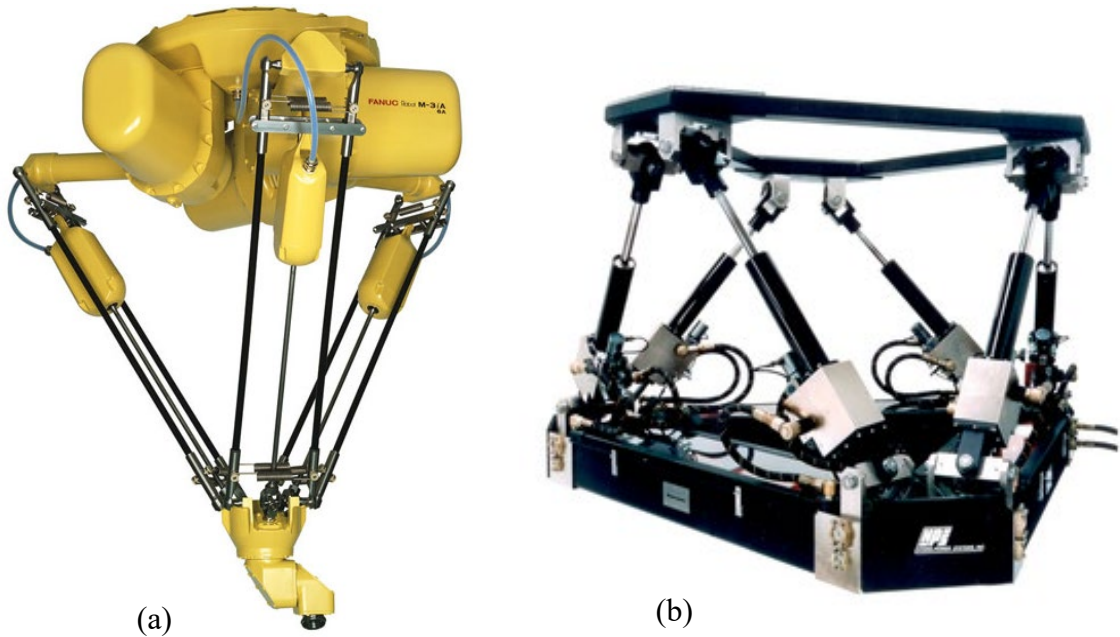


Figure I.5 : Architecture parallèle : (a) Machine-outil parallèle « hexapode », (b) Plate-forme de Gough-Stewart

### I.3.3 Classification des machines-outils a 5-axes

D'un point de vue cinématique, Bohez présente une étude des structures des machines outil 5 axes Trois types de machines outil est généralement utilisée, suivant l'architecture et la position relative des axes de translation (T) et des axes de rotation (R) [7].

Cas 1) Machine-outil de type RRTTT. Les axes de rotation orientent la pièce dans l'espace articulaire.

Cas 2) Machine-outil de type TTTRR. Les axes de rotation orientent l'axe de l'outil dans l'espace articulaire.


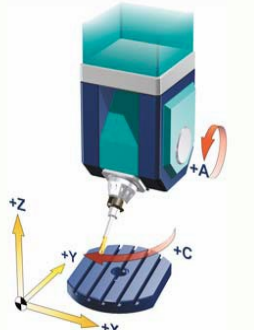
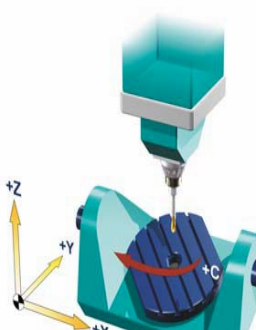



Cas 3) Machine-outil de type RTTTR. Les axes de rotation orientent l'axe de l'outil et la pièce dans l'espace articulaire.

Par conséquent, seules les topologies des machines-outils 5axis suivantes, répertoriées dans le tableau I.1.sont utilisés dans l'industrie [9,10].

# Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

*d'optimisations*

Tableau I.1 Différents types de machines 5 axes

Rotation d'axe	Différents types de machines 5 axes		
	Machines à tête twist TTTRR	Machines à tête universelle RTTTR	Machines à plateau Tilting RRTTT
BA	/		
CA	<p>XYZAC</p> 	<p>CXYZA</p> 	<p>ACZYX</p> 
CB	<p>XYZCB</p> 	<p>CXYZB</p> 	<p>BCZYX</p> 

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

### **I.3.4 Choix de la machine-outil 5 axes**

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 de pièce. Pour des raisons d'inertie, on cherche à minimiser les masses embarquées ou à déplacer des masses constantes de manière à ne pas perturber le comportement des asservissements. Ainsi, les usinages de grandes pièces sont plutôt réalisés sur des machines de type TTTRR, alors que les pièces médicales et les petits moules sont réalisés sur des machines de type RRTTT. Mais le choix du type de machine n'est pas anodin, car il induit des contraintes importantes sur l'espace de travail et sur la programmation des axes. 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 MX330 CNC 5 axes. Cette machine possède les caractéristiques suivantes :

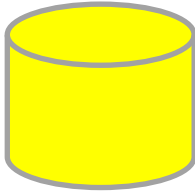


Figure I.6 : Matsuura MX330 [11]

## Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

*d'optimisations*

Tableau I-2 Caractéristiques de machine Matsuura MX330 [11]

	centre d'usinage 5 axes / vertical MX-330
<b>Max</b> : Espace de travail : mm (in)	 Ø330 x H 320 (Ø12.99 x H12.6) Ø420x 12.60)
capacité de chargement : Kg(lb)	80(176.37)
Course (X/Y/Z) : mm (in)	435/465/560 (17.13/18.31/22.05)
Course (A/C) : deg	-125+10/360
vitesse de broche : min <sup>-1</sup>	15000 (standard) 20000 (option)
Surface de travail	Ø 220
Vitesse de translation (X/Y/Z) : m/min	40
Vitesse de rotation (A/C) : min <sup>-1</sup>	17/33
Nombre d'outil	30(standard) 40 (standard) 90(option)

**Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

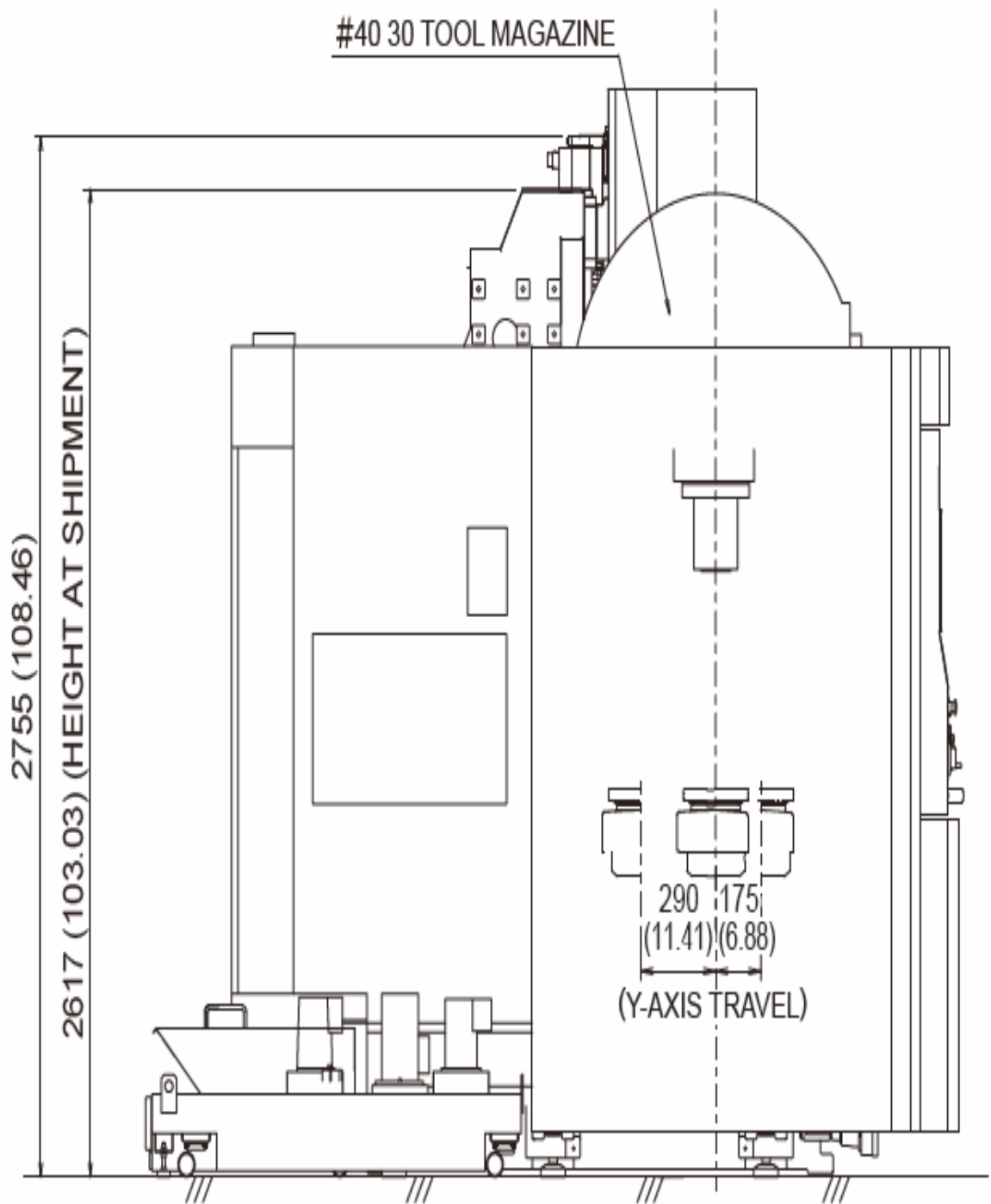


Figure I.7 Vue de gauche de la Machine Matsuura MX330

# Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

*d'optimisations*

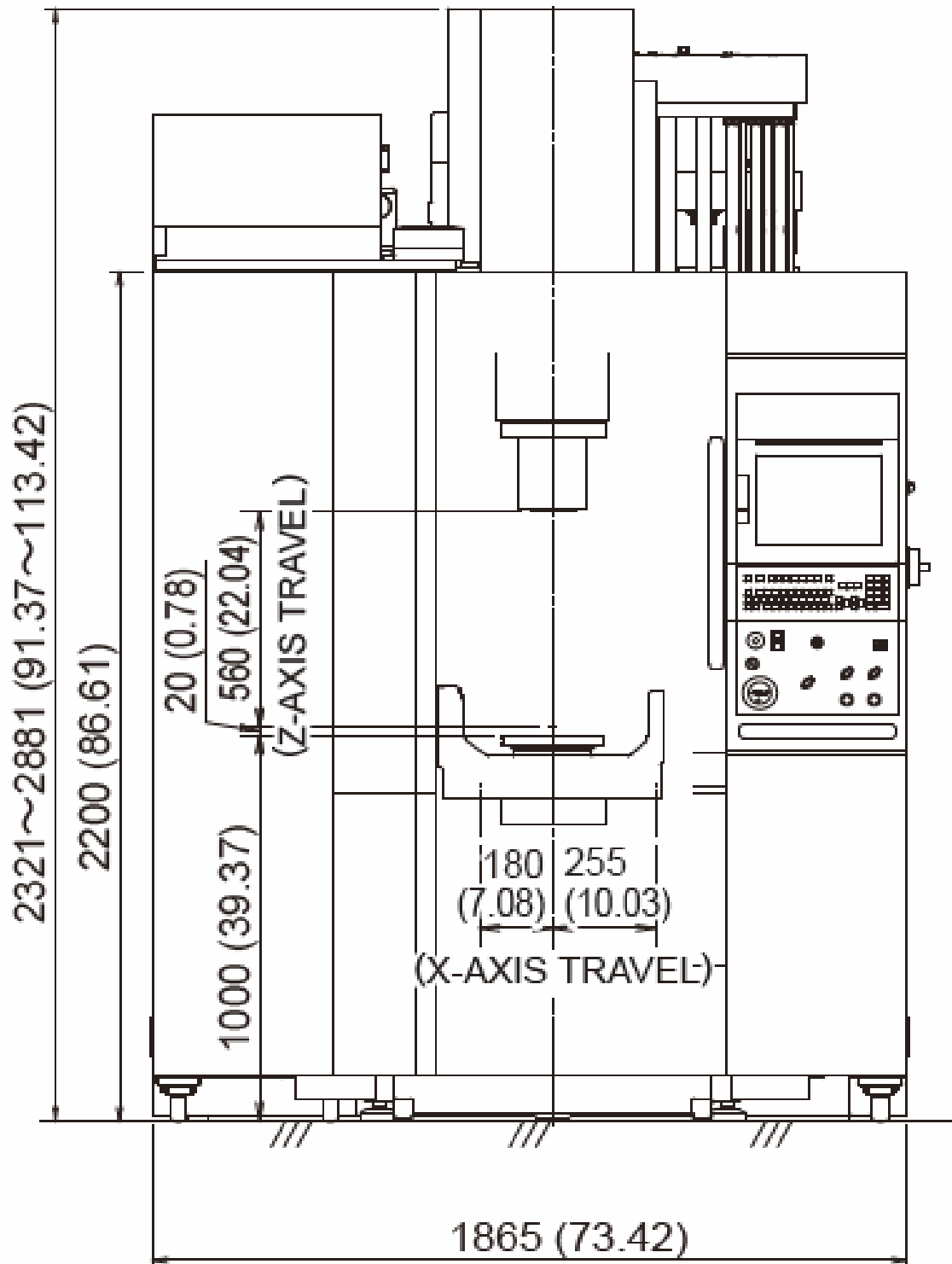


Figure I.8 Vue de face de la machine matsuura Mx330



**Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

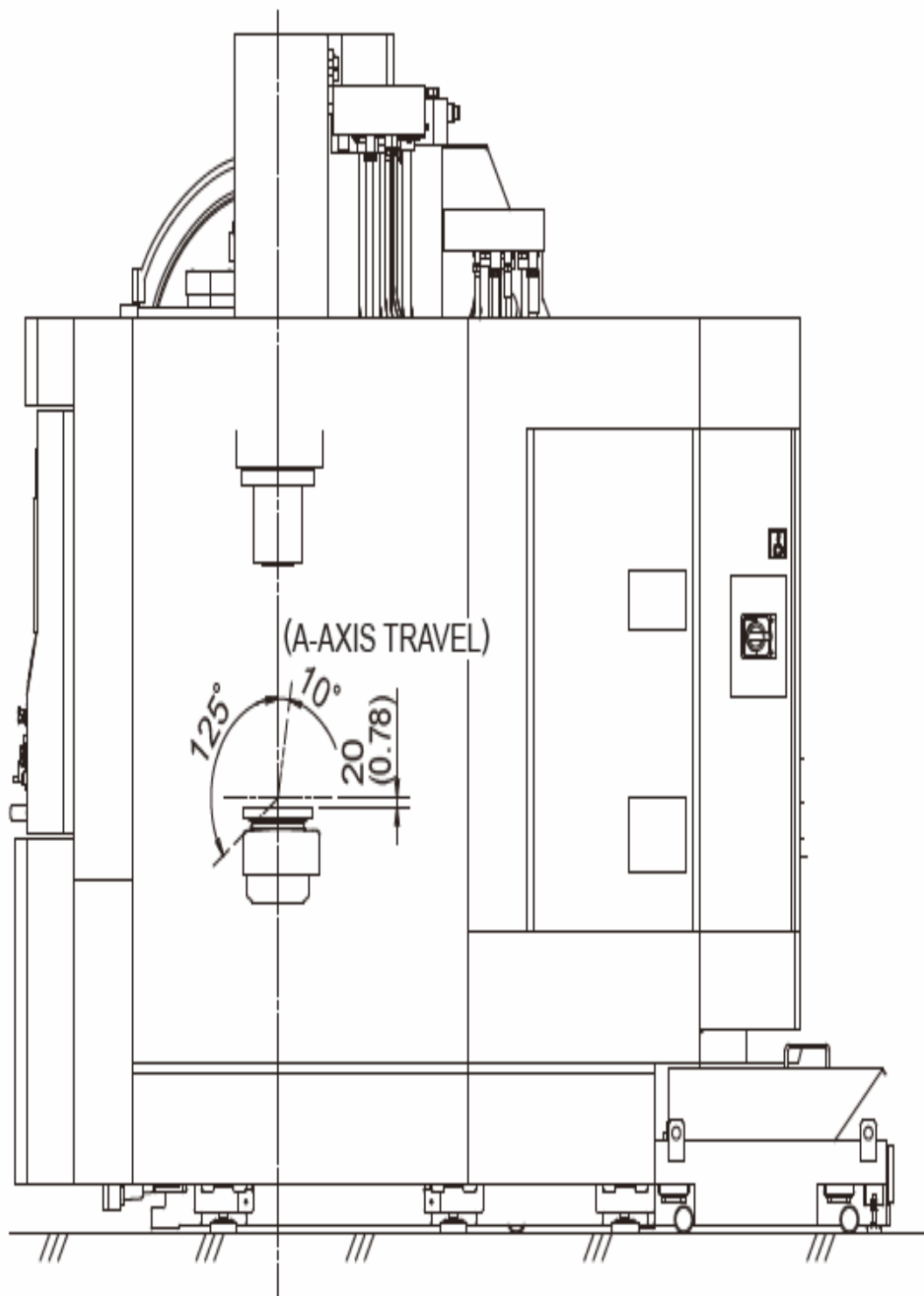


Figure I.9 Vue de droit de la machine matsuura Mx330

## **I.4 Sources des erreurs dans les machines 5 axes**

Les machines-outils à cinq axes ont plus de sources d'erreur par rapport aux machines-outils à trois axes. Par conséquent, il est plus difficile de déterminer les sources d'erreur d'une machine-outil à cinq axes en raison de la complexité de la configuration. En général, les erreurs de source des machines-outils à cinq axes peuvent être classées en quatre types : erreurs géométriques, erreurs cinématiques et erreurs induites thermiquement, erreurs de déviation causées par les forces de coupe et autres erreurs, telles que celles causées par les servomoteurs, erreurs de la rotation des axes de la machine, ou des erreurs algorithmiques d'interpolation de contrôle numérique.

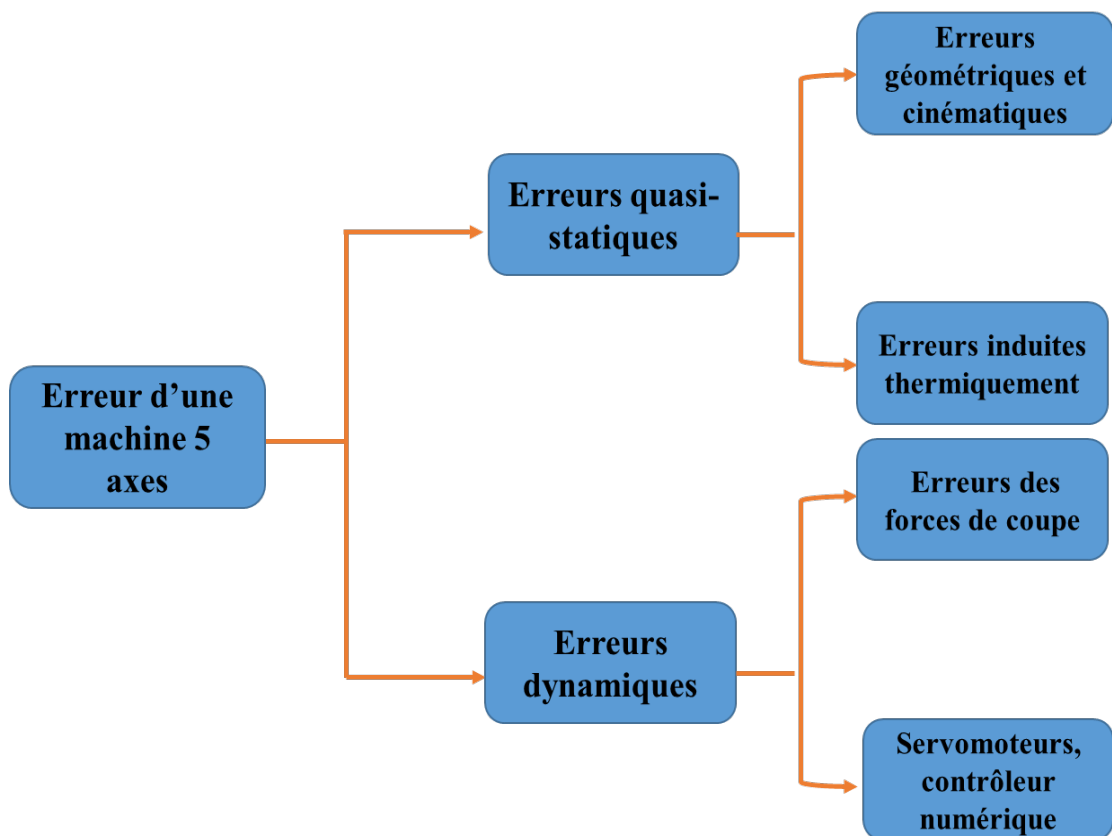


Figure I.10 Effets des sources d'erreurs dans les machines

### **I.4.1 Erreurs quasi-statiques**

Les erreurs quasi-statiques sont définies par Hocken [12] comme étant une déviation de la position relative de l'outil par rapport à la pièce qui varie lentement dans le temps et qui est reliée à la structure de la machine-outil. Ces erreurs peuvent être les conséquences d'une géométrie imparfaite, de sources de chaleur internes et externes ou encore des effets de la variation statique des forces causées par les charges et qui se manifestent dans le poids de la pièce et des composants de la machine.

#### **I.4.1.1 Erreurs géométriques**

Une machine-outil à cinq axes est constituée de trois axes prismatiques et deux rotatifs. Ceci induit le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce dans les trois dimensions de l'espace (X, Y et Z) et des mouvements rotatifs suivant les deux axes de rotation (A et C). Sous l'hypothèse des corps rigide, le mouvement de chaque axe est décrit par six degrés de liberté : trois translations et trois rotations. Les erreurs géométriques sont inhérentes à la structure de la machine et à ses composants. Elles représentent l'une des principales sources d'inexactitude et correspondent aux mesures directes résultantes partiellement des autres sources d'erreurs comme celles thermiques [13,14]

**Écarts géométriques de membrures** : appelés aussi écarts inter-axes, sont les erreurs de position et d'orientation entre deux axes successifs, dans le système de coordonnées de la machine [ISO 230-1 :2012][15]. Sous l'hypothèse des corps rigides, ces écarts sont invariants avec les coordonnées articulaires. La Figure I.11 illustre un exemple des écarts de membrures de l'axe C.

# Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

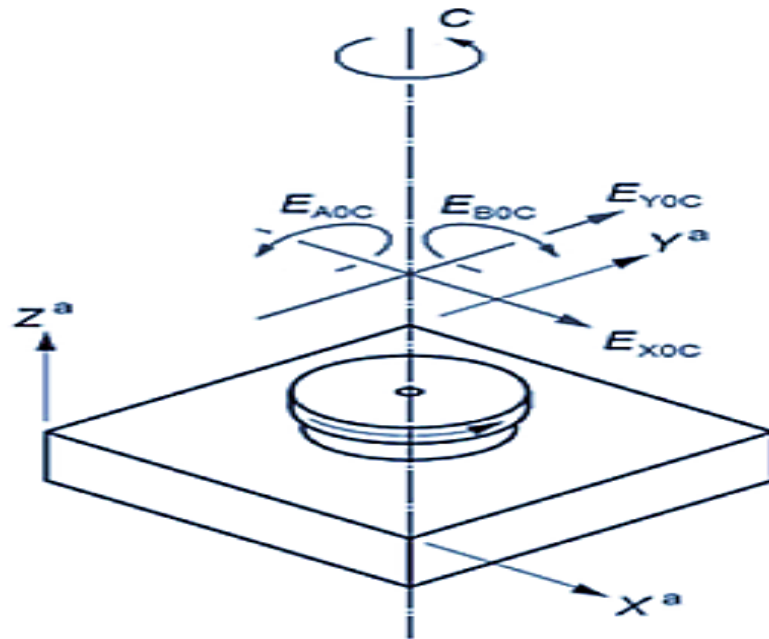


Figure I.11 : Erreurs de position et d'orientation de l'axe C [ISO 230-1 :2012]

**$EX0C$**  : erreur de position de C dans la direction de l'axe X

**$EY0C$**  : erreur de position de C dans la direction de l'axe Y

**$(0Y)C$**  : erreur d'orientation de C dans la direction de l'axe A; erreur de perpendicularité de C par rapport à Y

**$(0X)C$**  : erreur d'orientation de C dans la direction de l'axe B; erreur de perpendicularité par rapport à X

**$EC0C$**  : erreur de position de l'axe C à zéro

**a** : axe de référence

**Écarts cinématiques articulaires** : ou écarts intra-axes, décrivent les erreurs de position et d'orientation du mouvement des axes dus aux mouvements des composants de la machine [16]. Ils sont dépendants de la coordonnée articulaire de l'axe auquel ils sont associés. Pour un axe prismatique, les écarts cinématiques articulaires sont divisés en écart de position, écarts de rectitude et écarts angulaire, (Figure I.11).

**Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

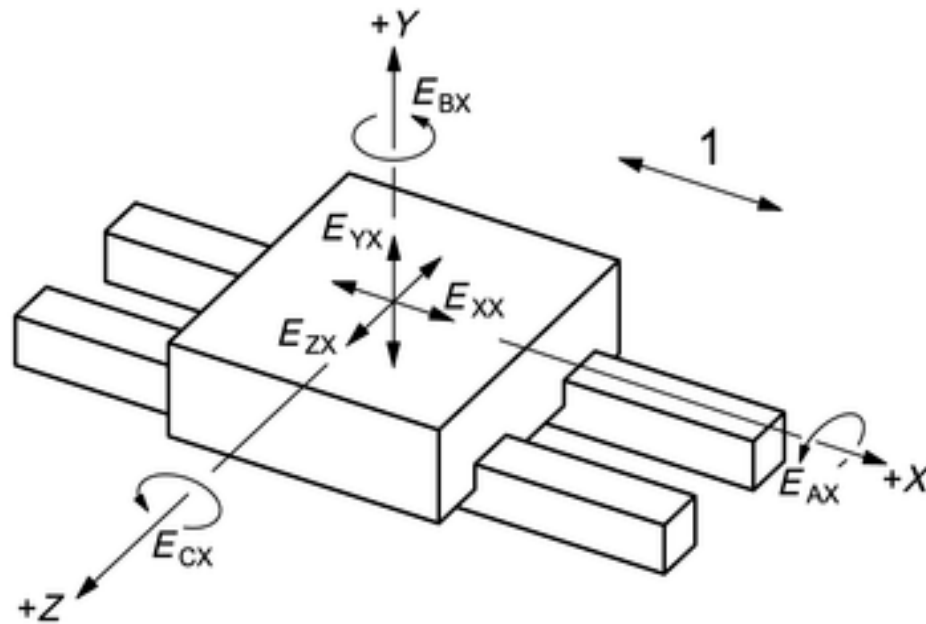


Figure I.11 : Écarts de mouvement angulaires et linéaires pour un déplacement le long d'une trajectoire nominale parallèle à l'axe X [ISO 230-1 :2012]

- 1** mouvement linéaire commandé sur l'axe X
- EAX** erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation A (roulis)
- EBX** erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation B (lacet)
- ECX** erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation C (tangage)
- EXX** erreur de positionnement de mouvement linéaire de l'axe X; écart de positionnement de l'axe X
- EYX** erreur de rectitude de mouvement en direction de l'axe Y
- EZX** erreur de rectitude de mouvement en direction de l'axe Z

Dans le tableau suivant nous définir les erreurs géométriques de différents axes

## Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

### *d'optimisations*

Tableau I.3 : Notations pour définir les erreurs géométriques de différents axes

Axes	Erreurs
A-axes	EXA EYA EZA EAA EBA ECA
	EY0A EZ0A EB0A EC0A (EA0A)
B-axes	EXB EYB EZB EAB EBB ECB
	EX0B EZ0B EA0B EC0B (EB0B)
C-axes	EXC EYC EZC EAC EBC ECC
	EX0C EY0C EA0C EB0C (EC0C)
X-axes	EXX EYX EZX EAX EBX ECX
	EB0X EC0X (EX0X)
Y-axes	EXY EYY EYZ EAY EBY EY
	EA0Y EC0Y (EY0Y)
Z-axes	EXZ EYZ EZZ EAZ EBZ ECZ
	EA0Z EB0Z (EZ0Z)

#### I.4.1.2 Erreurs thermiques

Les conditions opérationnelles des machines-outils sont considérablement influencées par des sources thermiques dont les effets peuvent constituer jusqu'à 40% des erreurs géométriques responsables des non-conformités dimensionnelles des pièces fabriquées [17,14] scindent les sources d'erreurs thermiques en deux catégories : externes et internes, en tenant compte des répercussions des sources de chaleur sur les déformations de l'outil, de la machine et aussi de la pièce.

- Les sources de chaleur externes : sont liées aux changements environnementaux tels que les rayons solaires, la lumière, etc., dont l'impact varie lentement dans le temps et altère le fonctionnement de la machine d'une manière uniforme.
- Les sources de chaleur internes : affectent d'une manière directe la structure de la machine et sont souvent liées à la broche, aux roulements, aux moteurs des axes linéaires et rotatifs, aux vis-à-billes, aux copeaux, etc. Ces éléments sont estimés être une source majeure de la variation du gradient de température. Slocum [18] stipule que le contrôle thermique de la machine doit être accompagné d'un préchauffage afin

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

### *d'optimisations*

d'atteindre l'équilibre thermique. D'autres méthodes consistent à faire des analyses par éléments finis lors de la phase de la conception pour prévenir les déformations élastiques de la structure. Il est également convenu de refroidir les roulements de la broche, d'isoler le moteur de la structure et d'inonder la zone de travail avec des lubrifiants. Les compensations

### **I.4.2 Erreurs dynamiques**

Ces erreurs sont dues essentiellement au mouvement rotatif de la broche et aux vibrations de la machine-outil et tout particulièrement aux résonances qui se produisent une fois que l'outil de coupe rentre en contact avec la pièce. En effet, les variations des forces, des accélérations et décélérations lors des opérations d'usinage ont un effet direct sur toutes les composantes mécaniques de la machine et par conséquent sur la position et l'orientation de l'outil par rapport à la pièce. Il est possible de prévenir ce type d'erreur en adoptant des analyses par éléments finis lors de la phase de conception de la machine. Une programmation du contrôleur est alors effectuée afin de spécifier les plages de vitesses à éviter et pouvant éventuellement exciter certaines fréquences de résonance de la machine [19]. Toutefois, l'usinage de précision est souvent réalisé avec de petites vitesses d'avance, la compensation des erreurs peut être faite sans prendre en compte l'effet des forces dynamiques.

## **I.5 Etat de l'art concernant les machine 5 axes**

Durant ces deux dernières décennies, les travaux de recherche dans le domaine de l'usinage à commande numérique de surfaces gauches ont été très prolifiques. Nous mentionneront entre autres les contributions d'ordre général ou de synthèse réservées au comportement cinématiques des machines-outils à 5 axes et les travaux dédiés spécifiquement aux méthodes et techniques de génération de trajectoires d'outils, le dernier sur les techniques d'optimisation des problèmes cinématiques

# **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

## **I.5.1 Comportements cinématiques des machines à 5 axes**

Une grande partie des travaux se concentre maintenant sur une utilisation optimale des capacités cinématiques des machines dans le but de minimiser le temps d'usinage. Ils nécessitent des modélisations complexes de la machine et de la commande numérique qui peuvent être difficiles à mettre en œuvre.

Rauch et Xu ont synthétisé 118 travaux basés sur l'étude des structures de machines 5 axes. Selon que les liaisons cinématiques sont en série ou en parallèle, les aptitudes des machines seront différentes. Pour améliorer les processus de fabrication, des chercheurs travaillent à caractériser les erreurs de positions et les erreurs cinématiques [20].

Dans ses travaux, Castagnetti accepte pour une stratégie différente (Castagnetti et al. 2008). Il part du constat que dans la majorité des cas, la cinématique des axes de rotation nuit au bon comportement cinématique de la machine. Il propose pour cela le Concept du Domaine d'Orientation Admissible (DOA). Cette méthode permet de définir un cône de tolérance angulaire pour chaque orientation d'outil. À l'aide de la transformée géométrique inverse, chacun de ces cônes est représenté dans le repère formé des deux angles de rotation de la machine (A et C) et de l'abscisse curviligne de la trajectoire (S). L'auteur réalise alors une optimisation dans cet espace. Suivant les critères d'optimisation et le type de machines, des gains de l'ordre de 20% sur le temps d'usinage sont possibles [20].

Anotaipaboon et al. Définissent le problème du choix du posage par la minimisation des erreurs cinématiques lors de l'usinage. En utilisant la méthode des moindres carrés, ils minimisent alors l'erreur entre la position de l'outil désirée et la position réelle. En utilisant des propriétés propres aux cinématiques des machines ils parviennent à réduire le nombre de variables du problème. Ils résolvent alors un système d'équations non linéaires en utilisant la méthode de Newton-Raphson. Les informations données dans l'article ne nous ont pas permis d'appliquer cette méthode à notre cinématique machine [21].

Plus récemment Rauch et Hascoët (Rauch and Hascoet, 2012) ont approfondi l'étude de la stratégie de tréflage en regardant l'influence des caractéristiques cinématiques de la machine-outil sur le débit de copeau. En particulier, ils insistent sur l'influence du jerk de la machine sur la capacité de celle-ci à atteindre la vitesse d'avance programmée. En imposant la géométrie de fraise et les conditions de coupe théorique, ces auteurs montrent l'évolution



## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

du débit de copeau théorique en fonction de la profondeur de la poche à usiner et du jerk maximal de la machine. Leur conclusion est que l'influence du jerk est sensible jusqu'à 100 m/s<sup>3</sup>. Au-delà le gain est plus faible [22].

Lavernhe Sylvain (2006) 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 [23].

[M Sharif addin, (2007) 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 [24].

Dong-Been Tae (2007) 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 [25].

Mud-Armeen Munlin (2004), 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 [26].

### **I.5.2 Génération de trajectoire d'outil**

Durant ces deux dernières décennies, les travaux de recherche dans le domaine de l'usinage à commande numérique de surfaces gauches ont été très prolifiques. Nous mentionneront entre autres les contributions d'ordre général ou de synthèse réservées à l'usinage NC de surfaces sculptées poches, les travaux dédiés spécifiquement aux méthodes et techniques de génération de trajectoires d'outils pour les surfaces sculptées.

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

John C. J. Chiou (2007) 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 [27].

Xujing Yang, (2010) 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[28].

J, XIA et Q. J. GE (2001) 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 [29].

Chih-Hsing Chu(2006) 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 [30].

Chu A My (2009) 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 [31].

Yun Jae-Deuk, (2009) 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 [32].

C. Lartigue et al (2001) 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

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

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'usage trois axes. Il a d'abord interpolé les points de rupture qui sont générés avec une courbe planaire 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 [33].

D.K. Pratihari et al (2005) 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 [34].

Chih-Ching Lo [Lo, 2000] propose une méthode d'usinage des surfaces gauches avec deux outils sphériques de diamètres différents. Le premier outil, de plus grand diamètre, est choisi pour enlever un maximum de matière possible. Par la suite, le deuxième outil de diamètre moins important que le premier est choisi pour usiner les zones non usinées par le premier. La détermination des diamètres des deux outils dépend des courbures de la surface à usiner. Le choix du diamètre du deuxième outil est facile à déterminer et dépend du diamètre de la plus petite zone non usinée. La difficulté rencontrée avec cette méthode est la définition du diamètre du premier outil [35].

Lai et al. [Lai and Sorem, 2000] se sont intéressés au choix de l'outil à diamètre maximum pour l'usinage de poches. Ce choix est basé sur un critère purement géométrique appelé largeur de passe. Le diamètre de l'outil doit être égal à la largeur minimum de la passe de la poche [36].

Raphaël Laguionie, (2007), 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[37].

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

Manocher Djassemi (1998), Ce travail présente l'application de la programmation paramétrique pour l'usinage CNC. Comme l'un des traits moins fréquemment utilisés 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 illustrées [38].

Hongbin Liang (2009), 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[39].

Cab-sang Ryu (2002), Ce travail décrit le développement d'un développeur généralisé de post-processeur CNC qui peut produire des post-processeurs 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 [40].

### **I.5.3 Les techniques d'optimisations**

L'optimisation des régimes de coupe pour l'usinage des pièces formes complexes a consisté à chercher les valeurs optimales des paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, les stratégies, etc.), en tenant compte d'un ou de plusieurs critères (le coût de production le temps de production, la productivité, la précision d'usinage, etc.).

Il a été prouvé que la détermination l'optimisation des paramètres de coupe peut améliorer les résultats d'usinage pour atteindre un rendement élevé et minimiser les coûts d'usinage. Dans diverses publications et articles, des scientifiques et des chercheurs ont adapté plusieurs systèmes d'intelligence artificielle. Méthodes hybrides (AI) ou hybrides d'optimisation de la trajectoire de l'outil, telles que les algorithmes génétiques (GA), les Réseau neurones artificiels (RNA), Systèmes Immunitaires Artificiels (AIS), l'optimisation par colonies de

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

fourmis (ACO) et essaim de particules optimisation (PSO). Cette étude présente une revue des recherches en optimisation de parcours d'outils avec différents types d'IA méthodes qui montrent la possibilité d'utiliser différents types de méthodes d'optimisation dans le processus d'usinage CNC. Dans notre travail de recherche nous nous intéresserons aux le réseau neurones artificiels

### **I.5.3.1 Algorithmes génétiques GA**

Les algorithmes génétiques (GA) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation). Ils tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel [41,42]. Le concept d'algorithme génétique a été proposé par (John Holland (1975) pour décrie les systèmes adaptatifs. Par la suite, l'ouvrage (Goldberg (1989)) a fortement participé à leur diffusion [43]. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle et de la génétique dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin. Dans un environnement, les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître [44]. Par exemple, la formulation du problème qui utilise Travel Salesman Problem (TSP) peut être résolue par l'AG. Le TSP est un problème dur non déterministe du temps polynomial (NP) et l'un des problèmes d'optimisation combinatoire les plus largement étudiés (Langevin et al., 1990; Laporte, 1992).

### **I.5.3.2 Optimisation par essaim de particules PSO**

L'optimisation par essaim de particules ("Particle Swarm Optimization", PSO) est un méta heuristique d'optimisation, inventée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995[45].

La PSO est une technique d'optimisation basée sur le comportement d'un essaim d'insectes tels que fourmis, abeilles ou une volée d'oiseaux proposée à l'origine par Kennedy et Eberhart (1995). Dans PSO, chaque solution potentielle se voit attribuer une rapidité randomisée appelée particules qui survolent un hyperespace [47]. PSO est une technique évolutive similaire à GA car les deux sont basés sur la population et sont également affectifs. De nombreuses études ont utilisé avec succès PSO et ses variantes pour optimiser les paramètres de processus de plusieurs processus de fabrication tels que forage, soudage et tournage [48,49]

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

### **I.5.3.3 Optimisation des colonies de fourmis(ACO) :**

Les ACO résultent de recherches basées sur des approches d'intelligence informatique utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. L'ACO est stimulé par le comportement alimentaire des fourmis et leur aptitude naturelle à trouver le chemin le plus court entre une source de nourriture et leur nid [49,50]. Cette caractéristique des véritables colonies de fourmis est exploitée dans les algorithmes ACO dans les techniques récentes d'optimisation approximative. Cependant, ACO est l'une des plus récentes techniques de méta-heuristique. Le nombre des applications ACO couvrent un large domaine, comme les problèmes industriels, multi-objectifs et bioinformatiques [51,52]

### **I.5.3.4 Réseaux de neurones artificiels (RNA)**

Un réseau de neurones est constitué de cellules (ou neurones), connectée entre elles par des liaisons affectées de poids. Ces liaisons permettent à chaque cellule de disposer d'un canal pour envoyer et recevoir des signaux en provenance d'autres cellules du réseau. Chacune de ces connexions reçoit un poids (une pondération), qui détermine son impact sur les cellules qu'elle connecte. Chaque cellule dispose ainsi d'une entrée, qui lui permet de recevoir de l'information d'autres cellules, mais aussi de ce que l'on appelle une fonction d'activation. , par exemple la reconnaissance de formes, les prévisions et la compression de données [52,53, 54].

Une synthèse sur les techniques évolutionnaire, à savoir algorithme génétique (GA) essaim de particules (PSO), l'optimisation par colonies de fourmis (ACO) et réseaux de neurones artificiel (ANN) pour l'optimisation des régimes de coupe sera présentée

Le travail développé par Franci Cus, Joze Balic (2003), détermine les paramètres d'usinage optimaux qui minimisent le coût, le temps et la qualité d'un produit final en fraisage par les algorithmes génétiques. Les résultats expérimentaux de l'approche proposée sont comparés avec les résultats tirés de la littérature récente : l'algorithme du recuit simulé et les approches de programmation linéaire. L'algorithme génétique prouve son efficacité et peut être intégré dans un système de fabrication intelligent pour résoudre des problèmes d'optimisation des usinages complexes [55].

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

### *d'optimisations*

L'article de Ramon Quiza Sardiñas et al (2006) présente une technique d'optimisation multi-objectif basée sur l'algorithme génétique afin de déterminer les paramètres de coupe (la profondeur de coupe, l'avance et la vitesse de coupe) en processus de tournage et d'optimiser simultanément la durée de vie de l'outil et le temps de fonctionnement qui sont deux objectifs contradictoires [56].

M. Assas et al (2005) , introduisent une technique d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour résoudre le problème d'optimisation des conditions de coupe, afin de minimiser le temps et le coût de production simultanément, appliquée sur une opération de tournage. Les résultats montrent une nette amélioration des coûts de production et du temps par rapport à la méthode du gradient GM et l'algorithme génétique GA [57].

Liang Gao et al (2012), proposent dans leur article une nouvelle méthode basée sur l'optimisation par essaim de particules cellulaire (CPSO) pour résoudre le problème d'optimisation des paramètres de coupe (la profondeur de coupe, l'avance et la vitesse de coupe) du processus de fraisage multi-passe. L'objectif est de minimiser le temps total de production. Les résultats d'un cas d'application illustrent l'efficacité de l'approche proposée que la plupart des variantes de(PSO) [58].

Dans le travail de K. Vijayakumar et al (2003), les auteurs ont proposés une nouvelle technique d'optimisation basée sur l'algorithme de colonies de fourmis (ACO) pour résoudre des problèmes d'optimisation multi-passe en tournage. Les paramètres d'usinage sont déterminés en minimisant le coût de production, soumis à diverses contraintes d'usinage. Les résultats de calcul montrent une diminution de coût d'usinage, en les comparants avec la méthode génétique et celle du recuit simulée [59].

Dans la recherche de J.Wu, Y.Yao (2008), la technique méta-heuristique, basée sur l'algorithme de colonies de fourmis (ACO) modifiée en continu (MCACO), a été proposée pour trouver les paramètres optimaux d'usinage en tournage multi-passe, telles que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe afin de minimiser le coût de production unitaire. D'après les résultats de l'expérimentation, il a été constaté que la technique proposée améliore le coût unitaire de production par rapport aux autres méthodes (flottant codé GA(FEGA), (SA), méthode des courses de côtes (HC) et de Newton (NM)) [60].

## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

F.Cüset al (2009), utilisent l'optimisation (ACO) en tournage multi-passe. Dans cette étude, les performances d'usinage modélisées sont le temps de fabrication, la qualité de coupe et le coût de production. L'approche proposée utilise le système adaptatif d'inférence neuro-floue (ANFIS) pour obtenir la fonction objectif, et un algorithme (ACO) pour obtenir la valeur optimale objectif. De l'expérience, il a été constaté que le projet de l'approche ANFIS-ACO surpasse les (GA) et (SA) [61].

Alavandar and Nigam (2008), Développé une approche basée sur Neuro-Fuzzy pour la solution de la cinématique inverse des manipulateurs de robots industriels. Le résultat des variables communes qui achèvent à une position des effecteurs terminaux du robot appelés cinématique inverse est l'un des problèmes les plus importants dans la cinématique et le contrôle des robots. Dans ce travail, en utilisant la capacité d'ANFIS (Système d'Inférence Adaptative Neuro-Fuzzy) pour apprendre des données d'apprentissage, il est possible de créer ANFIS, une implémentation d'un système d'inférence floue représentative utilisant une structure de réseau de neurones représentation du système. Des simulations informatiques effectuées sur 2 robots manipulateurs DOF et 3DOF montrent l'efficacité de l'approche [62].

Guez and Ahmad (1990), Proposer une solution des problèmes de la cinématique inverse des robots a base réseau neuronal, Guez trouver que le réseau de neurones peut être formé pour générer une solution assez précise qui, augmentée de méthodes cinématiques inverses différentielles, réduira la charge de traitement de chaque cycle de contrôle et permettra ainsi un contrôle en temps réel du robot. L'algorithme de propagation inverse simulant un perceptron à trois couches a été utilisé pour résoudre ce problème.

La non-linéarité sigmoïdale symétrique a été utilisée. Le taux d'apprentissage et le terme de momentum ont supposé les valeurs de 0,1 et 0,4 respectivement, tout au long des différentes simulations décrites ci-dessous. Les sorties désirées ont également été normalisées entre -0,9 et +0,9. L'erreur moyenne est inférieure à 0,01 radian alors que l'erreur maximale est de 0,25 radian [63].

Karlik & Aydinb developed (2000), Proposer une approche pour améliorer la solution des problèmes de cinématique inverse pour manipulateur de robot. Cette approche basée à la structurée de réseau neuronal artificiel (ANN) a été proposée ici pour contrôler le mouvement d'un robot manipulateur. De nombreux modèles de réseaux neuronaux utilisent



## **Chapitre I** *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques d'optimisations*

des unités de seuil avec des fonctions de transfert sigmoïde et des règles d'apprentissage de type descente de gradient. Les équations d'apprentissage utilisées sont celles de l'algorithme de propagation arrière. Dans ce travail, la solution de la cinématique d'un manipulateur de robot à six degrés de liberté est mise en œuvre en utilisant ANN. Un programme informatique approprié a été développé dans le langage Borland C++ pour les architectures RNA considérées dans cette étude. Les itérations ont été effectuées sur un ordinateur PC P-90 et 6000 itérations ont été utilisées ANN [64].

Npyen., et.al(1990), Dans ce travail, diverses architectures de réseaux neuronaux sont utilisées pour résoudre le problème de la cinématique directe en robotique. Son but est d'identifier les avantages et les inconvénients de chaque architecture dans cette application robotique. Tous les résultats ont été obtenus par simulation sur un poste de travail SUN 3/60. Les réseaux ont été formés avec un ensemble de 64 entrées / sorties désirées recueillies à partir des mesures. Tous les poids des réseaux ont été initialisés au hasard de -0,5 à +0,5. Dans la couche de sortie de ce réseau, tous les poids ont été initialisés à zéro. Ceci afin d'éviter le cas où un minimum local prédomine lorsque le processus de formation est démarré. Le processus de formation a été arrêté lorsque l'erreur moyenne était inférieure à 10% [65].

Dans les tableaux ci-dessous nous présentons quelques états de l'art réalisés par Khashayar Danesh Narooei et Rizauddin Ramli [66].

## Chapitre I *Etat de l'art sur l'évolution des machines 5 axes et des techniques*

*d'optimisations*

Tableau I.4 : Indique les méthodes d'optimisation utilisées pour améliorer les facteurs d'usinage lors de recherches précédentes

Auteurs/Année				
	GA	ANN	ACO	PSO
Chen and Tseng (1996)	✓			
Dereli et al. (2001)	✓			
Balic and Korosec (2002)		✓		
Zuperl and Cus (2003)		✓		
Cus and Balic (2003)	✓			
Castelino et al. (2003)	✓			
Onwubolu and Clerc (2004)				✓
Zuperl et al. (2004)		✓		
Agrawal et al. (2006)	✓			
Qudeiri et al. (2006)	✓			
Oysu and Bingul (2007)	✓			
Oysu and Bingul (2009)	✓			
Junmei and Gaohua (2009)				✓
Jing and Yingxue (2008)			✓	
Alavandar and Nigam (2008).		✓		
Guez and Ahmad (1990)		✓		
Karlik & Aydinb developed (2000)		✓		
K. Vijayakumar et al (2003)			✓	

## **I.6 Conclusion :**

L'étude bibliographique montre que la communauté scientifique en est à un stade avancé en ce qui concerne la génération et des méthodes d'optimisation des comportements de la machine 5 axes. Que ce soit pour les modélisation géométrique et cinématiques, il existe de nombreuses solutions plus ou moins aisées à mettre en œuvre permettant d'usiner une surface complexe avec la qualité choisie.

Une grande partie des travaux se concentre maintenant sur une utilisation optimale des capacités cinématiques des machines dans le but de minimiser le temps d'usinage. Ils nécessitent des modélisations complexes de la machine et de la commande numérique qui peuvent être difficiles à mettre en œuvre.

D'autres auteurs travaillant sur les méthodes l'optimisation des inverses cinématiques partent directement du constat que les positions et orientation de l'outil de coup lors de l'usinage UGV émergente de la stratégie trochoïdal. Cette méthode permet de diminuer le temps d'usinage tout en améliorant le comportement cinématique de la machine.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons à l'influence du choix de la machine 5 axes sur l'usinage des pièces complexes. Le plus souvent les techniques d'optimisation. Nous allons donc chercher à intégrer les caractéristiques cinématiques de la machine dans le choix la stratégie d'usinage. Néanmoins, le comportement de la MOCN en usinage 5 axes est difficile à prévoir. Il est donc nécessaire de modéliser le moyen de production pour permettre l'étude de l'impact du notre méthode d'optimisation sur le développement de l'usinage. Cette modélisation est présentée dans le chapitre suivant.

*Chapitre :*  
*II*

*Modélisation de la  
machines CNC à 5 axes*

## II.1 Introduction

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre I, nos travaux concernent la prédiction en vue d'améliorer des performances des machines-outils en termes de précision de position et rotation de l'outil dans le but de produire des pièces conformes à la qualité requise.

Ce chapitre va détailler les techniques de la modélisation géométrique et cinématique de la machine-outil 5 axes. Nous nous intéressons dans ce travail de thèse aux manipulateurs à architecture arborescente.

## II.2 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 la 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 II.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) [67].



Figure II.1 : Relation entre les espaces articulaires et opérationnels

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.

Afin de caractériser ce modèle géométrique, nous introduisons dans la suite une méthode classique permettant de traiter les translations et les rotations dans un formalisme unifié via la représentation sous forme de matrice homogène.

### II.2.1 Transformation homogène

Soit ( ${}^iP_x$ ,  ${}^iP_y$ ,  ${}^iP_z$ ) les coordonnées cartésiennes d'un point P arbitraire, mesurer dans le repère  $R_i$  ( $O_i$ ;  $x_i$ ;  $y_i$ ;  $z_i$ ), Les coordonnées homogène du point P sont ( $w.{}^iP_x$ ,  $w.{}^iP_y$ ,  $w.{}^iP_z$ ,  $w$ ) ou  $w$  est le facteur d'échelle, dans la robotique  $w = 1$ . Les coordonnées homogènes du point P sont représentées par le vecteur colonne :

$${}^iP = \begin{bmatrix} {}^iP_x \\ {}^iP_y \\ {}^iP_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Les coordonnées homogènes d'un plan Q de l'équation :

$${}^i\alpha x + {}^i\beta y + {}^i\gamma z + {}^i\delta = 0 \quad (\text{II.2})$$

Exprimé selon le repère  $R_i$ , sont données le vecteur ligne :

$${}^iQ = [{}^i\alpha \quad {}^i\beta \quad {}^i\gamma \quad {}^i\delta] \quad (\text{II.3})$$

Si un point P appartient à un plan Q, le produit matriciel  ${}^iQ.{}^iP$  est nul :

$${}^iQ.{}^iP = [{}^i\alpha \quad {}^i\beta \quad {}^i\gamma \quad {}^i\delta].{}^iP = \begin{bmatrix} {}^iP_x \\ {}^iP_y \\ {}^iP_z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{II.4})$$

La transformation (translation et /ou rotation) d'un repère  $R_i$  est représentée par la matrice de transformation homogène  ${}^iT_j$  de dimension  $(4 \times 4)$  où :

$${}^iT_j = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Où,  ${}^i s_j, {}^i n_j, {}^i a_j$  contiennent les composant des vecteurs unitaires suivant  $x_j, y_j$  et  $z_j$  respectivement du repère  $R_j$  exprimées dans le repère  $R_i$  et  ${}^i P_j$  représente les coordonnées de l'origine  $O_j$  de repère  $R_j$ .

On peut dire également que la matrice  ${}^i T_j$  définit le repère  $R_j$  dans le repère  $R_i$ .

La matrice de transformation s'écrit aussi sous la forme :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i P_j \\ & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Finalement, la matrice de transformation  ${}^i T_j$ , est considérée comme la représentation du repère  $R_j$  dans le repère  $R_i$ .

Permet le passage du repère  $R_i$  au repère  $R_j$ .

Soit **Trans** ( $a, b, c$ ) la transformation la transformation d'une translation où  $a, b$ , et  $c$  sont les transformations le long des axes  $x, y$  et  $z$  respectivement. Quand l'orientation est conservée, la matrice de transformation de cette translation a la forme suivante :

$${}^i T_j = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

La notation **Trans** ( $u, d$ ) indique la translation d'une valeur  $d$  le long de l'axe  $\mathbf{u}$ . Ainsi la matrice **Trans** ( $a, b, c$ ) peut être décomposée en produit de trois matrice **Trans**( $x, a$ )**Trans**( $y, b$ )**Trans**( $z, c$ ).

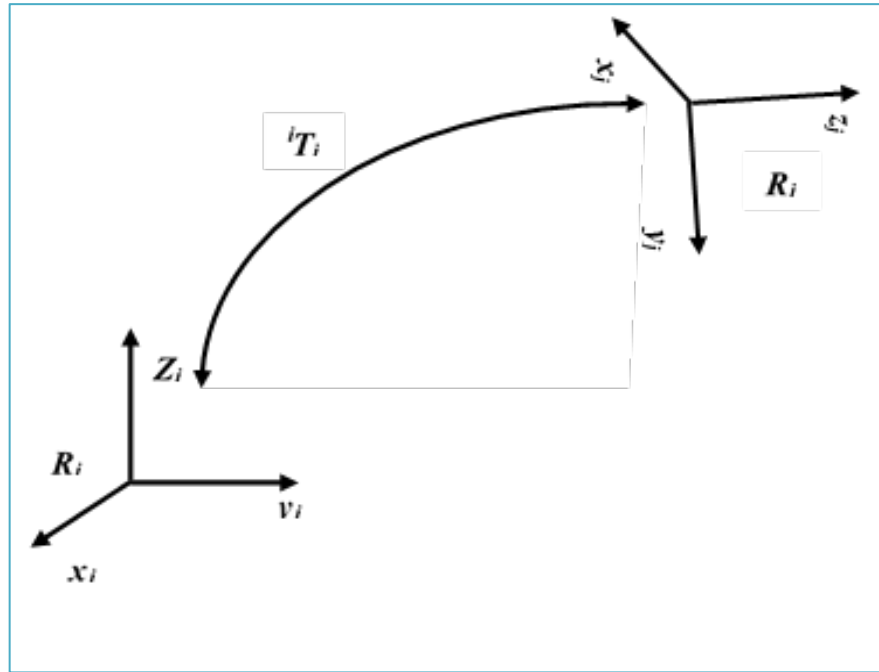


Figure II.2 Transformation de repère

Par n'importe quel ordre de multiplication.

Soit  $Rot(x, \theta)$  la transformation correspondante à une rotation pure d'angle  $\theta$  autour de l'axes x, la matrice de transformation de cette rotation s'écrit :

$${}^i T_j = Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rot(x, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Où,  $rot(x, \theta)$  désignant la matrice d'orientation de dimension  $(3 \times 3)$ .

De même façon on définit les matrice de transformation des rotations autour des axes y et z .

$${}^i T_j = Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rot(y, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.9)$$



$${}^i T_j = Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ rot(z, \theta) 0 \\ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

## II.2.2 Paramètre Denavit & Hartenberg

Plusieurs conventions sont possibles pour définir la position relative de repères successifs. La convention de Denavit & Hartenberg (H-D) est la plus fréquemment utilisée. Cette convention utilise quatre paramètres, deux angles et deux distances [68,69]. Les Paramètre Denavit & Hartenberg permettent de disposer d'un paramétrage des liaisons tel que les matrices de passage aient toutes la même forme littérale, ce qui facilite les calculs. La méthode qui suit s'applique lorsque la machine-outil correspond à une chaîne simple ouverte et que ses articulations sont rotoïdes, ou prismatiques (ce qui est le cas en général). Les corps constituant le robot sont supposés parfaitement rigides et connectés par des articulations idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité).

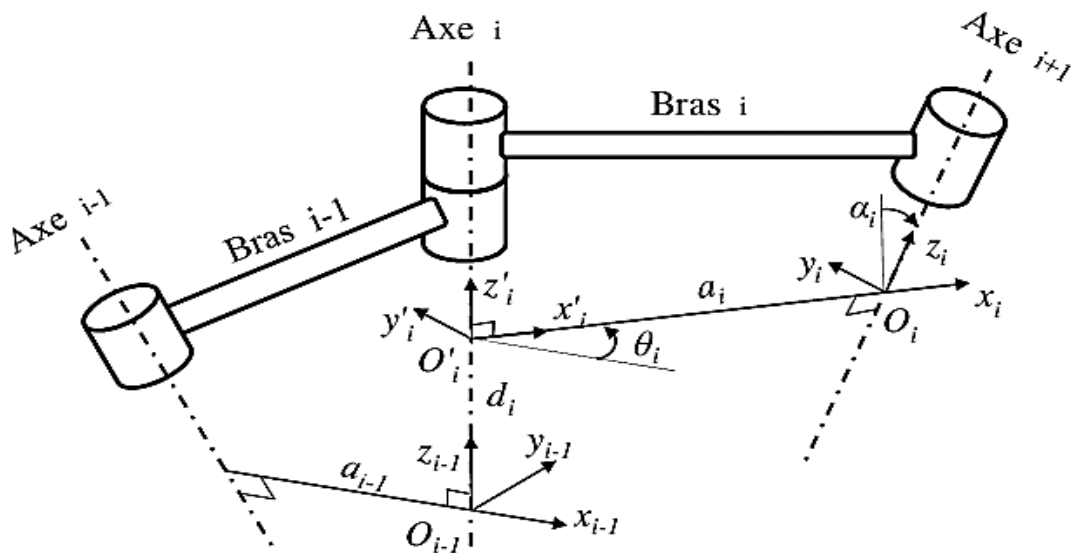


Figure II.3 : Paramètres de Denavit & Hartenberg

Comme illustre dans la Figure II.3, l'axe  $i$  relie le bras  $i-1$  et le bras  $i$ . La convention DH permet de définir le repère  $R_i$  par un nombre minimum de paramètres comme suit :

- l'axe  $z_i$  est porte par l'axe de rotation de l'articulation  $i+1$ ,
- l'origine  $O_i$  est l'intersection de l'axe  $z_i$  et de la normale commune aux axes  $z_{i-1}$  et  $z_i$

Le point  $O_i'$  est issu de l'intersection de cette normale commune et de l'axe  $z_{i-1}$ ,

- l'axe  $x_i$  est porte par la normale commune aux axes  $z_{i-1}$  et  $z_i$  dans la direction de l'articulation  $i$  vers l'articulation  $i+1$ .
- l'axe  $y_i$  est défini  $i$  pour avoir un repère orthonormé direct.

La convention DH ne donne pas une définition unique du repère d'une articulation dans les cas suivants :

- pour le repère  $R_0$ , seule la direction de l'axe  $z_0$  est spécifiée, puis  $O_0$  et  $x_0$  peuvent être arbitrairement choisis, lorsque deux axes consécutifs sont parallèles, la normale commune entre eux n'est pas définie de façon unique, lorsque deux axes consécutifs se croisent, la direction de  $x_i$  est arbitraire.

Une fois que ces repères sont établis, la position et l'orientation d'un repère  $R_i$  par rapport à un repère  $R_{i-1}$  est entièrement définie par les paramètres suivants :

- La longueur de bras entre  $O_i$  et  $O_{i-1}$ , notée par  $a_i$ ,
- La torsion de bras, qui est l'angle de rotation entre les axes  $\overline{z_{i-1}}$  et  $\overline{z_i}$  autour de l'axe  $x_i$  note par  $\alpha_i$ .
- $d_i$ , la coordonnée de  $O_i$ , selon la direction  $z_{i-1}$ .
- $\theta_i$ , l'angle de rotation entre les axes  $\overline{x_{i-1}}$  et  $\overline{x_i}$  autour de l'axe  $\overline{z_{i-1}}$ .

Les paramètres  $a_i$  et  $\alpha_i$  sont toujours constants. Ils dépendent uniquement de la géométrie de la connexion entre les articulations consécutives.

À ce stade, la transformation des coordonnées entre  $R_i$  et  $R_{i-1}$  peut être exprimée par deux rotations et deux translations, comme suit :

$$T_i^{i-1} = Rot(z_{i-1}, \theta_i) \times Trans(z_{i-1}, d_i) \times Trans(x_i, a_i) \times Rot(x_i, \alpha_i) \quad (II.11)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation du repère  $R_{i-1}$  au repère  $R_i$  est une fonction seulement de l'angle de rotation  $\theta_i$  puisque les paramètres géométriques  $\alpha_i$ ,  $a_i$  et  $d_i$  sont constants. Ainsi, la matrice de transformation homogène est donnée par :

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

### II.2.3 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 (Ro/ Rn) et exprimé en fonction des coordonnées articulaires.

Le MGD exprime la configuration ou pose d'outil  $X(x,y,z,i,j,k)$  dans le repère pièce en fonction de la configuration articulaires  $q$  commandées et des paramètres géométriques décrivant la structure [14,70] .

$$X = f(q) \quad (\text{II.13})$$

Où  $q = (q_1, \dots, q_n)^T$  est le vecteur des coordonnées articulaires et  $X = (x, y, z, O_i, O_j, O_k)$  est le vecteur des coordonnées cartésiennes (position et orientation) de l'organe terminal dans le repère d'outil (T).

Pour une chaîne cinématique ouverte simple le MGD est défini par la matrice de transformation  ${}^i T_j$

$${}^1 T_n = {}^1 T_2(q_2) {}^2 T_3(q_3) \cdots {}^{n-1} T_n(q_n) \quad (\text{II.14})$$

La solution du MGD peut être trouvée par plusieurs méthodes mathématiques. Dans notre étude nous avons opté pour la méthode Denavit-Hartenberg (D-H) pour obtenir la MGD d'une machine CNC à 5 axes.

## II.2.4 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.

« MGI exprime la configuration articulaires  $q$  commandées en fonction de la pose d'outil  $X(x, y, z, O_i, O_j, O_k)$  dans le repère pièce et paramétré géométrique décrivant la structure »

$$q = f^{-1}(X) \quad (\text{II.15})$$

La solution de ce problème est d'une importance fondamentale dans le but de transformer les spécifications de mouvement attribuées à l'effecteur dans l'espace opérationnel, aux mouvements correspondant dans l'espace articulaire qui permettent l'exécution du mouvement désiré.

Il n'existe pas de méthode systématique d'inversion du modèle géométrique. La forme explicite, lorsqu'elle existe, de cette inversion exprimée analytiquement, donne un ensemble de solutions possibles au problème inverse. Elle constitue le modèle géométrique inverse

### II.2.4.1 Position du problème

Soit  ${}^i T_j$  la matrice de transformation homogène représentant la situation désirée du repère outil  $R_i$  par rapport au repère atelier  $R_j$ . Dans le cas général, on peut exprimer  ${}^i T_j$  sous la forme

$${}^i T_j^d = Z \cdot {}^0 T_n(q) E \quad (\text{II.16})$$

Le expression dans laquelle (figure II.4) :

- $\mathbf{Z}$  est la matrice de transformation définissant la situation du manipulateur (repère  $R_0$ ) dans le repère atelier ;
- ${}^0T_n$  est la matrice de transformation du repère terminal  $R_n$  dans le repère  $R_0$ , fonction du vecteur des variables articulaires  $\mathbf{q}$  ;
- $\mathbf{E}$  est la matrice de transformation définissant le repère outil  $R_E$  dans le repère terminal  $R_n$ .

Lorsque  $n \geq 6$ , on peut écrire la relation suivante en regroupant dans le membre de droite tous les termes connus :

$${}^0T_n(\mathbf{q}) = \mathbf{Z}^{-1} {}^i T_j^d \mathbf{E}^{-1} \quad (\text{II.17})$$

Lorsque  $n < 6$ , l'espace opérationnel du robot est de dimension inférieure à six. Il n'est pas possible de faire coïncider le repère outil  $R_j$  avec un repère  $R_j^d$  décrivant la tâche sauf lorsque les repères  $R_j$  et  $R_j^d$  sont conditionnés de façon bien particulière pour s'adapter au nombre insuffisant de degrés de liberté. Pratiquement, au lieu d'amener le repère  $R_j$  sur le repère  $R_j^d$ , on cherchera à faire coïncider entre eux des éléments géométriques liés à ces repères (points, droites).

Dans le calcul du MGI, trois cas se présentent :

- a) absence de solution lorsque la situation désirée est en dehors de la zone accessible du robot. Celle-ci est limitée par le nombre de degrés de liberté, les débattements articulaires et la dimension des segments ;

- b) infinité de solutions lorsque :

le robot est redondant vis-à-vis de la tâche ;

le robot se trouve dans certaines configurations singulières ;

- c) solutions en nombre fini, exprimées par un ensemble de vecteurs  $\{q^1, \dots, q^r\}$ . On dit qu'un robot manipulateur est résoluble [71,72] lorsqu'il est possible de calculer toutes les configurations permettant d'atteindre une situation donnée. Aujourd'hui, tous les manipulateurs série ayant jusqu'à six degrés de liberté et qui ne sont pas redondants peuvent être considérés comme résolubles [73,74]. Le nombre de solutions dépend de l'architecture du robot manipulateur.

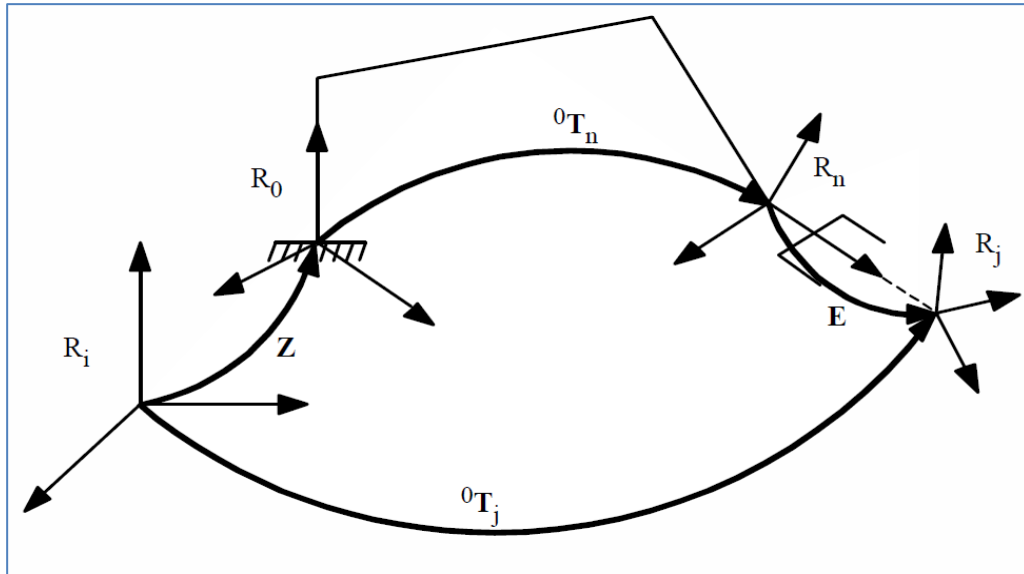


Figure II.4. Transformations entre l'organe terminal et le repère atelier.

#### II.2.4.2. Principe de la méthode de Paul

Considérons un robot manipulateur dont la matrice de transformation homogène a pour expression :

$${}^0T_n = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \quad (\text{II.18})$$

Soit  $U_0$  la situation désirée telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

On cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$U_0 = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \quad (\text{II.20})$$

Pour trouver les solutions de l'équation (20), Paul [75] a proposé une méthode qui consiste à pré multiplier successivement les deux membres de l'équation (20) par les matrices  ${}^jT_{j-1}$  pour  $j$  variant de 1 à  $n-1$ , opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche. Pour un robot à six degrés de liberté par exemple, on procède comme suit :

$${}^1T_0U_0 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (\text{II.21})$$

- multiplication à gauche de l'expression (21) par  ${}^1T_0$  :

Le terme de droite est fonction des variables  $q_2, \dots, q_6$ . Le terme de gauche n'est fonction que des éléments de  $U_0$  et de la variable  $q_1$  ;

- Identification terme à terme des deux membres de l'équation (21). On se ramène à un système d'une ou de deux équations fonction de  $q_1$  uniquement, dont la structure appartient à un type particulier parmi une dizaine de types possibles ;

- multiplication à gauche de l'expression (21) par  ${}^2T_1$  et calcul de  $q_2$ .

La succession des équations permettant le calcul de tous les  $q_j$  est la suivante :

$$\begin{aligned} U_0 &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \\ {}^0T_1U_0 &= {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \\ {}^1T_2 {}^0T_1U_0 &= {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \\ {}^2T_3 {}^1T_2 {}^0T_1U_0 &= {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \\ {}^3T_4 {}^2T_3 {}^1T_2 {}^0T_1U_0 &= {}^4T_5 {}^5T_6 \\ {}^4T_5 {}^3T_4 {}^2T_3 {}^1T_2 {}^0T_1U_0 &= {}^5T_6 \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

Les éléments des deuxièmes membres ayant déjà été calculés lors du calcul du MGD :

$$U_j = {}^jT_6 = {}^jT_{j-1}U_{j-1}$$

L'utilisation de la méthode sur un grand nombre de machine-outil (comme des robots) industriels a permis de constater que les types d'équations rencontrés sont peu nombreux et que leur résolution même si elle nécessite parfois quelques développements reste cependant relativement simple [76].

## II.3 Modélisation cinématique

### II.3.1 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.

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

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (\text{II.23})$$

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

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} V_n \\ w_n \end{bmatrix} \in R^6, J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} \in R^{6 \times n}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Où,  $V_n$  et  $w_n$  sont les vitesses angulaire et linéaire du repère  $R_n$  respectivement.

La vitesse  $\dot{q}_k$  de l'articulation  $k$  produit une vitesse linéaire ( $V_{k,n}$ ) et une vitesse angulaire  $w_{k,n}$  sur le repère terminal  $R_n$ . Deux cas se présentent :

Si l'articulation  $k$  est prismatique ( $\sigma_k = 1$ , figure II.4) :

$$\begin{cases} V_{k,n} = a_k \dot{q}_k \\ w_{k,n} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Où,  $a_k$  est le vecteur unitaire par l'axe  $z_k$  de l'articulation  $k$



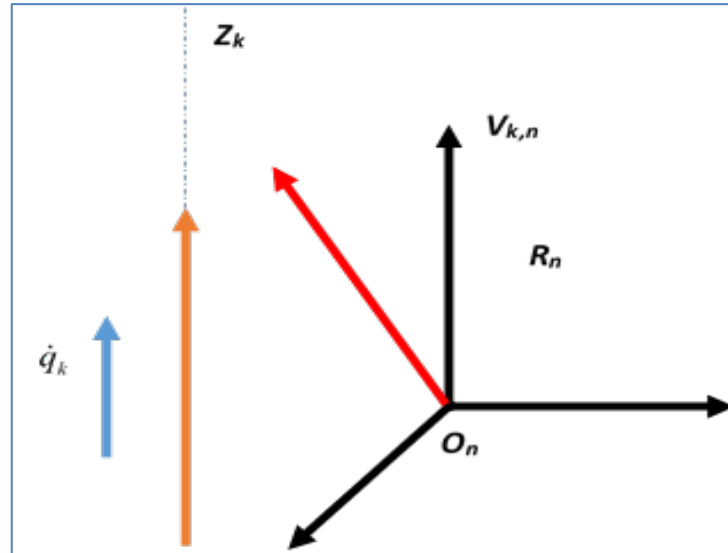


Figure II.5 : Cas d'articulation prismatique

Si l'articulation  $k$  est rotoïde ( $\sigma_k = 0$ , figure II.5)

$$\begin{cases} V_{k,n} = a_k \dot{q}_k \times L_{k,n} = (a_k \times L_{k,n}) \dot{q}_k \\ w_{k,n} = a_k \dot{q}_k \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Le terme  $L_{k,n}$  désigne le vecteur  $\overrightarrow{O_k O_n}$ .

De façon générale, les vecteurs  $V_{k,n}$  et  $w_{k,n}$  s'écrivent sous la forme :

$$\begin{cases} V_{k,n} = [\sigma_k a_k + \bar{\sigma}_k (a_k \times L_{k,n})] \dot{q}_k \\ w_{k,n} = \bar{\sigma}_k a_k \dot{q}_k \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

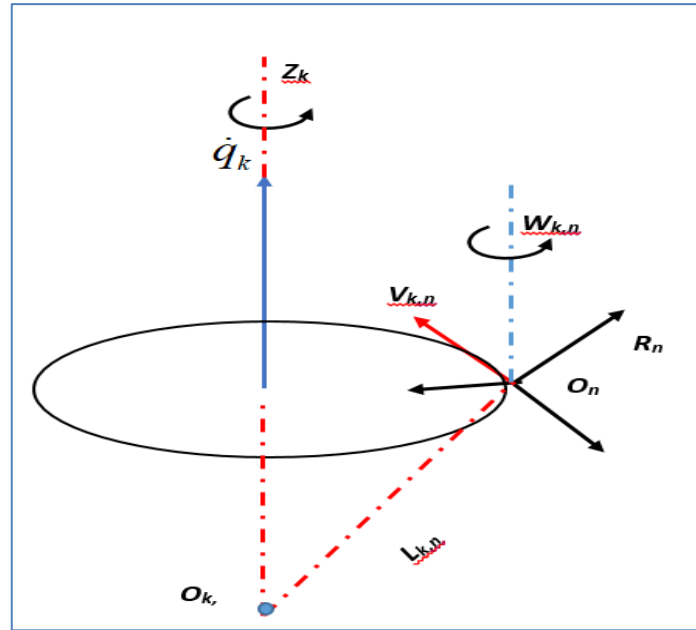


Figure II.5 : Cas d'articulation rotoïde

Les vitesses linéaires et angulaires de l'organe terminal peuvent être écrites comme :

$$\begin{cases} V_n = \sum_{k=1}^n V_{k,n} = \sum_{k=1}^n [\sigma_k a_k + \bar{\sigma}_k (a_k \times L_{k,n})] \dot{q}_k \\ w_n = \sum_{k=1}^n w_{k,n} = \sum_{k=1}^n \bar{\sigma}_k a_k \dot{q}_k \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

L'écriture de l'équation (II.30) sous forme d'une matrice en utilisant l'équation (II.19), donne :

$$J_n = \begin{bmatrix} \sigma_1 a_1 + \bar{\sigma}_1 (a_1 \times L_{1,n}) & \cdots & \sigma_n a_n + \bar{\sigma}_n (a_n \times L_{n,n}) \\ \sigma_1 a_1 & \cdots & \sigma_n a_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Se référant les vecteurs de  $J_n$  par rapport au repère  $R_i$ , on obtient la matrice jacobienne  ${}^i J_n$ , telle que :

$${}^i \begin{bmatrix} V_n \\ w_n \end{bmatrix} = {}^i J_n \dot{q} \quad (\text{II.30})$$

En général, on calcul  $V_n$  et  $w_n$  dans  $R_n$  et  $R_0$ , la matrice jacobienne correspondante est  ${}^n J_n$  ou  ${}^0 J_n$  respectivement. Ces matrices peuvent être aussi calculées en utilisant une matrice  ${}^i J_n$ ,

$j=0, \dots, n$ , grâce à l'expression suivante :

$${}^s J_n = \begin{bmatrix} {}^s T_i & O_3 \\ O_3 & {}^s T_i \end{bmatrix} {}^i J_n \quad (\text{II.31})$$

Où  ${}^s T_i$  est la matrice d'orientation du repère  $R_i$  dans  $R_s$ . En général on obtient la matrice simple  ${}^i J_n$

lorsqu'on prend  $i = \text{entier } (n/2)$ . On note que les matrices  ${}^i J_n$  ayant les mêmes positions singulières.

### Calcul de la matrice ${}^i J_n$

Le produit  $a_k \times K_{k,n}$  peut être calculé par  $\hat{a}_k L_{k,n}$ , la  $K^{\text{ime}}$  colonne de la matrice  ${}^i J_n$  notée par  ${}^i J_{n:k}$  devienne :

$${}^i J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^i a_k + \bar{\sigma}_k {}^i A_k {}^k \hat{a}_k {}^k L_{k,n} \\ \bar{\sigma}_k {}^i a_k \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

on pose  ${}^k a_k = [0 \ 0 \ 1]^T$  et  ${}^k L_{k,n} = {}^k P_n$ , donc on obtient :

$${}^i J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^i a_k + \bar{\sigma}_k (-{}^k P_{n_y} {}^i s_k + {}^k P_{n_x} {}^i n_k) \\ \bar{\sigma}_k {}^i a_k \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

où  ${}^k P_{n_y}$  et  ${}^k P_{n_x}$  sont les composants du vecteurs  ${}^k P_n$ . A partir de cette expression, la  $K^{\text{ime}}$  colonne de la matrice  ${}^i J_n$  est :

$${}^i J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^i a_k + \bar{\sigma}_k {}^i \hat{a}_k ({}^i P_n - {}^i P_k) \\ \bar{\sigma}_k {}^i a_k \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

qui donne pour  $i=0$

$${}^0 J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^0 a_k + \bar{\sigma}_k {}^0 \hat{a}_k ({}^0 P_n - {}^0 P_k) \\ \bar{\sigma}_k {}^0 a_k \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

dans ce cas on est besoin de calculer les matrices  ${}^0 T_k$  pour  $k=1, \dots, n$ .

### II.3.1.2 Forme de la matrice jacobienne de la machine CNC 5 axes

Selon l'équation (II, 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  $q$  à partir du modèle CD des manipulateurs :

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial q_n} \end{bmatrix} \in R^{6 \times n} \quad (\text{II.36})$$

Où  $n$  est le nombre de joints. Le modèle CD du manipulateur de la machine, est donné par l'équation (II.17).

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

$$q = \begin{bmatrix} C \\ A \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \in R^5, X = \begin{bmatrix} O \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_o(q) \\ f_p(q) \end{bmatrix} \in R^6 \quad \text{et} \quad P \in R^3 \quad (\text{II.37})$$

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

## II.3.3 MODELE CINEMATIQUE INVERSE

L'objectif du modèle cinématique inverse (MCI) des machines CNC à cinq axes est de calculer tous les ensembles possibles des vitesses articulaires  $(\dot{q})$  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. La modèle cinématique inverse, sont de calculer les vitesses des coordonnées articulaires  $(\dot{q})$ , en fonction des vitesses opérationnelles  $(\dot{X})$  il est noté :

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{X} \quad (\text{II.38})$$

Lorsque la matrice  $J$  a la forme suivante :

$$J = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B & C \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$A$  et  $C$  étant des matrices carrées inversibles, l'inverse de cette matrice s'écrit :

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} A^{-1} & 0 \\ -C^{-1}BA^{-1} & C^{-1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

La résolution du problème se ramène donc à l'inversion de deux matrices de dimension moindre. Lorsque le robot manipulateur possède six degrés de liberté et un poignet rotule, la forme générale de  $J$  est celle de la relation (II.18),  $A$  et  $C$  étant de dimension  $(3 \times 3)$ .

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différents modèles utilisés pour résoudre les problèmes cinématique inverse de la machine CNC 5 axes. L'étude des modèles cinématiques des structures mécaniques articulés qui ont été mené en vue d'élaborer les modèles géométriques et modèles mathématiques qui peuvent être mis en œuvre après avoir procédé à une identification des paramètres géométriques et inertiels. La méthode de Denavit & Hartenberg est utilisée pour réaliser la modélisation géométrique des machines-outils à 5 axes. Dans le chapitre suivant, présenté la génération des Trajectoires d'Outils.

*Chapitre :*  
*III*

*Génération des*  
*Trajectoires d'Outils*

### III.1 Introduction

Le processus de réalisation des pièces de forme complexes, de type moule ou matrices en fraisage multiaxes nécessite la construction de trajets d'usinage successifs et leur juxtaposition en fonction d'une stratégie d'usinage. La stratégie d'usinage regroupe les choix d'un mode de guidage (Zigzag, aller simple, spirale), d'un pas de discrétisation longitudinal (tolérance d'usinage) et d'un pas de discrétisation transversal (hauteur de crête). Le calcul d'un trajet d'outil est une opération géométrique qui exige l'intervention d'algorithmes de type géométrique. Alors, il est nécessaire d'exprimer toutes les contraintes du processus de calcul de trajet sous forme géométrique à savoir, l'allure du trajet, les défauts de forme, l'état de surface et la stratégie d'usinage, qui sont dites contraintes de conception. Dans ce chapitre nous allons présenter les types de trajets d'outils existants dans la littérature, et un état de l'art sur les stratégies d'usinage de cavités conventionnelles et nouvelles va faire l'objet de la suite dans cette partie.

### III.2 Caractéristiques d'un trajet d'outil

La méthode de calcul de la trajectoire d'outil consiste à travailler à partir de la définition mathématique de la surface, c'est-à-dire directement sur le modèle géométrique de la surface. Cette méthode forme un lien direct entre le modèle de la pièce conçue et les trajets d'usinage. La construction de ces trajets requiert (III.1) la connaissance d'une direction d'usinage, d'un pas transversal (radiale) et d'un pas longitudinal [78]

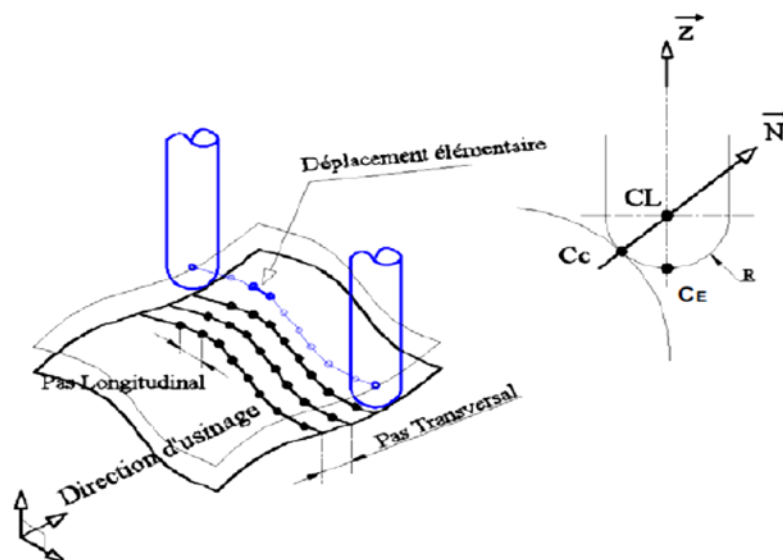


Figure III. 1 Génération de trajectoire

Le rôle de la commande numérique est de combiner les mouvements des axes de la machine de façon à reconstituer la trajectoire d'usinage programmée. L'élaboration de cette trajectoire est assurée par l'intermédiaire d'un calculateur d'interpolation, intégré au directeur de commande et qui respecte les consignes de vitesse. Les méthodes d'interpolation utilisées en commande numérique, pour décrire le profil d'une trajectoire relative d'un outil sont, l'interpolation linéaire 2D ou 3D, l'interpolation circulaire ou parabolique dans le plan ou dans l'espace, les interpolations en coordonnées polaires et cylindriques permettant des usinages particuliers tels que rainure de graissage par exemple et enfin, l'interpolation hélicoïdale permettant de réaliser des filetages, des taraudages des rainures de graissages. Dans le cas général, les trajets ne seront exprimés que sous forme de segments. Ainsi le pas longitudinal caractérise leur longueur et le pas transversal représente la distance radiale entre deux passes consécutives (Figure III. 2).

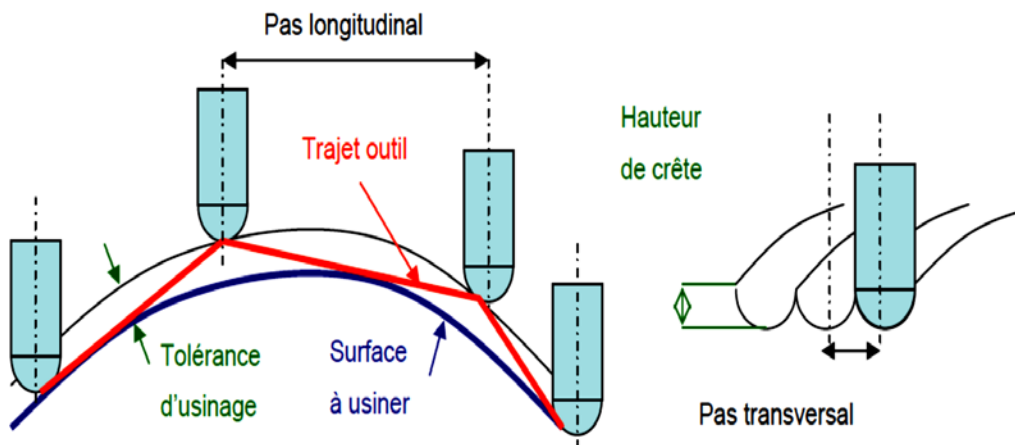


Figure III.2 Paramètres de la génération de trajectoire.

### III. 2.1 Calculs des trajectoires d'outils

Pour la génération de trajectoires de l'outil, il faut faire la différence entre l'aspect planification des trajectoires qui porte sur la topologie et l'agencement des différents parcours et de celui de la détermination des positions de l'outil par calcul exact. Le premier, s'articule sur la stratégie d'usinage à adopter, tandis que le deuxième, correspond à la mise en œuvre de cette dernière [78].

Tan et al [80] ont classés les différentes méthodes de calcul des trajets d'outils selon le type de modélisation utilisé, à savoir : filaire, surfacique ou volumique.



Pour les modèles surfaciques implémentés dans les systèmes de génération automatique des trajectoires auxquelles nous nous intéressons, on distingue deux approches :

La première consiste à calculer les points de contact outil/ pièce (CC) à partir du modèle CAO en respectant la planification adoptée, puis de calculer les points que doit décrire le point de contrôle de l'outil (CL) qui forment la trajectoire de l'outil Figure. III. 3. La mise en œuvre de cette méthode est implémentée grâce à des algorithmes de calculs itératifs [81, 82].

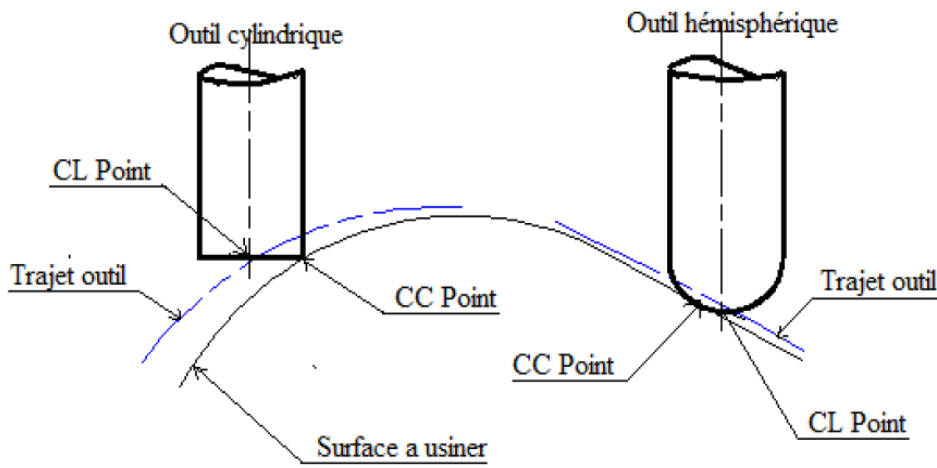


Figure III. 3 Points de contact outil/pièce et points de contrôle outil

Une seconde approche, permet d'effectuer des calculs à partir du modèle surfacique de l'objet, basée sur une discrétisation polyédrique Figure III. 4. Cette méthode permet la gestion des interférences et collisions [83, 84].

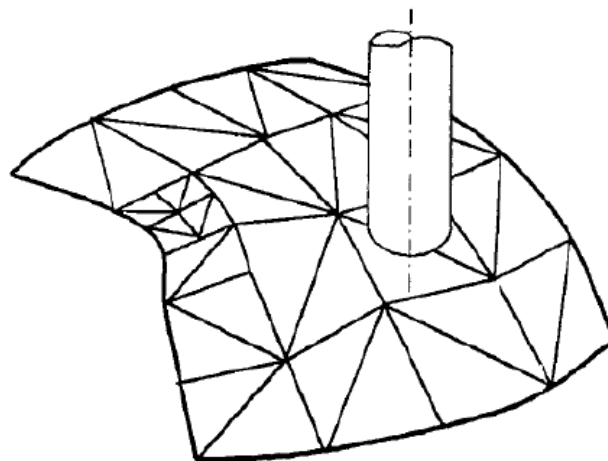


Figure. III. 4 Discrétisation polyédrique d'une surface

### III. 3 Positionnement outil

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.

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 (III.5) 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.

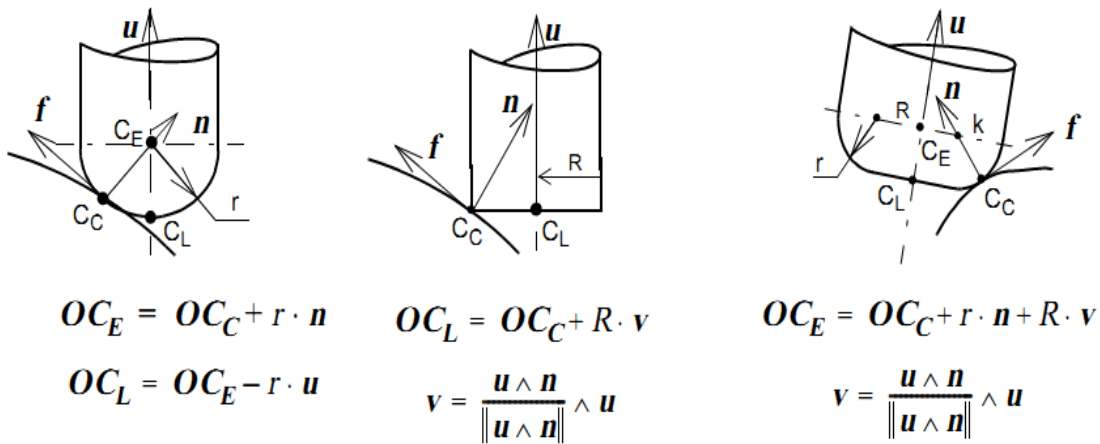


Figure III.5 : Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil. [76]

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 (III.6) présente les deux méthodes utilisées pour définir l'orientation de l'axe de l'outil

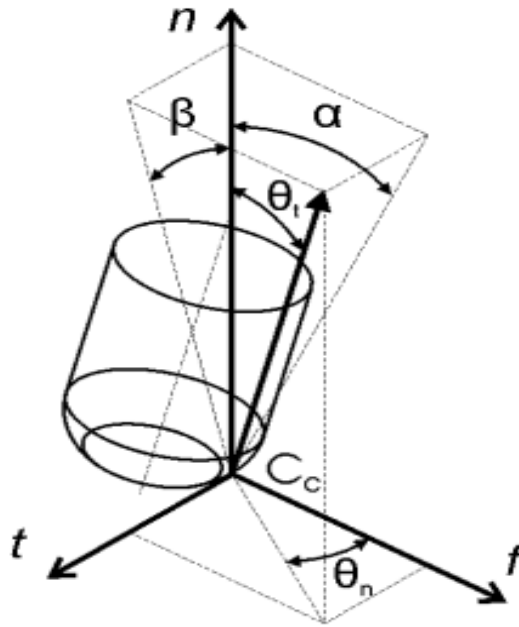


Figure III.6 : Paramétrisation de l'orientation de l'axe outil. [85]

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

- La seconde notation, utilisée notamment dans les logiciels de FAO, est définie par le couple  $(\alpha, \beta)$ , où  $\alpha$  est l'angle de détalonnage (« lead angle »), défini dans le plan contenant la direction d'avance, autour de  $t$ , et  $\beta$  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 III.7). L'orientation de l'axe de l'outil est définie par un seul angle représentant l'inclinaison de l'outil autour de la droite  $(C_{C1}, C_{C2})$

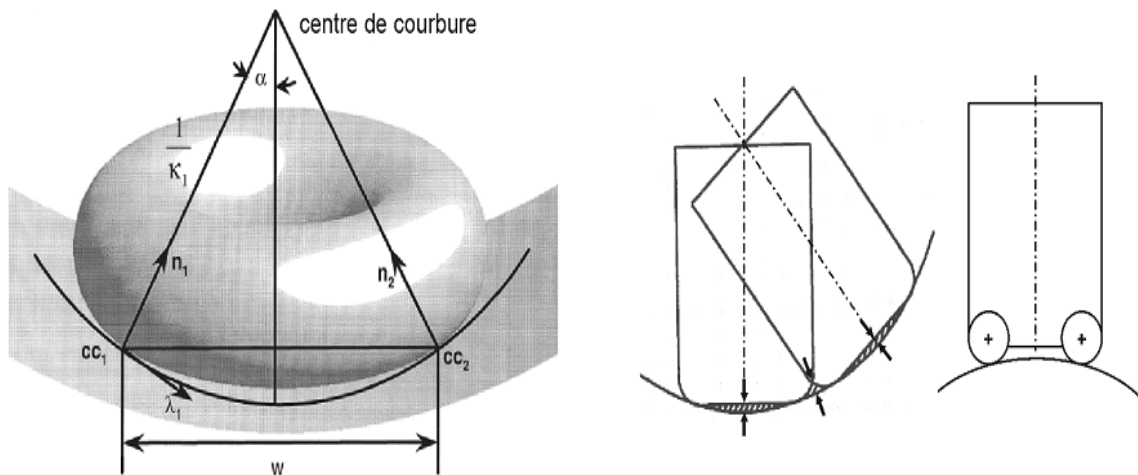


Figure III.7 : Définition d'un contact multipoints [85].

Nous retiendrons de cette partie que le positionnement de l'outil sur la surface à usiner est donné par le couple  $(C_L, \mathbf{u})$  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  $CC$  et de deux angles  $(\theta_t, \theta_n)$  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.

### III. 4 Méthodes des générations de trajectoires d'outil

La méthode de génération de trajectoires d'outil conventionnelle utilisée dans l'industrie a pour but de spécifier le point de contact outil, surface à usiner et le chemin de ce dernier dans la matière. Le point de contact de l'outil (CC) est le point où l'outil touche la surface de la pièce à usiner. La localisation de l'outil (CL) est l'emplacement du centre de l'outil par rapport à la surface à fraiser. Plusieurs méthodes de génération de trajectoires complexes de l'outil, existent dans l'industrie. Parmi ces méthodes on distingue ; La méthode cartésienne, iso paramétrique, plans parallèles, surface guide et la méthode des surfaces offset.

L'insertion de ces méthodes cible toujours la fiabilité et l'optimisation des chemins d'outil désirés.

### III. 4. 1 La méthode cartésienne

Le principe de déterminer les mouvements de l'outil est basé sur les paramètres de la surface à usiner. La méthode cartésienne permet aux opérateurs de réaliser les trajectoires de l'outil en utilisant le référentiel de coordonnées cartésiennes X, Y, Z. Le générateur de trajectoires de l'outil prend les coordonnées X, Y comme données d'entrée puis calcul la valeur de l'emplacement de l'outil sur l'axe Z. L'emplacement de l'outil instantané est également vérifié pour tracer la trajectoire.

L'inconvénient de cette méthode se caractérise dans la difficulté de générer des surface de courbures. Cette difficulté est due à la complexité du calcul entre les points de contact de l'outil et la surface de courbure à réaliser [81].

### III 4. 2 Méthode des plans parallèles

La stratégie par plans parallèles est la stratégie la plus utilisée et maîtrisée en industrie. Elle s'appuie sur des trajectoires d'outil résultantes des intersections entre la surface à usiner et un ensemble de plans parallèles. Ces plans parallèles sont caractérisés par une normale commune dans une direction donnée. Sur chaque point d'interpolation de la courbe d'intersection, l'outil est positionné d'une manière à être tangente à la surface [82].

Pour déterminer une trajectoire, l'intersection entre un plan et la surface à usiner est calculée. Cela se traduit par la détermination des couples  $(u ; v)$  appartenant au plan. Ces couples sont utilisés pour calculer les points centre-outil correspondant à la trajectoire.

La stratégie par plans parallèles surface centre-outil consiste à calculer l'intersection entre un plan et la surface  $S_{CO}(u ; v)$ . Ce calcul peut être plus difficile à mener si la surface centre outil possède des discontinuités  $C^0$  et  $C^1$ . En effet, les méthodes numériques utilisées nécessitent des surfaces de continuité  $C^1$ . Le résultat du calcul de cette intersection donne directement les points centre-outil servant à piloter l'outil dans l'espace de la machine.

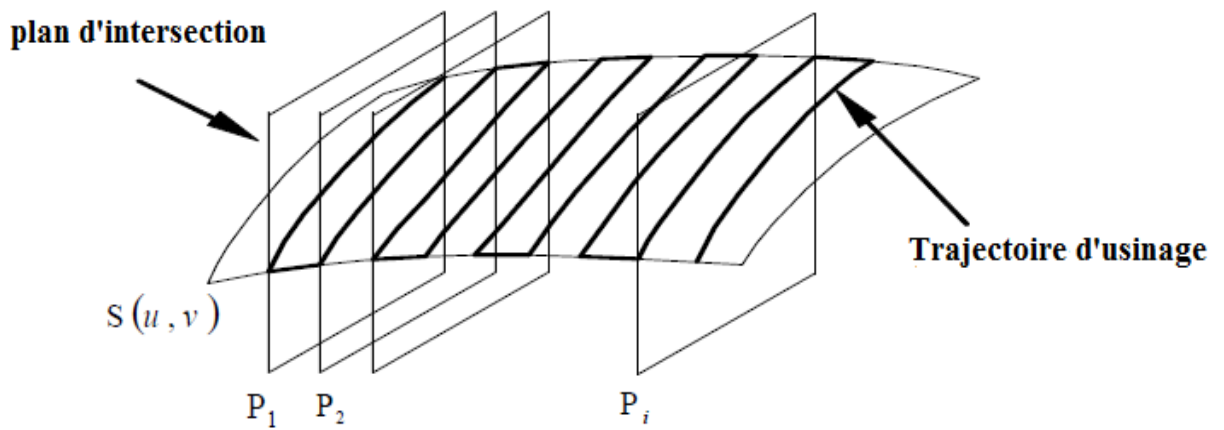


Figure III.8 : Stratégie d'usinage par plans parallèles.

### III. 4. 3 La méthode des surfaces guides

Cette stratégie définit la trajectoire de l'outil à partir d'une surface intermédiaire appelée surface guide. L'outil se déplace suivant une direction donnée en restant en contact avec la surface à usiner et la surface guide. Pour déterminer la position de l'outil un calcul itératif numérique doit être effectué à chaque itération. Ceci peut requérir un temps de calcul important [86, 87].

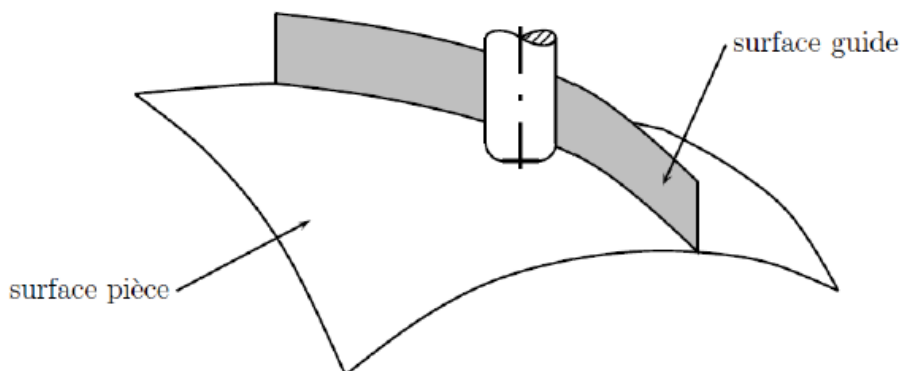


Figure III.9 : Stratégie d'usinage par surface guide.

Le choix des surfaces guides se base sur plusieurs critères tels que la facilité de construction ou la compatibilité avec la surface à usiner.

### III. 4. 4 La méthode iso paramétrique

Définition. Une courbe isoparamétrique est une courbe dont l'un des paramètres  $u$  ou  $v$  de la surface  $S(u; v)$  à une valeur fixe.

Soit une surface paramétrique  $S(u; v)$ ,  $(u; v) \in [0; 1] \times [0; 1]$ , si le paramètre  $u$  est fixé à une valeur par exemple  $u=0,1$ , et le paramètre  $v$  varie entre 0 et 1, cela génère une courbe isoparamétrique sur la surface dont la coordonnée  $u$  est constante. Pour couvrir toute la surface avec les isoparamétriques les deux paramètres  $u$  et  $v$  doivent varier de 0 à 1 en permanence (Figure.III.10).

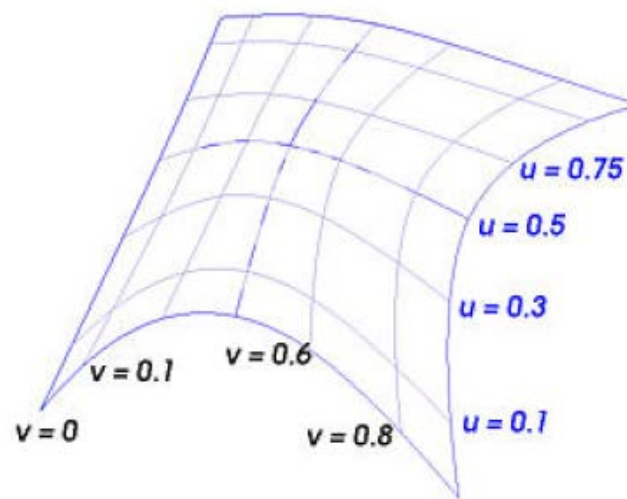


Figure III.10 : Trajectoire iso-paramétrique [89].

La stratégie par isoparamétriques est plus facile à mettre en œuvre, car elle ne nécessite pas le calcul des courbes d'intersection contrairement à l'usinage par plans parallèles. Avec la stratégie par isoparamétriques, la qualité de surface obtenue diffère suivant le choix effectué au niveau des isoparamétriques : suivant l'isoparamétrique  $u$  et suivant l'isoparamétrique  $v$  [88].

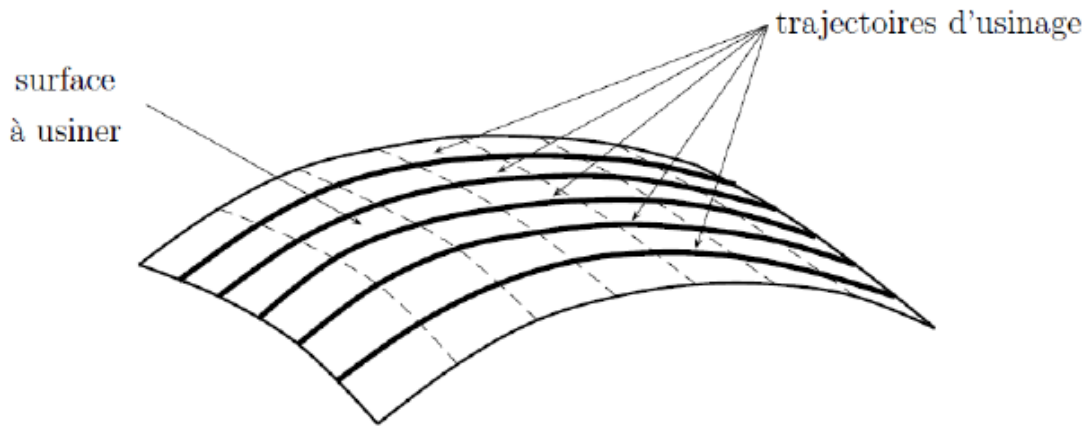


Figure III.11 : Stratégie isoparamétrique [88].

Cette stratégie est difficile à mettre en œuvre sur des surfaces composées de plusieurs carreaux définis dans des espaces paramétriques différents (Figure.III.12). L'inconvénient de cette stratégie est :

- l'apparition de trajectoires redondantes dans le cas de d'usinage de carreaux triangulaires, à cause de la génération automatique de trajectoires (Figure III.12).

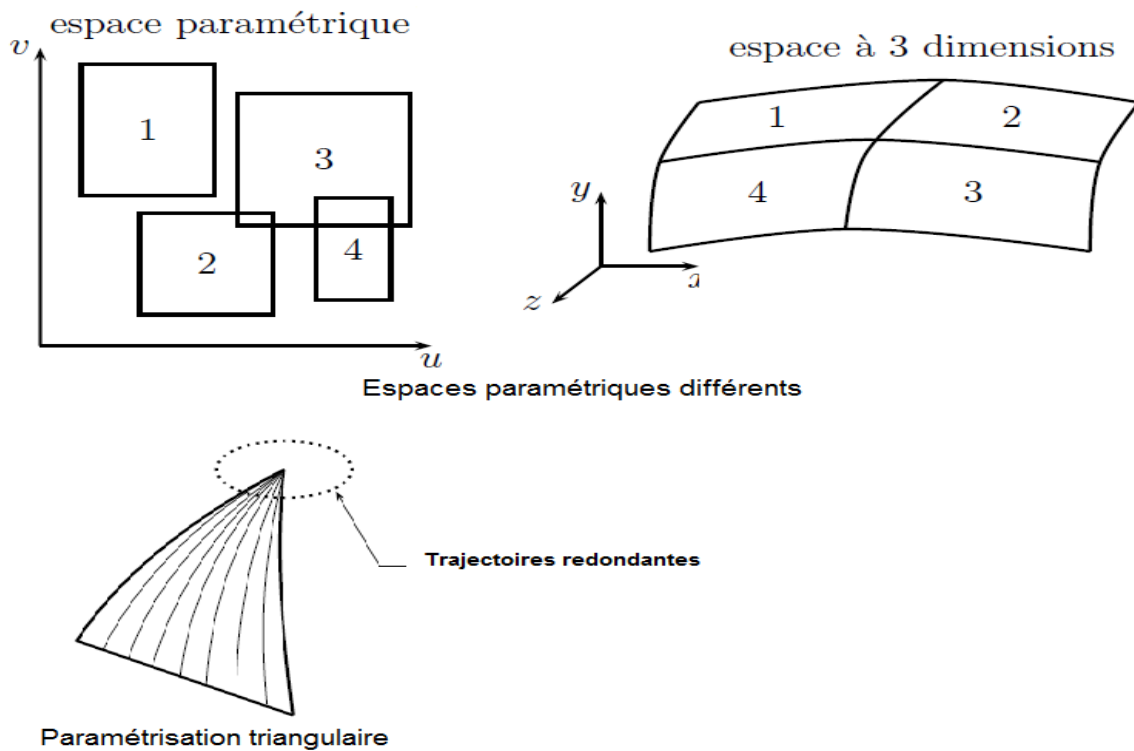


Figure III.12 : Inconvénients de la stratégie isoparamétrique [88]



### III. 4. 5 La méthode des surfaces offset

La conception de cette méthode est presque similaire à celle de la méthode cartésienne. Cette méthode génère la trajectoire en décomposant la surface selon le diamètre de l'outil. Le centre de l'outil de coupe désigne la trajectoire des surfaces décalées. Le calcul de la trajectoire doit être identifié par les passes de l'outil sur les surfaces offset. D'autre part les intersections qui mènent à un ajout de trajectoires doivent être détectées et corrigées lors de la performance de l'algorithme de surface offset [89,90].

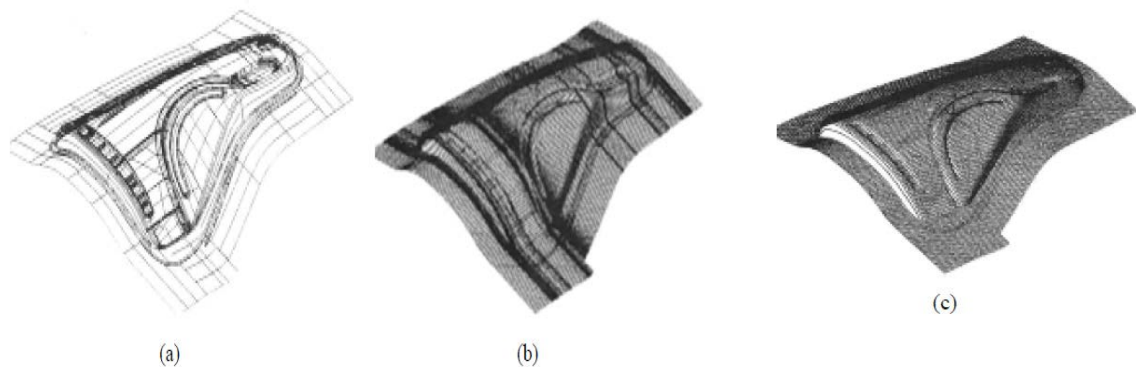


Figure. III. 13 Usinage d'une surface quelconque. (a) modèle de surfaces décomposées, (b) Traçage des points de données, (c) Trajectoires de l'outil

## III. 5 Stratégies d'usinage de cavités

### III. 5. 1 Classification des cavités

En se basant sur la notion de poche généralisée, Sundararajan and Wright [85], ont identifiés des entités d'usinage à partir du volume de matière à enlever. Si celle-ci provoque la sollicitation de deux axes de la machine outils et le troisième axe est utilisé pour prendre des prises de passe axiales seulement, l'usinage est dit 2 D1/2 et la poche est classé comme poche simple si la forme du contour est aussi simple. Par contre si celle-ci nécessite la sollicitation des trois axes, l'usinage est dit 3D et la poche est classée, complexe Figure. III. 14b. Les poches sont aussi classées fermés et ouvertes.

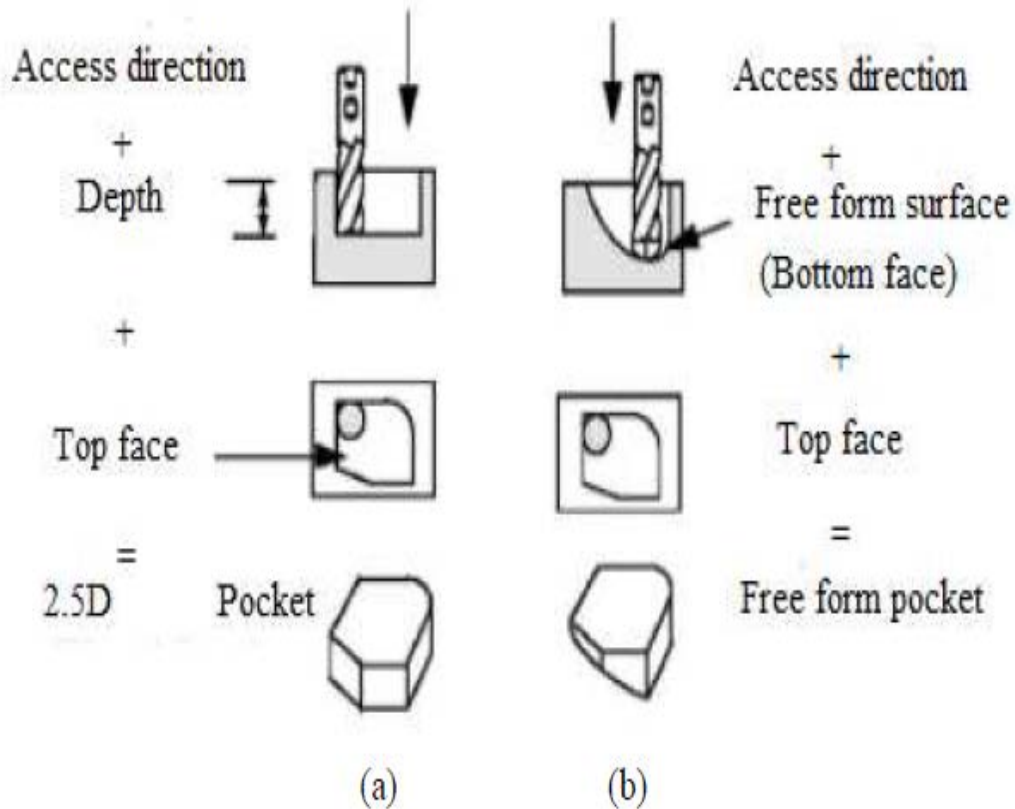


Figure III.14 Concept de poche généralisée : (a) poche  $2D^{1/2}$ , (b) poche 3D [91].

Une stratégie d'usinage est une méthodologie utilisée pour générer une ou une série d'opérations dans le but de réaliser une forme voulue. Elle permet d'associer un processus d'usinage à une entité géométrique.

Pas mal de stratégies d'usinage de poches existent dans l'industrie car, il est nécessaire de déterminer dans quelles circonstances celles-ci sont optimales et efficaces. Telle que soit la stratégie d'usinage choisit dans l'usinage de cavités en ébauche, l'adaptation d'une méthode d'usinage efficace et le calcul de la trajectoire de l'outil reste à ce jour une problématique pénible en vue de l'optimisation du processus d'évidement et la complexité géométrique des poches. Dans ce contexte, un ensemble de stratégies a fait l'objet de plusieurs travaux théoriques et expérimentales, on peut les réunir dans deux catégories de stratégies ; conventionnelles et nouvelles

### III. 5. 2 Usinage $2D^{1/2}$

Il consiste à enlever des couches parallèles généralement perpendiculaires à l'axe de l'outil, il est largement utilisé sur les MOCN 3 axes autorisant un débit de copeaux très important. L'usinage  $2D^{1/2}$  a débuté par les travaux de Lee and Chang [72], Chen et al [82,92]. Dans cette technique, la poche est découpée en tranches limitées par des plans parallèles, perpendiculaires à l'axe de l'outil. On peut citer comme inconvénient de cette technique surtout dans l'usinage de poche de parois complexes, la génération de crêtes importantes sous forme de marches d'escalier Figure. III. 13. Néanmoins, l'ajout d'une passe de demi-finition par un outil hémisphérique résout le problème [93, 94].

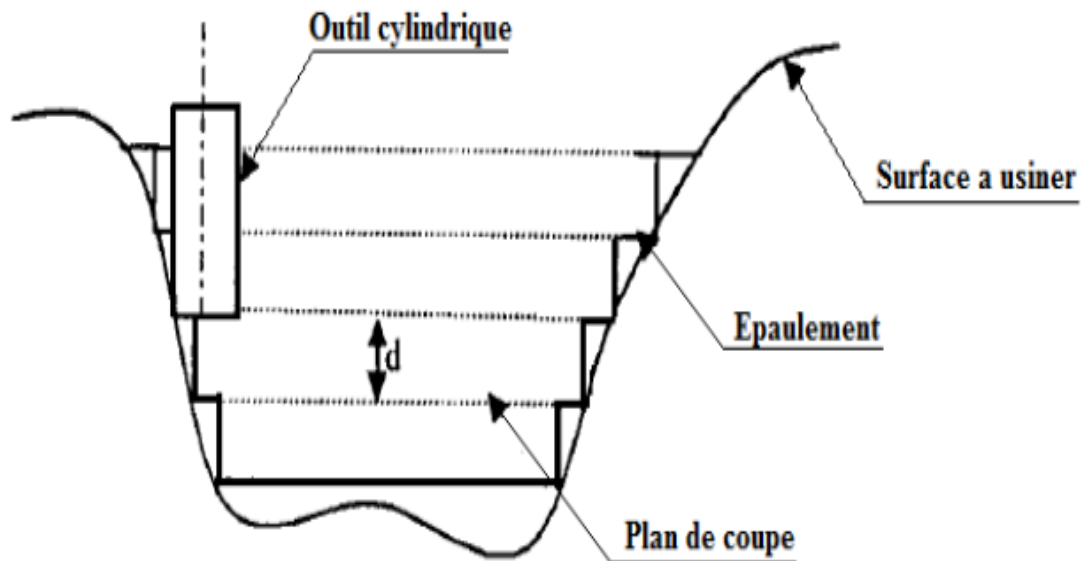


Figure. III. 15 Planification des trajectoires [94]

### III. 5. 3 Usinage 3D

L'usinage d'une poche 3D nécessite tout d'abord, la reconnaissance experte de zones d'usinage Figure. III. 16.

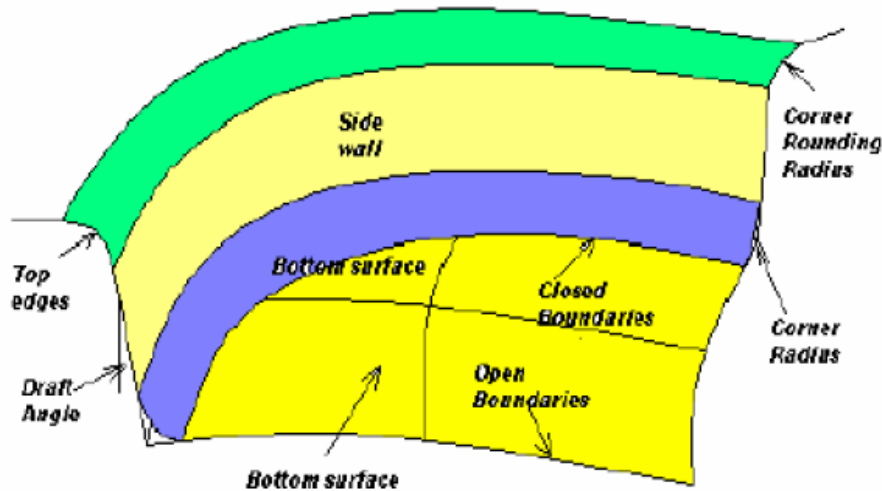


Figure III. 16 Décomposition d'une forme complexe [95]

L'étape suivante, consiste à appliquer des filtres sur la pièce pour extraire les différentes entités à usiner, en repérant les inclinaisons de chaque carreau de surface. Ces entités (raccordements, flancs et fonds) sont représentées par des surfaces planes ; horizontales, verticales, peu inclinées et fortement inclinées, auxquelles est attribuée une stratégie d'usinage prédéfinie Figure. III. 17.

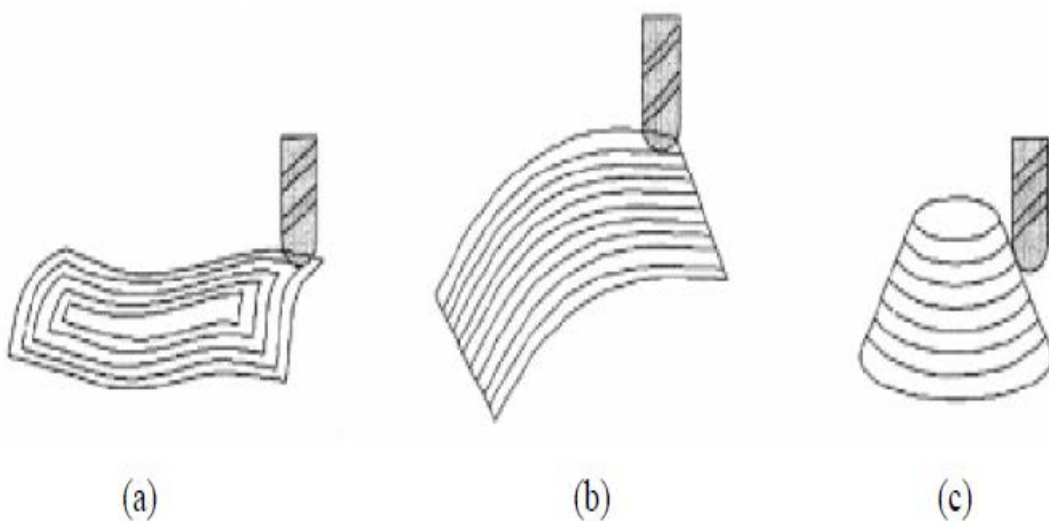


Figure III. 17 Stratégies d'usinages prédéfinies [95]

### III. 5. 4 Stratégies conventionnelles

Pour les stratégies d'usinage de poches conventionnelles, deux types de trajets d'évidement existent dans la littérature, le premier est calculé en utilisant une direction privilégiée appelé chemins en « Zigzag » qui est extrait de la méthode des plans parallèles. Le second utilise des contours parallèles et il est dit, trajets en contours décalés (offset) CPO.

#### III. 5. 4. 1 Stratégie d'usinage en Zigzag

L'usinage d'une poche le long d'une direction préférentielle implique un changement des conditions de coupe pour chaque aller-retour. Dans ce cas, l'usinage a lieu alternativement d'abord en avalent ensuite en opposition et ce pour chaque passage. En outre, il faut faire une passe de finition supplémentaire sur toutes les frontières extérieures de la poche afin d'obtenir la forme désirée. Alors, les trajets en Zigzag nécessitent tout d'abord la réalisation des trajets élémentaires sous forme de droites dans le sens de l'usinage Figure. III. 18a. La distance radiale entre ces droites ne doit pas dépasser le diamètre de l'outil coupant et elle est spécifiée par l'opérateur. Les intersections des droites élémentaires avec les frontières internes et externes de la poche sont calculées (Figure. III. 18b) afin de raccorder les différentes droites élémentaires avec des segments de raccordement parallèles aux frontières, avec une distance d'un rayon d'outil au minimum dans le but de former un seul trajet d'usinage Figure III. 18c. Ce trajet peut être découpé par obligation en deux ou plusieurs tronçons, suite à la présence d'un ilot ou un obstacle. Ce qui exige non seulement le retrait de l'outil mais aussi d'ajouter un trajet en l'air supplémentaire Figure. III. 18d. L'inconvenant majeur pénalisant la longueur de trajectoire en Zigzag est le choix de la direction de l'usinage qui a aussi un impact direct sur le nombre de retraits [96].

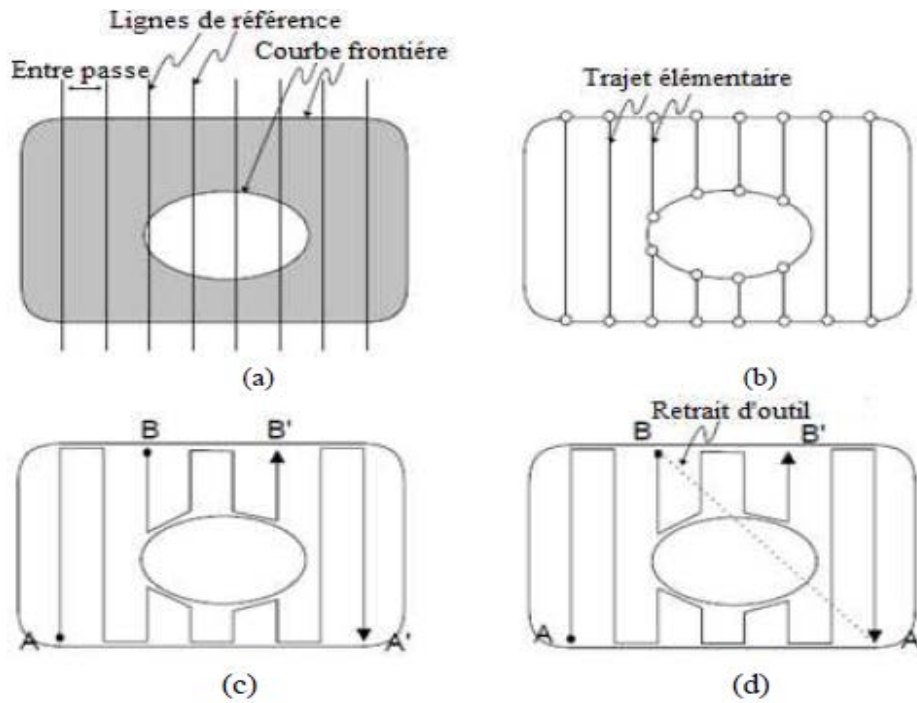


Figure III. 18 Procédure de planification de trajet en Zigzag: (a) avec inclinaison  $90^\circ$ , (b) Trajets d'outil élémentaires, (c) Sous trajets (AA' - BB'), (d) Liaison des trajets [97].

De leur côté (Parc and Choi 2000) ont proposés un algorithme de planification de trajectoires d'outils dont les objectifs sont [97]:

- Minimiser le nombre de retraits d'outils Figure. III. 19.
- Minimiser le nombre de segments élémentaires Figure. III. 20.
- Maximiser la moyenne de longueurs des segments élémentaires pour minimiser les Discontinuités

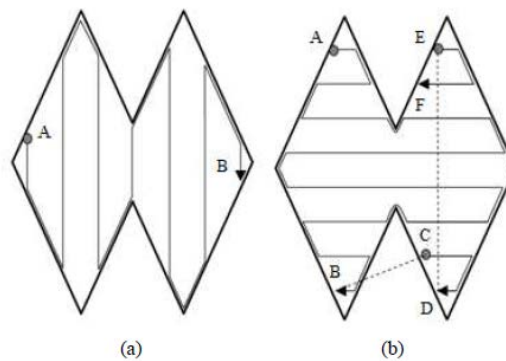


Figure.III.19 Influence de la direction de l'usinage sur le nombre de retraits: (a) Inclinaison  $90^\circ$  sans retrait, (b) Inclinaison  $0^\circ$  avec deux retraits.

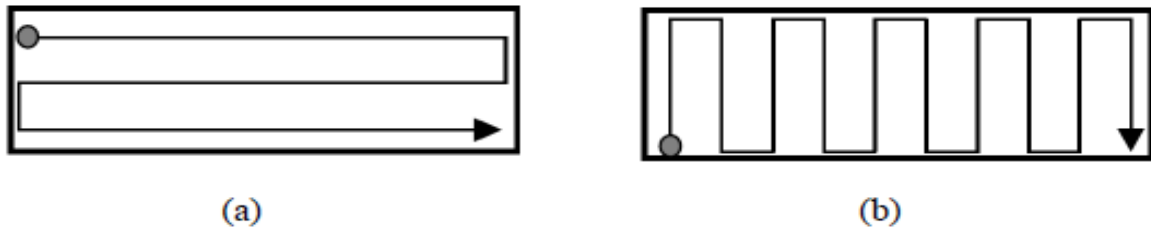


Figure. III.20 Direction d'usinage: (a) inclinaison  $0^\circ$  avec trois segments élémentaires, (b) inclinaison  $90^\circ$  avec dix segments élémentaires

### III. 5. 4. 2 Stratégie d'usinage en Contours parallèles

Dans le cas de l'usinage par des contours parallèles, les courbes décalées produites des frontières limitant la poche sont utilisées comme trajectoires élémentaires CPO (contours parallèles offset). Par conséquent, le calcul de la trajectoire d'usinage nécessite un algorithme robuste pour extraire la courbe décalée. En outre, il est nécessaire de relier les différentes passes d'usinage par des chemins supplémentaires dites également connexions ou segments de connexions des passes d'usinage [98]. Cependant la stratégie d'usinage en contour parallèle nous offre une génération de profils usinés identiques aux limites de la poche, ce qui permet de maintenir les conditions de coupe assez constantes et un fraisage par contraintes stables.

Cependant, il existe trois méthodes classiques de calcul pour générer les chemins de l'outil en contours parallèles ; l'approche basée sur les Pixels, « Pair Wise Offset » et diagramme de Voronoi.

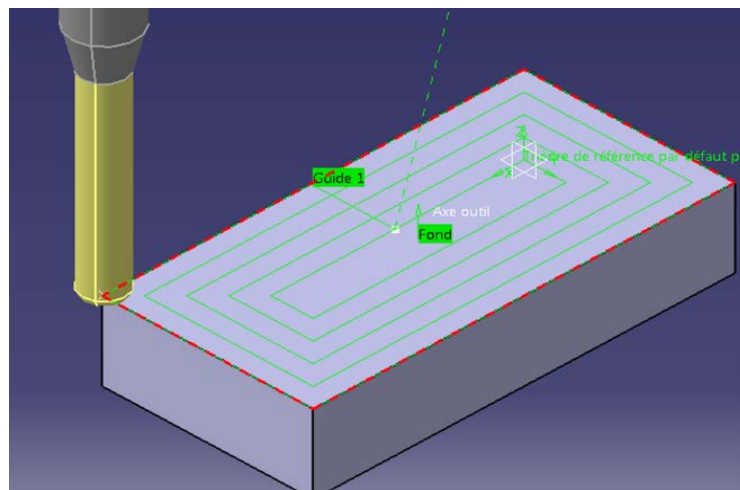


Figure.III.21.Trajectoires de la stratégie contour parallèle

### III. 5. 4. 3 Stratégie d'usinage en Contours Spirale

La stratégie d'usinage de type Spirale définit une trajectoire d'outil en spirale à partir d'un point de centre donné, produisant un contact constant du fait de l'usinage réalisé dans une limite spécifique. Associée à des passes de type Contour pour les faces plus verticales, elle convient particulièrement aux pièces creuses et arrondies suivant des angles de contact avec l'outil de 40 degrés maximum. Le point de centre du détail à usiner est identifié automatiquement ou peut être défini par l'utilisateur. Cette stratégie prend également en charge les angles en contact avec l'outil.

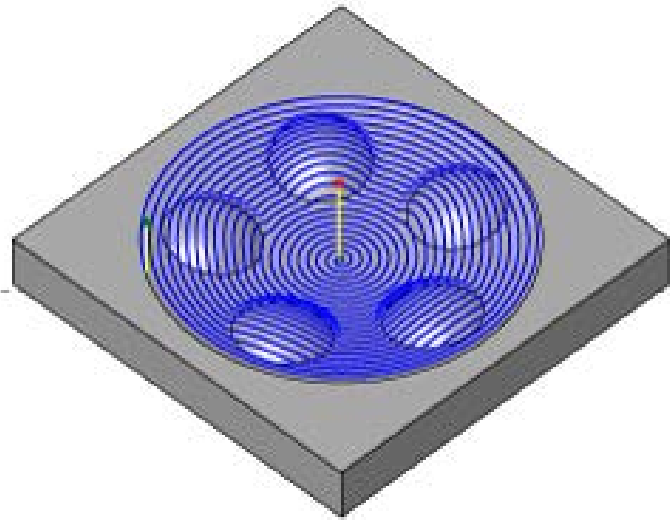


Figure.III.22.Trajectoires de la stratégie contour spirale

## III. 6 Stratégies d'usinage à grande vitesse

En vue de leur très grande utilité dans le domaine de fabrication de moules ou dans l'industrie aéronautique qui ont subits des avancées énormes soit en conception ou coté design. De nouvelles stratégies d'usinage de cavités ont été récemment développées, afin de mettre l'opération d'évidement dans un cadre de simplicité autorisant un usinage fluide et rapide dans de bonnes conditions.

Dans ce contexte, on distingue deux nouvelles stratégies ; Le trochoïdal et le tréfilage

### III. 6. 1 Usinage trochoïdal

L'usinage trochoïdal a été développé afin de mettre fin à la contrainte de dureté des matériaux usinés. Parmi les travaux réalisés dans ce sens on particularise les études de rainurage dans des matériaux durs effectuées par Guérin [99] qui ont prouvés une



productivité élevée par rapport aux stratégies classiques avec une durée de vie aussi augmentée. Otkur et al [100] de leur côté, ont proposés une modélisation de l'usinage trochoïdal en vue de prédire les efforts de coupe dans des cas simples, sur la base d'une interpolation circulaire du trajet.

Une trochoïde est une courbe décrite par un point lié à un cercle de rayon  $R$  roulant sans glisser sur une droite Figure. III.23. On désigne par cette dernière, la courbe obtenue par la combinaison d'un mouvement circulaire uniforme et un mouvement linéaire uniforme. Comme indiqué sur la Figure III. 23, le point  $B$  tourne de manière uniforme autour du point  $A$ , qui est animé d'un mouvement linéaire.

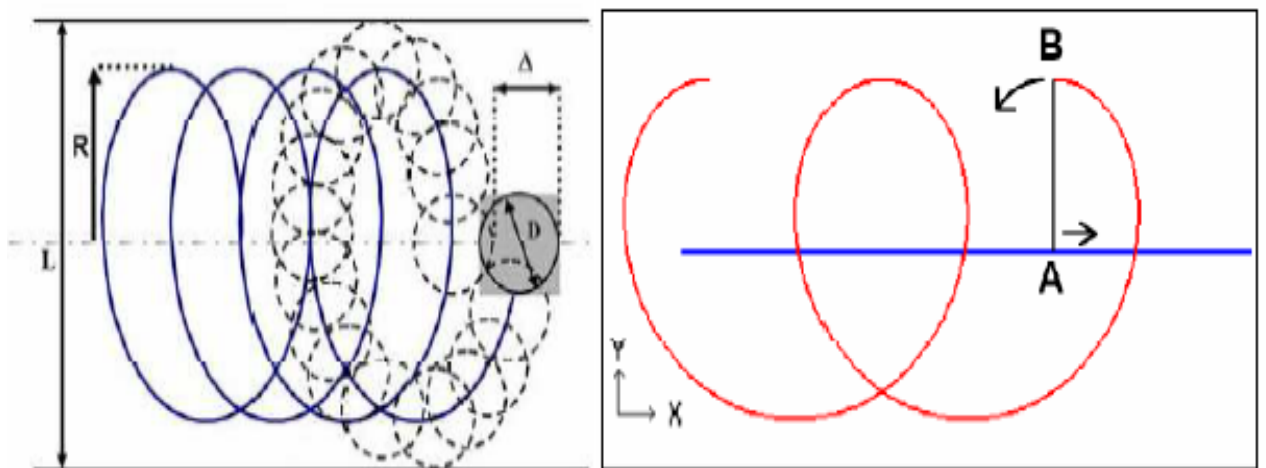


Figure. III. 23 Trajectoire d'usinage en trochoïdale [100].

L'équation paramétrée d'une trochoïde en coordonnées cartésiennes, correspond au système d'équations (3. 1), en utilisant les paramètres:  $v$ , vitesse du centre du cercle dans son mouvement rectiligne uniforme,  $R$  rayon du cercle ( $R>0$ ),  $w$  pulsations ( $w>0$ ) et  $t$  paramètres de la courbe ( $t>0$ ).

$$\begin{cases} x = v.t + R \cos(w.t) \\ y = R \cdot \sin(w.t) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Le mouvement trochoïdale de la fraise est derrière le secret de la fluidité de pénétration sans excitation ou chocs. Il est notable que la direction principale, celle dans le sens du mouvement du point  $A$  Figure. III. 23 est généralement sous forme d'un trajet Zigzag, contours parallèle ou spirale Figure III. 24.

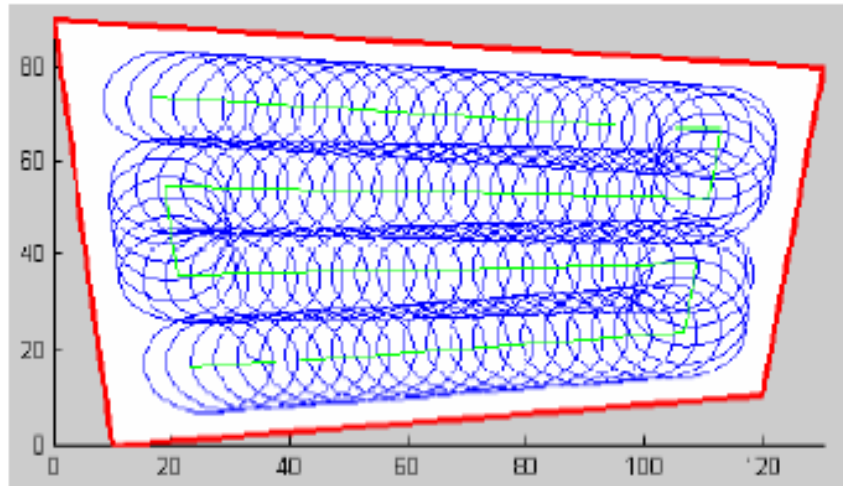


Figure. III. 25 Trajet trochoïdale généré en Zigzag

On peut déduire, que le principal intérêt de l'usinage trochoïdal est de préserver une avance uniforme durant l'usinage ainsi que générer une épaisseur de copeau constante, cela entraîne directement des répercussions favorables sur les conditions de coupe et en particulier cela permet de diminuer les chocs et le marquage de la pièce. Les efforts de coupe et le temps de contact outil/ pièce sont plus faibles que dans des stratégies classiques, ce qui peut permettre

### III. 6. 2 Usinage en tréflage

Le tréflage est une opération de fraisage de paroi en ébauche et finition où le vecteur vitesse d'avance est globalement colinéaire à l'axe de la fraise. Il existe en tréflage plusieurs types d'engagement présenté à la Figure III.26. Le grignotage frontal se caractérise par le fait que l'arête de coupe de la fraise est engagée dans la matière sur le tour complet du mouvement de coupe (l'opération de perçage peut être considérée comme un cas particulier du tréflage ). Dans le grignotage latéral, l'arête de coupe n'est engagée que sur une portion de tour

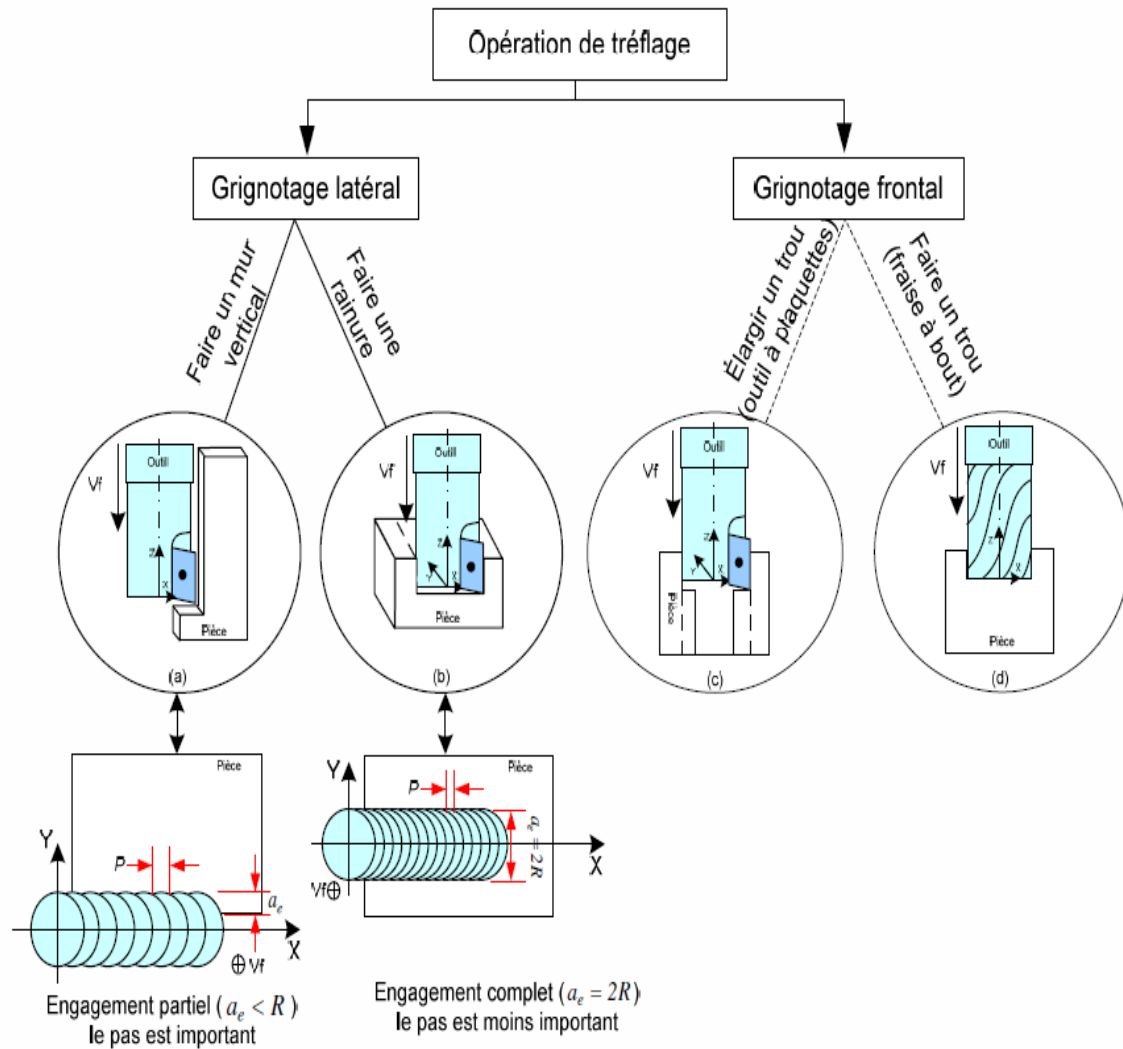


Figure III.26. Types d'engagement en tréflage [101].

Ren et al. (Ren et al., 2009) puis Liang et al. (Liang et al., 2014) montrent l'intérêt d'une trajectoire de tréflage sur machine 4 axes. Leur étude s'appuie sur l'ébauche d'une veine ouverte d'un disque aubagé monobloc en alliage de titane. La trajectoire de l'outil est toujours rectiligne mais la rotation de la machine-outil permet de changer l'orientation de chaque descente de tréflage de manière à optimiser la matière à enlever et s'affranchir des collisions. Ren constate que le tréflage réduit fortement les efforts de coupe par rapport à une stratégie de fraisage en roulant tout en augmentant le débit de copeaux.



# *Chapitre :* *IV*

*Méthode d'optimisation  
par les réseaux de  
neurones artificiels*



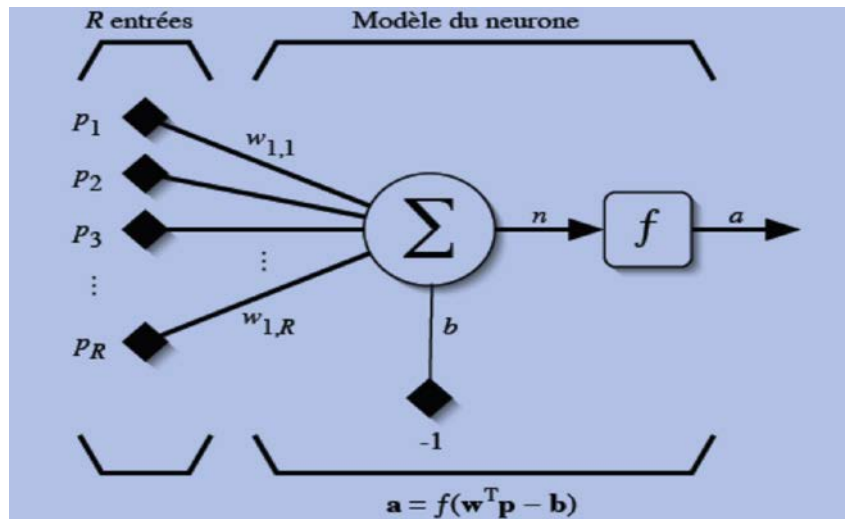


Figure IV.1 : Modèle d'un neurone artificiel

En suivant les notations présentées à la section précédente, les  $R$  entrées du neurone correspondent au vecteur  $p = [p_1 p_2 \dots p_R]^T$ , alors que  $w = w [\omega_{1,1} \omega_{1,2} \dots \omega_{1,R}]^T$  représente le vecteur des poids du neurone. La sortie  $n$  de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$n = \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j - b = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b \quad (\text{IV.1})$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = W^T p - b \quad (\text{IV.2})$$

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais  $b$  du neurone. Le résultat  $n$  de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais  $b$  s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil  $b$ , alors l'argument de  $f$  devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif.

Pour pouvoir simuler un réseau de neurones, nous allons rendre le temps discret dans nos équations. Autrement dit, nous allons supposer que tous les neurones sont synchrones, c'est-à-dire qu'à chaque temps  $t$ , ils vont simultanément calculer leur somme pondérée et produire une sortie.  $a(t) = f(n(t))$ .

Revenons donc à notre modèle tel que formulé par l'équation IV.2 et ajoutons la fonction d'activation  $f$  pour obtenir la sortie du neurone :











Notez bien que  $S \neq R$ , dans le cas général (les nombres de neurones et d'entrées sont indépendants). Si l'on considère que les  $S$  neurones forment un vecteur de neurones, alors on peut créer les vecteurs  $b = [b_1 b_2 \dots b_S]^T$ ,  $n = [n_1 n_2 \dots n_S]^T$  et  $a = [a_1 a_2 \dots a_S]^T$ . Ceci nous amène à la représentation graphique simplifiée, illustrée à la Figure IV.5. On y retrouve, comme à la Figure IV.2 les mêmes vecteurs et matrice. La seule différence se situe au niveau de la taille, ou plus précisément du nombre de rangées ( $S$ ), de  $b$ ,  $n$ ,  $a$  et  $W$ .

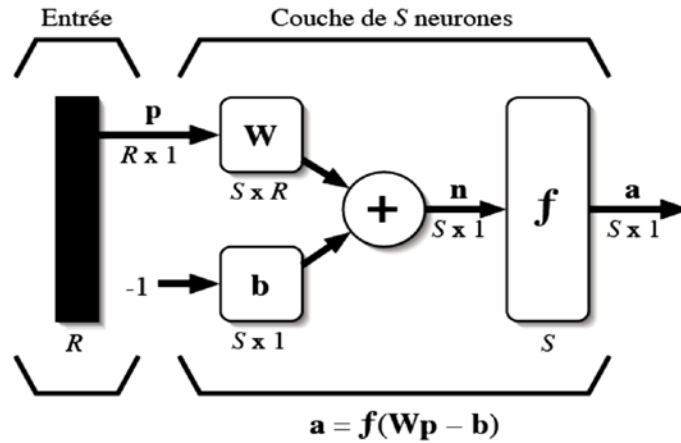


Figure IV.5 : Représentation matricielle d'une couche de  $S$  neurones

Finalement, pour construire un réseau, il ne suffit plus que de combiner des couches comme à la Figure IV.6. Cet exemple comporte  $R$  entrées et trois couches de neurones comptant respectivement  $S^1$ ,  $S^2$  et  $S^3$  neurones. Dans le cas général, de nouveau,  $S^1$ ,  $S^2$ ,  $S^3$ . Chaque couche possède sa propre matrice de poids  $W^k$ , où  $k$  désigne l'indice de couche. Dans le contexte des vecteurs et des matrices relatives à une couche, nous emploierons toujours un exposant pour désigner cet indice. Ainsi, les vecteurs  $b^k$ ,  $n^k$  et  $a^k$  sont aussi associés à la couche  $k$ .

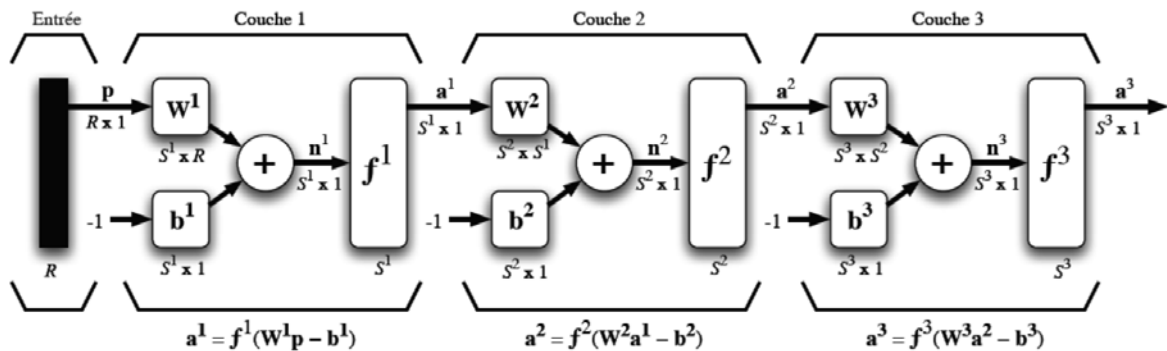


Figure IV.6 : Représentation matricielle d'un réseau de trois couches



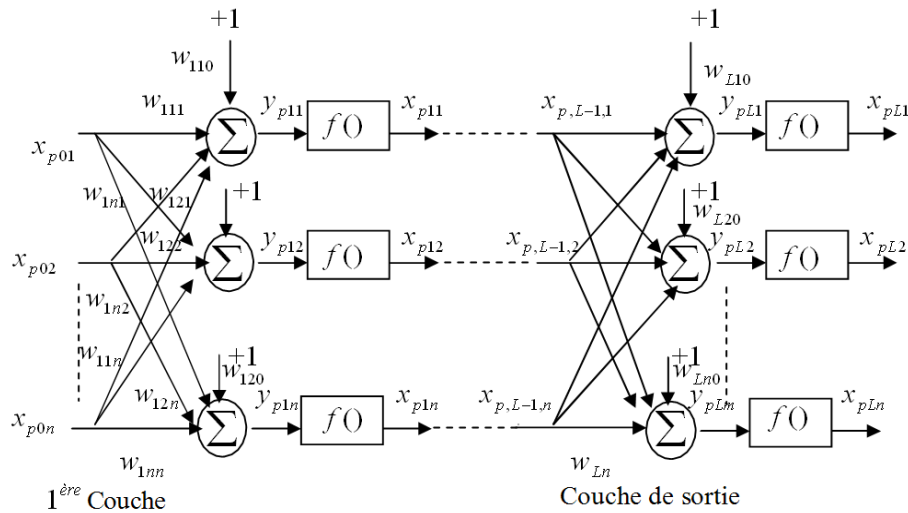


Figure IV.7 : Structure d'un réseau de neurone multicouche

### IV.3.1 Apprentissage des réseaux de neurones artificiels

L'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels signifie modifier la valeur de ses poids et de ses biais pour qu'il réalise la fonction entrée/sortie désirée. Pour spécifier la structure du réseau, il faut aussi choisir le nombre de couches et le nombre de neurones sur chaque couche.

Un apprentissage est dit *supervisé* lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif.

À l'inverse, lors d'un apprentissage non-supervisé, le réseau est laissé libre de converger vers n'importe quel état final lorsqu'on lui présente un motif.

Dans un apprentissage supervisé, on présente au réseau de neurones les entrées et les sorties désirées correspondantes. Ici le réseau s'adapte par une comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies et la réponse attendue en sortie. De cette façon, le réseau va modifier ses poids jusqu'à ce que le résultat soit le plus proche possible de la sortie désirée, correspondant à une entrée donnée.

L'algorithme de rétro-propagation est le plus populaire parmi les techniques d'apprentissage supervisé.

On considère un réseau comportant une couche d'entrée à  $n$  neurones, une couche de sortie à  $m$  neurones et il comporte une à plusieurs couches cachées.



















# *Chapitre :* *V*

*Application de la méthode de  
Réseaux neurone pour optimisation  
de la Cinématique inverse*

## **V.1 Introduction**

Afin d'appliquer les différentes notions et techniques de modélisation décrites précédemment, cette section présente une application de calcul de modèle géométrique et cinématique pour la machine MATSUURA MX330, après une méthode d'optimisation de réseaux de neurones sera utilisé pour l'identification optimale du modèle géométrique et cinématique pour la machine-outil MATSUURA MX330.

Pour arriver à ce point, nous procéderons comme suit :

Tout d'abord, nous présenterons les modèles utilisés, le modèle géométrique et le modèle cinématique de la Matsuura MX330, avec les paramètres qui nous serviront pour la simulation.

Nous validerons les modèles de simulation en les comparants avec les résultats obtenus.

Nous montrons comment nous pouvons utiliser les réseaux de neurones pour minimiser l'erreur l'usinage trochoïdal. Nous finissons en faisant le bilan des conclusions obtenues dans le chapitre.

## **V.2 Description géométrique de la Matsuura MX330**

La machine Matsuura MX 330 présenter une architecture arborescente [ACXYZ] [NF ISO 10791-6, 2014 ; NF ISO 841, 2004] ,ou plus simplement RRTTT [Bohez, 2002] : deux axes de rotation (R) C et A, et deux axes de translation (T) X et Y portent la pièce (P) , et un axes de translation (T) portent l'effecteur (t) monté en broche, le tout supporté par un bâti (G), [113, 114,5]. Les directions du mouvement des joints articulaires sont illustrées sur la Figure V.1



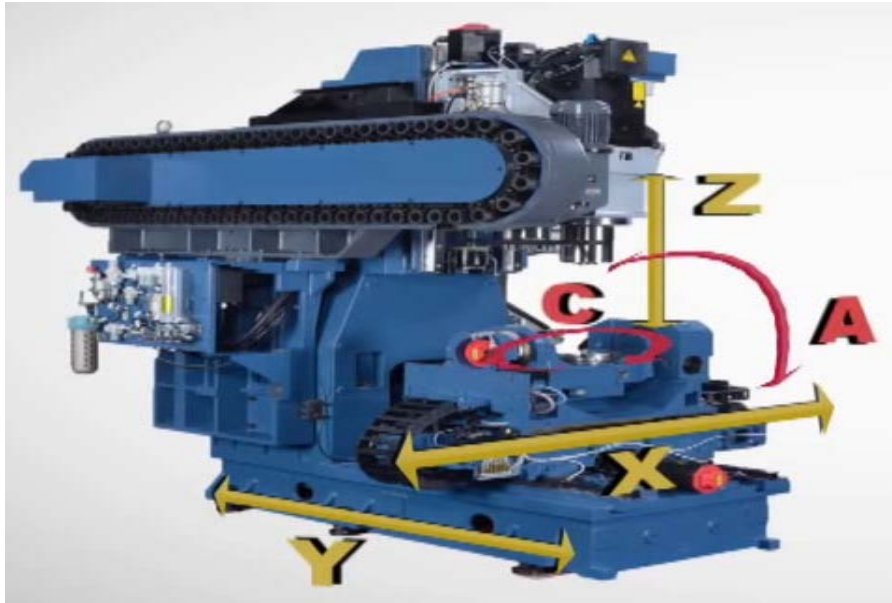


Figure V.1 : Machine Matsuura MX330 à structure RRTTT.

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 V.2 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.

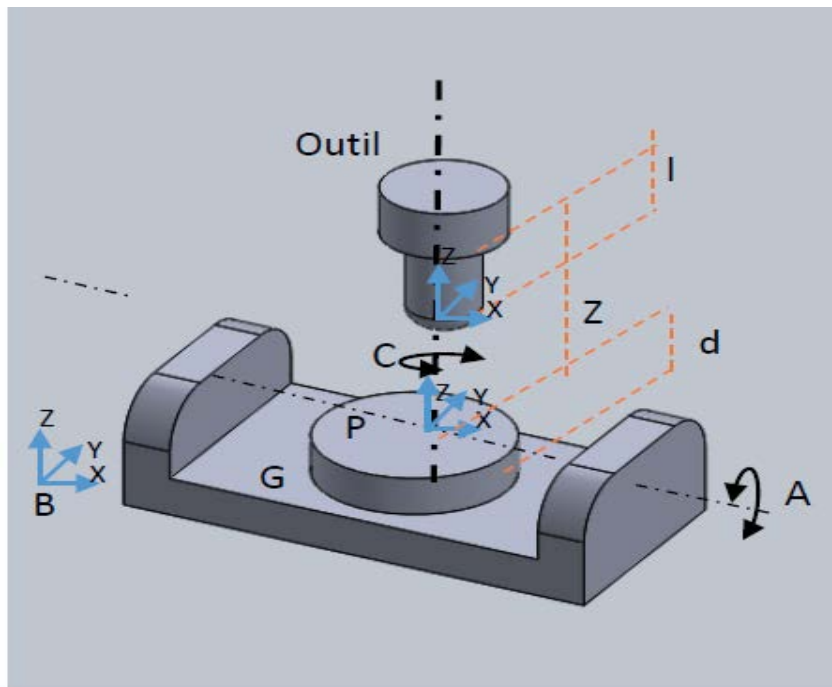


Figure V.2 : Le schéma du centre de machine à 5 axes.

Les limites articulaires du Matsuura MX330 sont comme suivant :

Tableau V.1. Mouvement de l'outil

Mouvement		
X-axe	mm (in)	435(17.13)
Y-axe	mm (in)	465(18.31)
Z-axe	mm (in)	560(22.05)
A-axe	deg	-125~+10
C-axe	deg	360

### V.3 Modélisation géométrique

Dans cette partie le modèle géométrique direct du centre de fraisage à 5 axes est étudié en utilisant la méthode *D&H*. La Figure (V.3) montre la géométrie de la machine CNC à 5-axes 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 à 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 machine Matsuura MX330 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 (V.2) en tant qu'expositions sur la Figure (V.3).

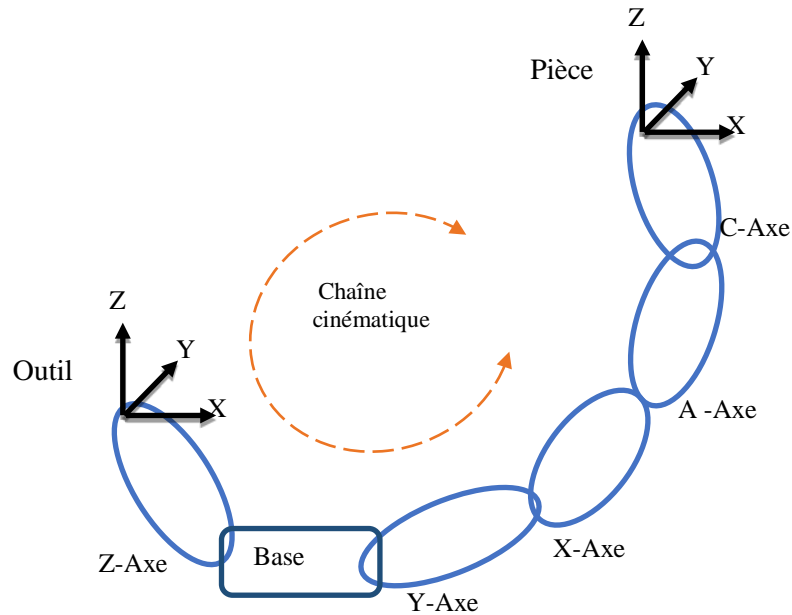


Figure V.3 Chaîne cinématique de Machine-outil Matsuura MX330 5-axes

Les matrices de transformation homogène entre les joints voisins  $T_i$  à  $T_{i+1}$  sont calculées à partir de l'équation (II.2), ainsi  ${}^P T_l$  à  ${}^5 T_l$  peut être calculé comme suit :

$${}^P T_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^1 T_2 = \begin{bmatrix} \cos(C) & 0 & \sin(C) & 0 \\ \sin(C) & 0 & -\cos(C) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^2 T_3 = \begin{bmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3 T_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^4 T_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^5 T_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z+d+l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tableau V.2 : Paramètres de D-H à partir des systèmes de coordonnées de la pièce à l'outil

$i$	$\theta_i^\circ$	$a_i$	$b_i$	$\alpha_i^\circ$	$i+1$
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:

$${}^pT_t = {}^pT_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_t \quad (V.1)$$

$${}^pT_t = \begin{bmatrix} \cos(C) & \cos(A)\sin(C) & \sin(A)\sin(C) & -X \cos(C) - Y \cos(A)\sin(C) + (Z+d-l)\sin(A)\sin(C) \\ -\sin(A) & \cos(A)\cos(C) & \sin(A)\cos(C) & X \sin(C) - Y \cos(A)\cos(C) + (Z+d-l)\sin(A)\cos(C) \\ 0 & -\sin(A) & \cos(A) & Y \sin(A) + (Z+d-l)\cos(A) - d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les trois premières rangées des deux dernières colonnes de l'équation. V.2 fournissent l'orientation et la position d'outils notés  $O$  et  $P$ , respectivement. Le MGD du Matsuura est :

$$P = \begin{bmatrix} -X \cos(C) - Y \cos(A)\sin(C) + (Z+d-l)\sin(A)\sin(C) \\ X \sin(C) - Y \cos(A)\cos(C) + (Z+d-l)\sin(A)\cos(C) \\ Y \sin(A) + (Z+d-l)\cos(A) - d \end{bmatrix}, \text{ et } O = \begin{bmatrix} \sin(A)\sin(C) \\ \sin(A)\cos(C) \\ \cos(A) \end{bmatrix} \quad (V.2)$$

$$P = [P_x \quad P_y \quad P_z]$$

Où

$$\begin{cases} P_x = -X \cos(C) - Y \cos(A)\sin(C) + (Z+d-l)\sin(A)\sin(C) \\ P_y = X \sin(C) - Y \cos(A)\cos(C) + (Z+d-l)\sin(A)\cos(C) \\ P_z = Y \sin(A) + (Z+d-l)\cos(A) - d \end{cases} \quad (V.3)$$

$$O = [O_i \quad O_j \quad O_k]$$

$$\text{Où } \begin{cases} O_i = \sin(A)\sin(C) \\ O_j = \sin(A)\cos(C) \\ O_k = \cos(A) \end{cases} \quad (V.4)$$

Donc l'équation (V.5) présente la modèle mathématique globale du géométrique direct

$$\begin{cases} O_i = \sin(A)\sin(C) \\ O_j = \sin(A)\cos(C) \\ O_k = \cos(A) \\ P_x = -X \cos(C) - Y \cos(A)\sin(C) + (Z+d-l)\sin(A)\sin(C) \\ P_y = X \sin(C) - Y \cos(A)\cos(C) + (Z+d-l)\sin(A)\cos(C) \\ P_z = Y \sin(A) + (Z+d-l)\cos(A) - d \end{cases} \quad (V.5)$$

La Figure V.4 montre la model géométrique directe de la position et orientation d'outil à simulée et mesurée de la machine matsuura MX330.

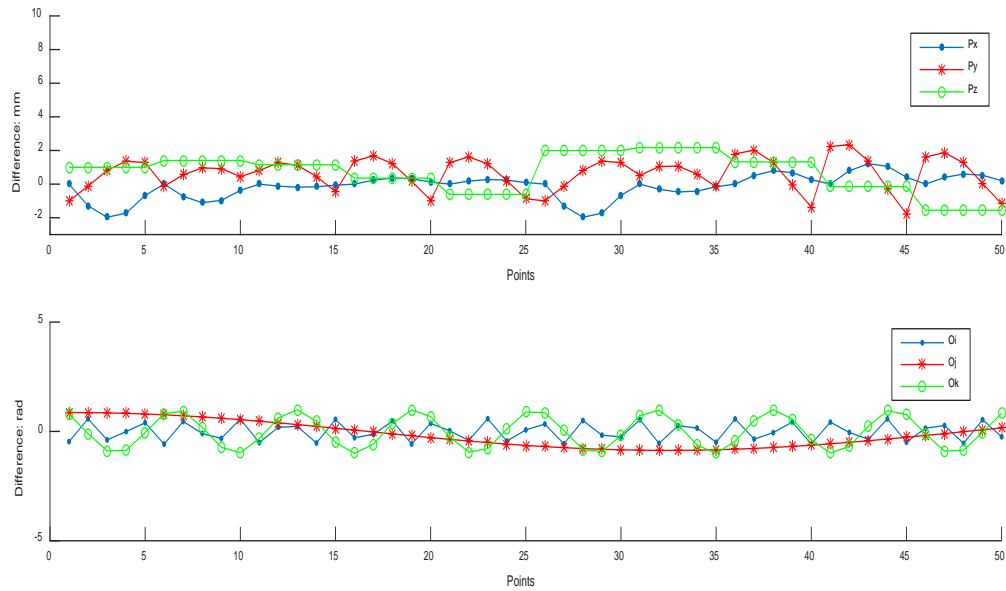


Figure V.4 : Géométrie direct du Matsuura MX330 à 5 axes

### V.3.1 Modèle géométrique inverse

Le MGI exprime la position de l'articulation quand la position et l'orientation du système des coordonnées de d'outil ( $T$ ) lié au système des coordonnées de la pièce  $P$  est connue.

$$q = f^{-1}(X) \quad (V.6)$$

De l'équation. (V.2) du MCD du Matsuura MX330, le vecteur  $O$  présente les angles  $A$  et  $C$ , tandis que le vecteur  $P$  fournit  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ .

Si le vecteur  $O = \begin{bmatrix} O_i \\ O_j \\ O_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(A)\sin(C) \\ \sin(A)\cos(C) \\ \cos(A) \end{bmatrix}$  nous aurons :

$$\begin{cases} A = \pm \arccos(O_k) \\ C = \arctan 2(O_i / O_j) \end{cases} \quad (V.7)$$

Si le vecteur

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X \cos(C) - Y \cos(A) \sin(C) + (Z + d - l) \sin(A) \sin(C) \\ X \sin(C) - Y \cos(A) \cos(C) + (Z + d - l) \sin(A) \cos(C) \\ Y \sin(A) + (Z + d - l) \cos(A) - d \end{bmatrix}$$

On obtient le développement :

$$\begin{bmatrix} -\cos(C) & -\cos(A)\sin(C) & \sin(A)\sin(C) \\ \sin(C) & -\cos(A)\cos(C) & \sin(A)\cos(C) \\ 0 & \sin(A) & \cos(A) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x - (d-l)\sin(A)\sin(C) \\ P_y - (d-l)\sin(A)\cos(C) \\ P_z + d - (d-l)\cos(A) \end{bmatrix}$$

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 :

$$\begin{cases} X = -P_x \cos(C) + P_y \sin(C) \\ Y = -P_x \cos(A)\sin(C) - P_y \cos(A)\cos(C) + \sin(A)(P_z + d) \\ Z = P_x \sin(A)\sin(C) + P_y \sin(A)\cos(C) + (P_z + d) - (d-l) \end{cases} \quad (V.8)$$

L'équation (V.9) set l'équation globale de la modèle GI

$$\begin{cases} A = \pm ar \cos(O_k) \\ C = \arctan 2(O_i / O_j) \\ X = -P_x \cos(C) + P_y \sin(C) \\ Y = -P_x \cos(A)\sin(C) - P_y \cos(A)\cos(C) + \sin(A)(P_z + d) \\ Z = P_x \sin(A)\sin(C) + P_y \sin(A)\cos(C) + (P_z + d) - (d-l) \end{cases} \quad (V.9)$$

La Figure V.5 montre la model géométrique inverse de la position et orientation d'outil de la machine matsuura MX330.

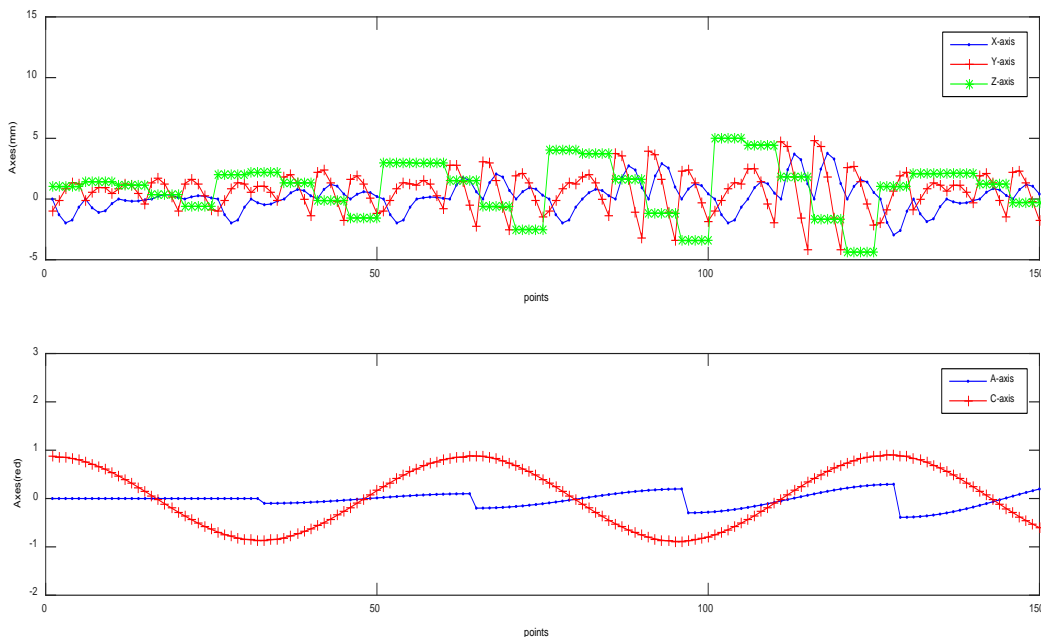


Figure V.5 : Géométrie inverse du Matsuura MX330 à 5 axes

## V.4 Modélisation cinématique

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

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

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (V.10)$$

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

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{p} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6, j(q) = \frac{\partial f}{\partial q} \in \mathbb{R}^{6 \times n}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (V.11)$$

De l'équation (V.10),  $\dot{X}$  est une matrice colonne à six dimensions qui se compose de  $\omega$ ,

Selon l'équation (V,1), la matrice jacobéenne peut être déterminée comme dérivées partielles de la position de l'effecteur  $X$  par rapport à la position de l'articulation  $q$  à partir du modèle CD des manipulateurs :

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial q_n} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times n} \quad (5.12)$$

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

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

$$q = \begin{bmatrix} C \\ A \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^5, X = \begin{bmatrix} O \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_o(q) \\ f_p(q) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad \text{et} \quad p \in \mathbb{R}^3 \quad (V.13)$$

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

Selon la Figure V.3, la vectrice 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  $\begin{bmatrix} \cos(C) & \sin(C) & 0 \\ -\sin(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  nous obtenons le vecteur vitesse angulaire de

$$\text{l'articulation A liée P} \begin{bmatrix} -\cos(C) \\ \sin(C) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(C) & \sin(C) & 0 \\ -\sin(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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 :

$$w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \dot{C} + \begin{bmatrix} -\cos(C) \\ \sin(C) \\ 0 \end{bmatrix} \dot{A} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{Y} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{Z} \quad (\text{V.14})$$

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

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

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

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \sin(A)\cos(C)(P_z-l+d) \\ -\sin(A)\sin(C)(P_z-l+d) \\ 0 \end{bmatrix} \dot{C} + \begin{bmatrix} \cos(A)\sin(C)(P_z-l+d) \\ \cos(A)\cos(C)(P_z-l+d) \\ -\sin(A)(P_z-l+d)+P_y\cos(C) \end{bmatrix} \dot{A} + \begin{bmatrix} -\cos(C) \\ \sin(C) \\ 0 \end{bmatrix} \dot{X} + \begin{bmatrix} -\cos(A)\sin(C) \\ -\cos(A)\cos(C) \\ \sin(A) \end{bmatrix} \dot{Y} + \begin{bmatrix} -\sin(A)\sin(C) \\ \sin(A)\cos(C) \\ \cos(A) \end{bmatrix} \dot{Z} \quad (\text{V.15})$$

Par conséquent, nous obtenons :



$$\begin{bmatrix} w \\ \dot{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos(C) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(C) & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(A)\cos(C)(P_z - l + d) & \cos(A)\sin(C)(P_z - l + d) & -\cos(C) & -\cos(A)\sin(C) & -\sin(A)\sin(C) \\ -\sin(A)\sin(C)(P_z - l + d) & \cos(A)\cos(C)(P_z - l + d) & \sin(C) & -\cos(A)\cos(C) & \sin(A)\cos(C) \\ 0 & -\sin(A)(P_z - l + d) + P_y \cos(C) & 0 & \sin(A) & \cos(A) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{C} \\ \dot{A} \\ \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (\text{V.16})$$

Où

$$J(q) = \begin{bmatrix} 0 & -\cos(C) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(C) & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(A)\cos(C)(P_z - l + d) & \cos(A)\sin(C)(P_z - l + d) & -\cos(C) & -\cos(A)\sin(C) & -\sin(A)\sin(C) \\ -\sin(A)\sin(C)(P_z - l + d) & \cos(A)\cos(C)(P_z - l + d) & \sin(C) & -\cos(A)\cos(C) & \sin(A)\cos(C) \\ 0 & -\sin(A)(P_z - l + d) + P_y \cos(C) & 0 & \sin(A) & \cos(A) \end{bmatrix} \quad (\text{V.17})$$

Est la matrice jacobienne de la machine Matsuura a exprimée dans le repère pièce du Matsuura MX 330.

## V.5 Application de la Méthode d'optimisation par les réseaux de neurones artificiels pour les Stratégies trochoïdal

La capacité d'apprentissage basée sur l'optimisation d'une fonction d'erreur appropriée est une excellente méthode de performance pour l'approximation des fonctions non linéaires et sont parmi les avantages de l'utilisation de la technique RNA (ANN). Les réseaux de neurones perceptron multicouches ont une meilleure capacité que d'autres techniques à résoudre divers problèmes complexes. MLP est capable à effectuer une correspondance non linéaire entre l'espace d'entrée et l'espace de sortie en raison de sa grande interconnexion parallèle entre différentes couches et des caractéristiques de traitement non linéaires. Le réseau de neurones MLP prend une entrée multidimensionnelle, puis la transmet aux autres neurones en fonction de leur poids. La fonction de transfert d'un réseau MLP, utilise un processus d'apprentissage pour créer une relation entre la sortie et l'entrée. Pour l'entrée d'activation, une fonction de temps est nécessaire [115,116]. Un algorithme de rétro propagation avec un MLP est utilisé pour le présent problème. Le réseau est entraîné avec des données pour un certain nombre de positions cartésiennes et l'orientation des effecteurs terminaux.

La structure du réseau MLP considéré est représentée sur la Figure V.6. Le vecteur de sortie est présenté à un neurone de couche caché dans le réseau via les neurones d'entrée. Chaque neurone d'une couche est connecté à chaque neurone de la couche suivante. Le réseau utilise un apprentissage superviseur, dans lequel une entrée est présentée au réseau avec la sortie désirée et les poids sont ajustés de sorte que le réseau tente de produire la sortie désirée.

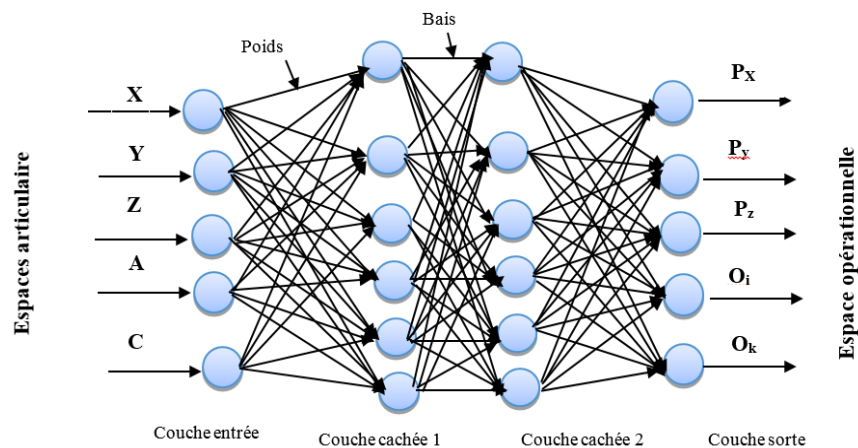


Figure V.6 : Structure de perceptron multicouche MLP

### V.5.1 Formulation du réseau perceptron multicouche

Le modèle MLP implique une couche d'entrée et une couche de sortie, généralement une ou plusieurs couches cachées [117]. La Figure V.7 montre l'architecture du réseau multicouche perceptron utilisé pour l'estimation de l'espace articulaire incrémental. Il a une couche d'entrée de cinq neurones ; une couche cachée de 25 neurones avec la fonction d'activation sigmoïde ( $\varphi$ ) définie par Eq. (V.17):

$$\varphi = \frac{1}{1 + \exp(-y)} \quad (V.18)$$

Où  $y$  est l'entrée.

Pour la couche de sortie, une fonction d'activation non linéaire (sigmoïde) est utilisée dans l'implémentation. La fonction d'approximation cinématique inverse  $CI(ws)$ , représentant la solution  $CI$  est définie par des équations (V.19) et (V.20). L'algorithme d'apprentissage du réseau MLP comprend l'utilisation des données d'entrée-sortie pour calculer les biais et les poids. La fonction d'entraînement met à jour les poids et les valeurs de biais en fonction de l'algorithme de descente de gradient [116.110].

$$CI(ws) = \phi \left[ \sum_{j=1}^m A_j(ws) w_2(j) + b_2(1) \right] \quad (V.19)$$

$$A_j(ws) = \varphi \left[ \sum_{k=1}^n W_s(k) W_1(k, j) + b_i(j) \right] \quad (V.20)$$

Où  $\varphi$  est la fonction d'activation non linéaire sur la couche de sortie.

$W_s(k)$  est le  $k_i$  ème élément du vecteur d'entrée  $ws$ .

$M$  est le nombre de neurones de couche cachés.

L'organigramme du réseau neuronal de perceptron multicouche est représenté sur la Figure V.7.

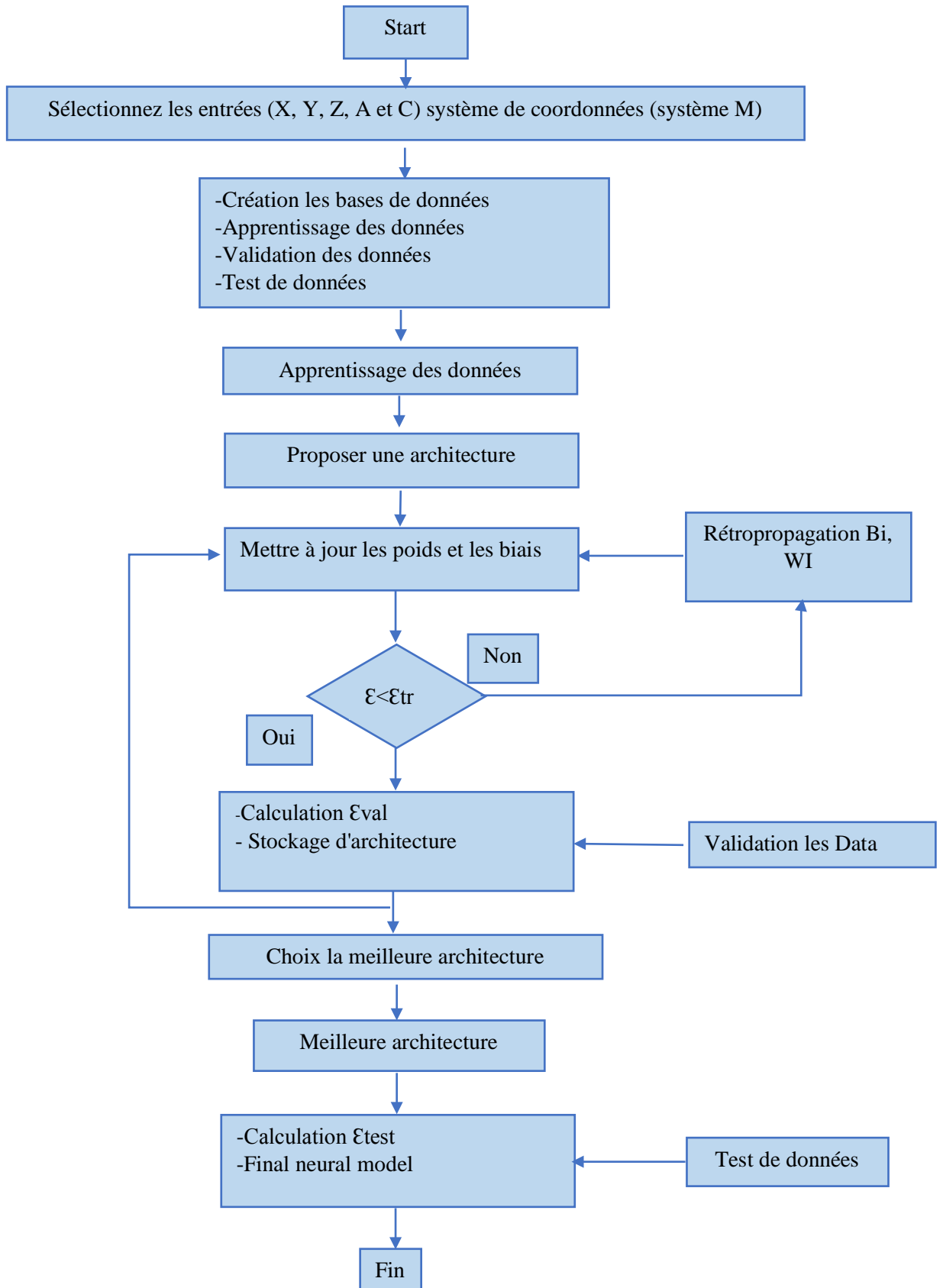


Figure V.7 : Organigramme du réseau de neurones MLP

### V.5.2 Stratégie trochoïdal

L'usinage trochoïdal est un type de trajectoire d'usinage émergent grâce à l'augmentation des performances des moyens de fabrication. Le principe d'une courbe trochoïdale est de faire décrire à l'outil de coupe une courbe de courbure continue, lui évitant ainsi de travailler en pleine matière. D'un point de vue mathématique, on désigne par trochoïde la courbe obtenue par la combinaison d'un mouvement circulaire uniforme et d'un mouvement linéaire uniforme. Par exemple, sur la Figure (V.8), le point B tourne de manière uniforme autour du point A, lui-même étant animé d'un mouvement linéaire

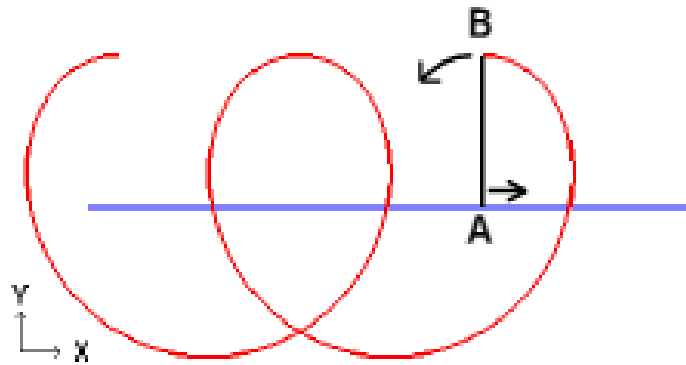


Figure V.8 : Mouvement trochoïdal

Une équation paramétrée d'une trochoïde est donnée en coordonnées cartésiennes par le système d'équations (V.20), en utilisant les paramètres suivants : V, vitesse du centre du cercle dans son mouvement rectiligne uniforme, R, rayon du cercle ( $R > 0$ ),  $\omega$  pulsation ( $\omega > 0$ ) et t, paramètre de la courbe ( $t > 0$ ).

$$\begin{cases} x = V.t + R.\cos(\omega.t) \\ y = R \sin(\omega.t) \end{cases} \quad (V.20)$$

Le principal atout du parcours trochoïdal (Figure V.9) est de présenter un rayon de trajectoire continu. On prend  $t=0.2$  (précision, sans unité), réduire pour affiner la trajectoire, augmenter pour réduire le nombre de points. Un graphe représentant quelques points est représenté permettant de contrôler la courbure des segments de la trochoïde.

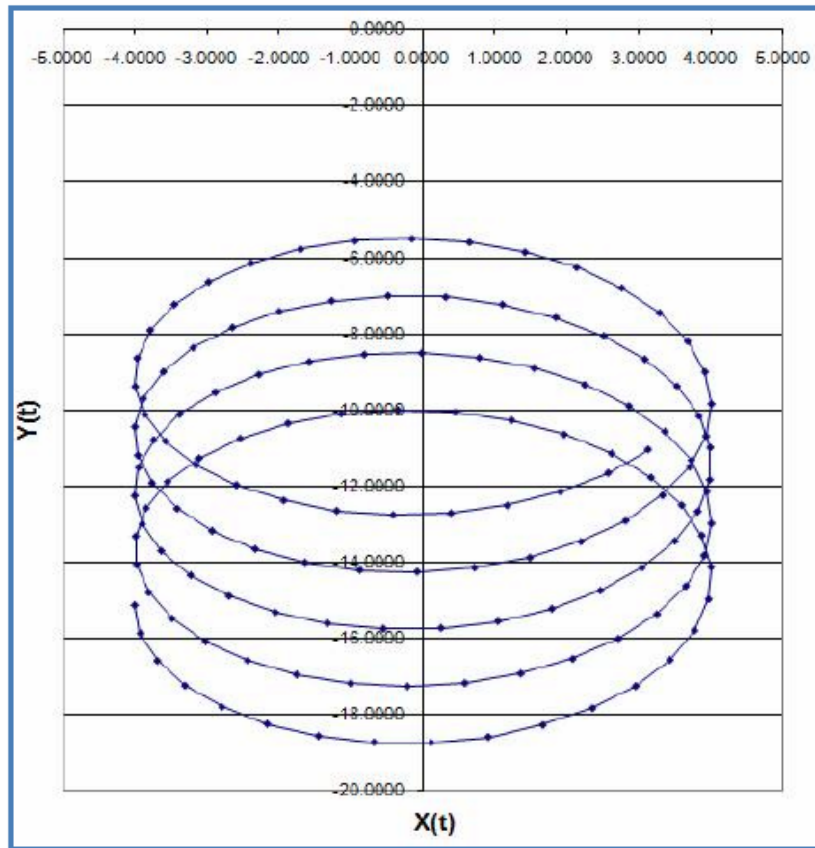


Figure V.9 : Vérification de la courbure de la trajectoire

Dans cette étude nous avons proposé une méthode pour optimiser la trajectoire d'usinage trochoïdal, cette méthode basée à l'aide de réseau de neurone (RN). Les réseaux de neurones nécessitent toujours, avant de devenir efficaces et performants, un entraînement avec l'aide d'une base de données. Cette base de données contient des paramètres topologiques, géométriques et technologiques, mais également l'association avec sa stratégie d'usinage trochoïdal. Cette base de données est en quelque sorte le savoir-faire industriel numérisé du machiniste et du programmeur CN. Plus cette base de données n'est grande, meilleures sont les chances du réseau d'obtenir un meilleur apprentissage.

### V.5.2.1 Usinage UGV d'Ebauche sur Machine CNC Application De La Stratégie Trochoïdal.

Cette application vise à évaluer le potentiel du vidage de poche en ébauche pour le rainurage dans des alliages d'aluminium. La machine outils utilisée est une matsuura MX330.

Les résultats de cette étude conduisent à une meilleure connaissance de cette nouvelle stratégie d'usinage, en vue de son application au fraisage d'ébauche d'alliages légers.

La Caractéristiques concernant de la Fraise et Rainure :

**Diamètre de la fraise (mm) = 20**

**Largeur de la rainure (mm) = 28**

**Longueur de la rainure (mm) = 120**

**Pas (mm) = 1.5**

Les figures (V.10 et V.11) montrent respectivement la définition du pas de l'outil et la définition de la pièce.

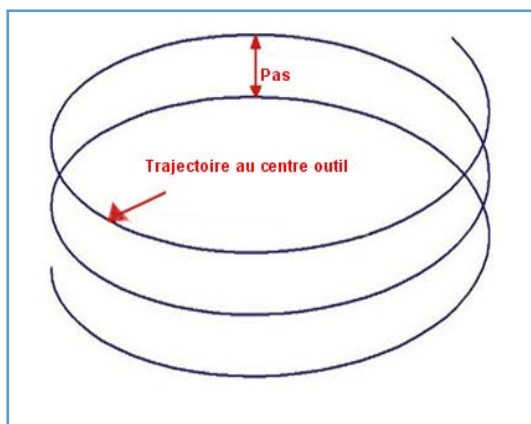


Figure V.10- Définition du pas d'outil



Figure V.11- Définition de la pièce

En utilisant le logiciel Matlab Inc., et après exécution du programme dédié à la génération du trajet (cas rainure linéaire) on obtient : (Figure V.12).

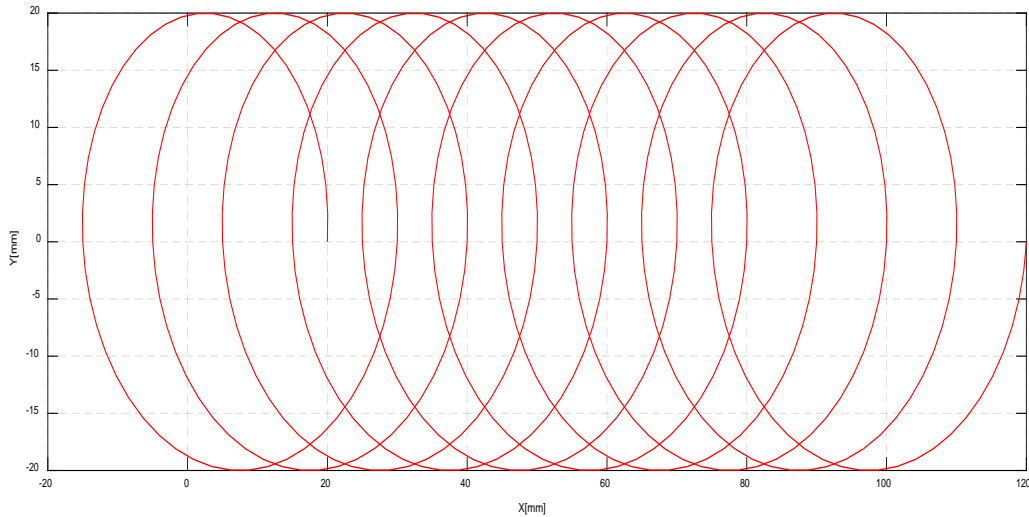


Figure V.12- Représentation de la trajectoire d'outils

La Figure (V.12) montre le parcours d'outil en stratégie trochoïdal

### V.5.3 Résultats et discussions :

Pour valider les performances du MLP en cas de problème de cinématique inverse, la simulation sont réalisées à l'aide de MATLAB. Dans ce travail, les données d'apprentissage sont générées à l'aide des équations (V.18) et (V.19). Un amusement de données de 3125 points a d'abord été généré selon la formule pour les coordonnées des paramètres d'entrée (X, Y, Z et A, C) en mm. Cet ensemble de données est divisé de manière aléatoire en ensembles de formation, de validation et de test, 1042 points de données sont utilisés comme données d'apprentissage, 1040 sont utilisés pour tester MLP et le reste est utilisé pour l'ensemble de validation. La technique de rétropropagation est employée pour former le réseau MLP et pour mettre à jour les poids de couche. La formulation MLP est une formulation généralisée et pourrait être utilisée pour résoudre le problème de la cinématique directe et inverse du manipulateur de n'importe quelle configuration. Cependant, une configuration cinématique directe a été considérée dans le présent travail pour illustrer l'applicabilité du modèle MLP. Les Figure V.13 à 17, représente les performances des réseaux neurones ont été mesurées en tant que différence entre la sortie du système désirée et la sortie réelle. Pour conduire la machine-outil à suivre une trajectoire désirée, il sera nécessaire de diviser le chemin en petites portions et de déplacer la machine-outil à travers tous les points intermédiaires. Pour accomplir cette tâche à chaque emplacement



intermédiaire, les équations CI de Machine-outil sont résolues, un ensemble de variables communes est calculé et le contrôleur est orienté pour conduire la machine-outil au segment suivant. Lorsque tous les segments sont complétés, les figures V.13 à figures V.17 montrent le suivi de la trajectoire analytique pour le Matsuura Mx330 à 5 axes dans les axes X, Y, Z, A et C.

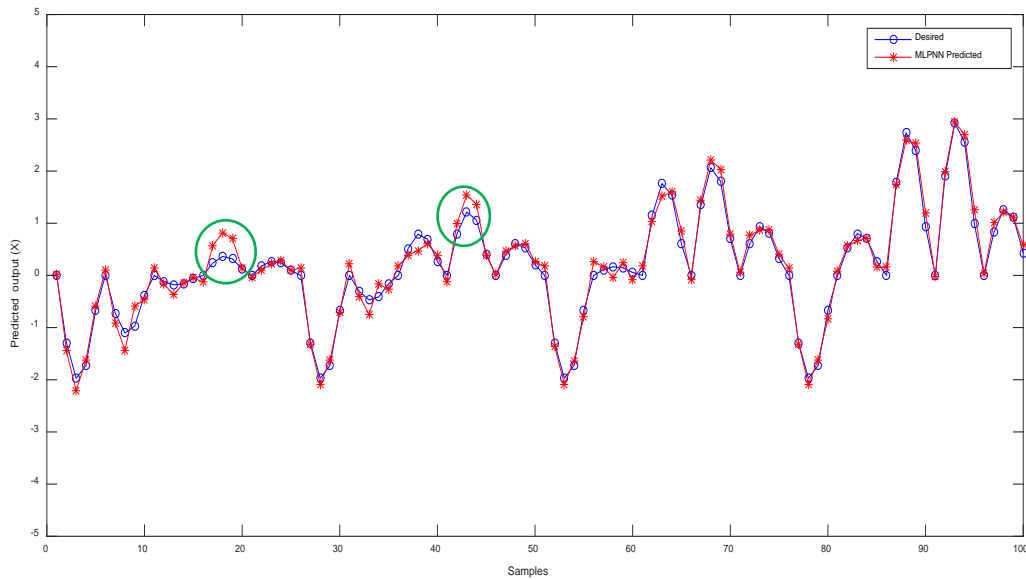


Figure V.13 Désirées et prédites de l'axe X

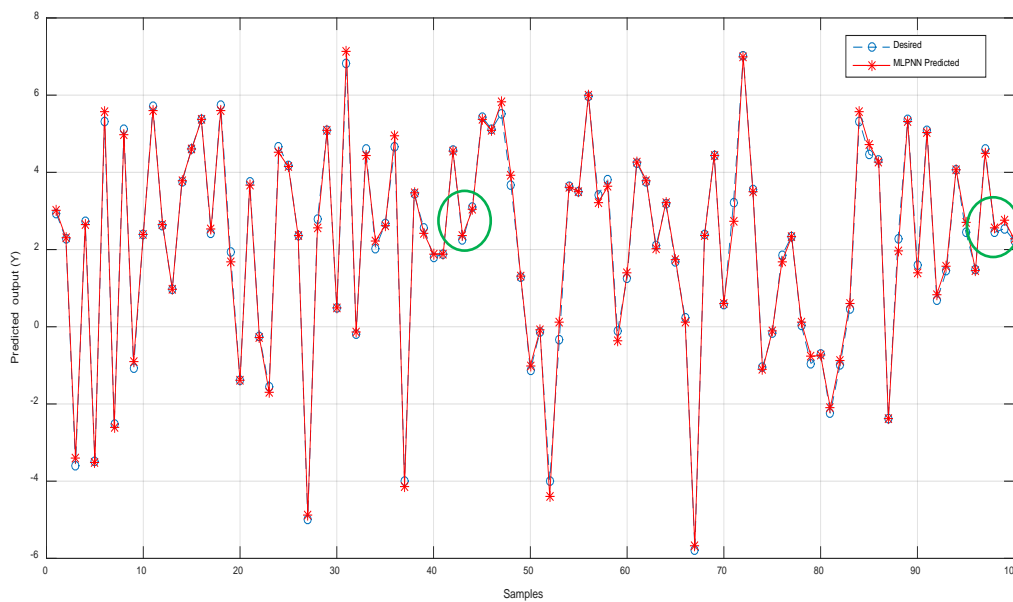


Figure V.14 Désirées et prédites de l'axe Y

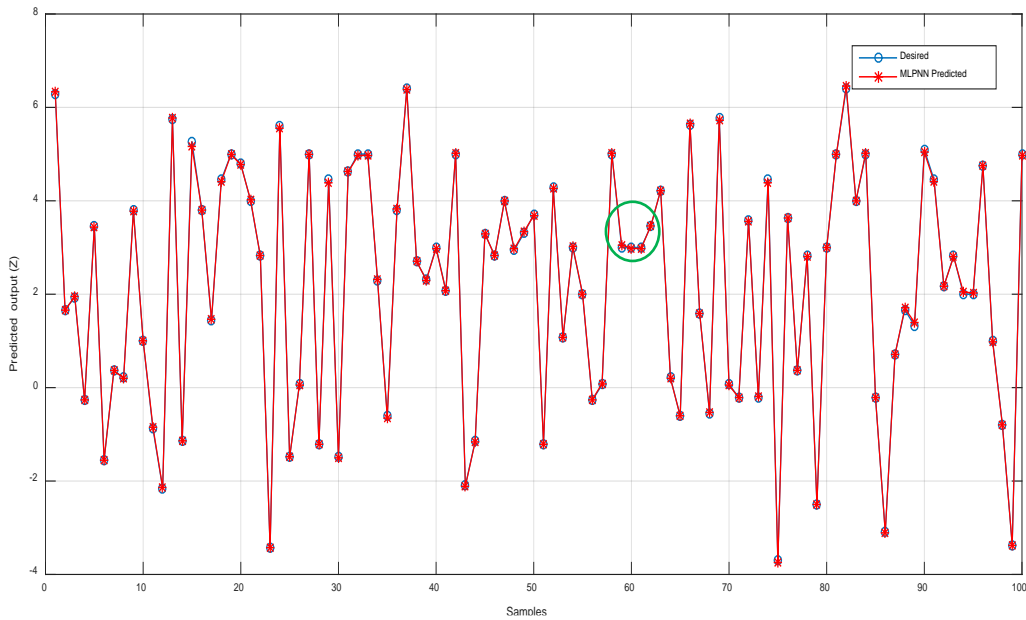


Figure V.15 Désirées et prédites de l'axe Z

Les figures V.10 à V.13 montrent une très bonne adéquation entre le modèle et la mesure. L'erreur la chute du déplacement de l'outil sur la trajectoire trochoïdal est inférieure à 1% dans la majorité des cas. Donc une Bonne fidélité des profils mesurés et simulés sur le déplacement suivent l'axes (X, Y, Z)

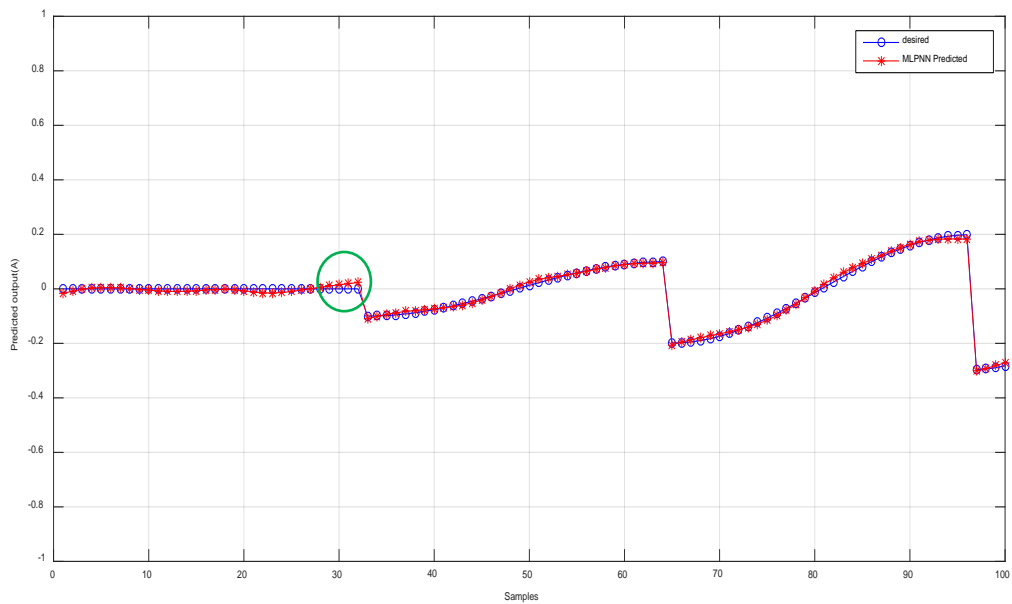


Figure V.16 Désirées et prédites de l'axe A

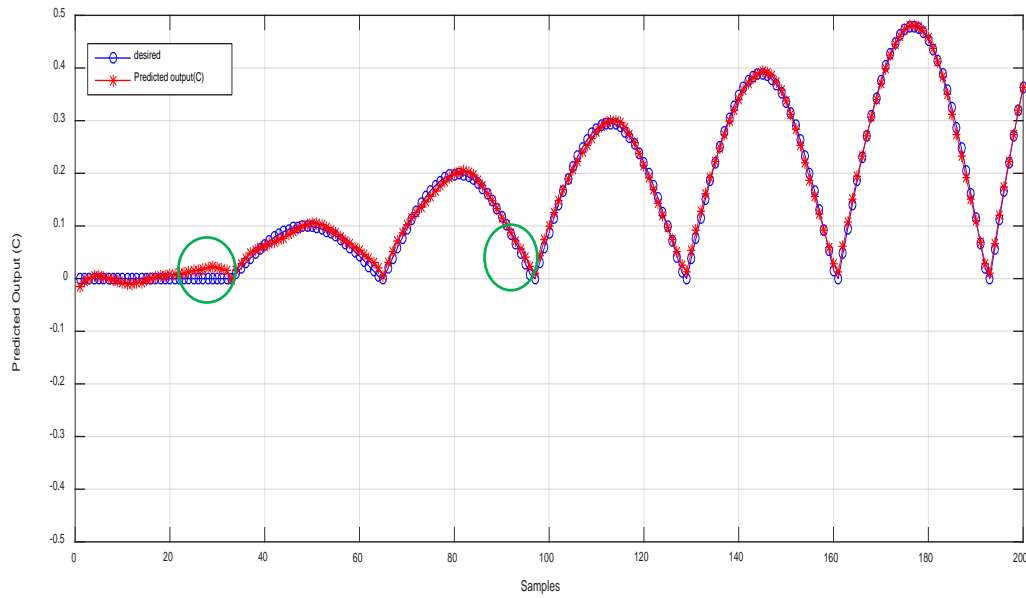


Figure V.17 Désirées et prédites de l'axe C

Les figures V.14 et V.15 montrent une très bonne adéquation entre le modèle et la mesure. L'erreur l'écroulement de l'orientation de l'outil sur la trajectoire trochoïdal est inférieure à 0.5%. Donc une Bonne fidélité des profils mesurés et simulés sur l'orientation suivent l'axe (A et C).

La Figure V.18 montre le meilleur modèle sélectionné en utilisant la technique de validation croisée pour l'axe des abscisses de coordonnées d'entrée, l'erreur de validation est représentée sur l'axe des ordonnées et le nombre d'itérations est tracé sur l'axe de X. Puisque nous avons effectué une recherche heuristique afin de trouver le meilleur nombre de neurones dans les première et deuxième couches cachées et les valeurs de quantité de mouvement et d'apprentissage nous avons utilisé une nouvelle variable, qui est le nombre d'itérations, pour compter les itérations faites par l'algorithme pour ajuster les paramètres du modèle MLP.

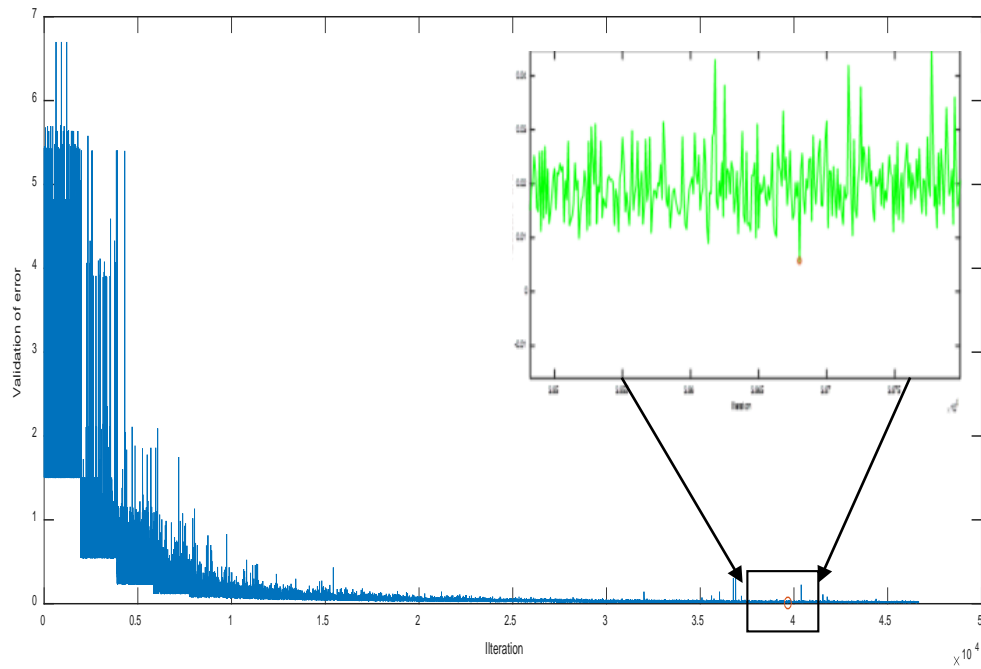


Figure V.18 : Erreur de validation de l'axe X

Le meilleur modèle correspond à l'erreur de validation la plus faible (0,0052), dans ce cas nous trouvons un nombre de neurones de 25 et 11 pour les couches cachées de remorquage respectivement, et une valeur de mouvement de 0,3000 et un taux d'apprentissage de 0,1100. Le meilleur modèle MLP utilise les paramètres sélectionnés pour calculer l'erreur de test (0.0053). Les résultats des autres paramètres d'entrée sont illustrés dans le tableau V.3

Tableau V. 3 : Les paramètres MLP obtenus

		X-axe	Y-axe	Z-axe	A- axe	C-axe
Base de données	Base de l'apprentissage	1042	1042	1042	341	341
	Base de test	1042	1042	1042	341	341
	Base de validation	348	348	348	341	341
Nombre de neurones	Couches d'entrée	5	5	5	2	2
	Couche Caché 1	25	22	18	10	6
	Couche Caché 2	11	11	16	14	12
	Couche sortie	1	1	1	1	1
Pas d'apprentissage	LR	0.1100	0.7100	0.7100	0.6100	0.4100
Momentum	MU	0.3000	0.8000	0.1000	0.7000	0.9000
MSE-validation		0.0052	0.0057	0.0052	$1.967 \cdot 10^{-4}$	$1.943 \cdot 10^{-4}$
MES-Test		0.0053 <b>0.53%</b>	0.0053 <b>0.53%</b>	0.0061 <b>0.61%</b>	$1.236 \cdot 10^{-4}$ <b>0.0123%</b>	$0.982 \cdot 10^{-4}$ <b>0.01%</b>

## **V.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présente une nouvelle approche pour prédire des solutions d'erreurs cinématiques dans une machine à cinq axes pour la stratégie de fraisage trochoïdal. Cette approche est basée sur le réseau neuronal artificiel (RNA) pour la stratégie d'usinage par fraisage trochoïdal. Dans cette étude nous allons proposer un modèle de perceptron multicouche (MLP) pour trouver la solution cinématique inverse pour une machine à cinq axes. Les ensembles de données pour le modèle de réseau neuronal sont obtenus en utilisant la modélisation cinématique. La solution de chaque réseau neuronal est estimée en utilisant l'équation cinématique inverse de la machine-outil pour sélectionner la meilleure. En conséquence, la mise en œuvre du réseau neuronal améliore la performance du processus d'apprentissage. Pour cela, l'étude numérique de la stratégie trochoïdale et les résultats expérimentaux seront présentés dans le but de moudre complètement et d'assurer un contrôle de l'engagement radial.

# Conclusion générale

Ce travail de recherche est effectué dans le cadre de l'optimisation du processus d'usinage dans le cas de l'évidement des cavités de contours ouvert en ébauche sur machines à 5 axes. Il présente une approche pour prédire des solutions d'erreurs cinématiques par la génération d'un algorithme d'optimisation par les réseaux de neurones pour l'usinage de poches ouvertes de contours de précision haute performance sur les machines à cinq axes par les stratégies émergentes dites trochoïdales. La méthode est basée sur la résolution de la cinématique inverse en utilisant un réseau neuronal artificiel. Un nouveau design des réseaux de perceptrons multi-couches ont été proposés pour l'optimisation des erreurs cinématiques de la machine cinq axes. Nous avons observé que la MLP donne une erreur quadratique moyenne minimale pour la résolution et joint les variables en tant qu'indice de performance. La position de l'outil et de la rotation commune du réseau neuronal modèle de prédiction peut être un outil utile pour les ingénieurs de production pour estimer le mouvement de la machine 5 axes avec précision.

La stabilité du processus d'usinage par la stratégie trochoïdale est prédite en obtenant le meilleur modèle sélectionné en utilisant la technique de validation croisée pour les coordonnées d'entrée des axes X-Y-Z réalisée par l'algorithme du modèle MLP. La méthode est basée sur la résolution de la cinématique inverse en utilisant un réseau neuronal artificiel. Basée sur le modèle de stabilité proposé, la stratégie trochoïde d'optimisation pour l'évidement de poche ouverte est développée pour améliorer l'efficacité d'usinage du fraisage trochoïdale sous d'autres paramètres dans une situation donnée. Les expériences sont effectuées avec un test de pièce pour montrer l'efficacité de l'usinage modèle de stabilité par la stratégie trochoïdale proposée. Enfin, des simulations réalisées pour illustrer la stratégie d'optimisation.

D'une manière générale et en perspectives, il serait intéressant de chercher de nouvelles stratégies pour l'usinage de cavités vue la complexité des formes exigées par les progrès d'innovation dans le domaine de fabrication de moules.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] PRAT, David. Développement et modélisation de stratégies de fraisage 5 axes de finition- Application à l'usinage de veines fermées. 2014. Thèse de doctorat. Paris, ENSAM.
- [2] Endl, R., & Jaje, J. des systèmes de FAO et des utilisateurs
- [3] J.N. Lee, R.S . Lee – Interference-free toolpath generation using enveloping element for five-axis machining of spatial cam – Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187–188, pp 10-13
- [4] C.F. You, C.H. Chu – Tool-path verification in five-axis machining of sculptured surfaces – International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 18, pp 148-255
- [5] Y. Hosseinkhani, J. Akbari, A. Vafaeseefat – Penetration–elimination method for five-axis CNC machining of sculptured surfaces – International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47, pp 1625–1635
- [6] Bohez, E. L.J., (2002). Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, Int J Mach Tool Manu, 42(4), 505-520
- [7] <http://www.matsuura.co.jp/english/contents/products/mx-02.html>
- [8] Ho, M. C. (2004). Five-axis machining improvement via cutting error control and tool orientation smoothing (Doctoral dissertation, Taoyuan: National Central University).
- [9] Fan, J. Geometric modelling of 5-axis sculptured surface machining. (PhD Thesis), University of Birmingham, Birmingham, UK (2006).
- [10] Tsutsumi, M. and Saito, A. Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements. International Journal of Machine Tools and Manufacture 44(12-13), (2004),
- [11] [www.matsuura.com](http://www.matsuura.com)
- [12] Hocken, R. J. (1980). Technology of machine tools. Volume 5. Machine tool accuracy (Rapport no UCRL-52960-5 United States Tue Feb 12 15:11:16 EST 2008 NTIS, PC A14/MF A01.LLNL; ERA-06-004014; EDB-81-001927 English).
- [13] Barakat, N. A., Elbestawi, M. A., & Spence, A. D. (2000). Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(6), 833-850. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00098-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00098-X)
- [14] Alami Mchichi, N. (2018). Étalonnage des machines-outils à cinq axes : configuration optimisée des artefacts et de la séquence de mesure de la méthode SAMBA en vue d'une estimation efficace des erreurs géométriques (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).



- [15] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:230:-1:ed-3:v1:fr:sec:A>
- [16] Liebrich, T., Bringmann, B., & Knapp, W. (2009). Calibration of a 3D-ball plate. *Precision Engineering*, 33(1), 1-6. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.02.003>
- [17] D. A. Dornfeld and D.-E. Lee, *Precision manufacturing* Springer US, 2008
- [18] Slocum, A. H. *Precision machine design: Dearborn, Mich. : Society of Manufacturing Engineers, c1992*
- [19] H. Schwenke et al., "Geometric error measurement and compensation of machines—An update," vol. 57, no. 2, p. 660-675, 2008
- [20] Rauch, M., Xu, X., 2010. Five-axis machining: Technologies and challenges. *Int. J. Manuf. Res.* 5,327–352. doi:10.1504/IJMR.2010.033470
- [21] Castagnetti, C. CASTAGNETTI (2008). Amélioration du comportement cinématique des machines par l'optimisation des trajets d'usinage 5 axes. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, Nov 2008.
- [22] W. ANOTAIPAIBOON, S. S. MAKHANOV et E. BOHEZ 2006. Optimal setup for five-axis machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46:964–977
- [23] Rauch, M., Laguionie, R., Hascoet, J. Y., & Suh, S. H. (2012). An advanced STEP-NC controller for intelligent machining processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 375-384.
- [24] Lavernhe, S., Tournier, C., & Lartigue, C. (2006, June). Model for performance prediction in multi-axis machining. In *CIRP 2nd International Conference High Performance Cutting* (p. 9p)
- [25] Uddin, M. S., Ibaraki, S., Matsubara, A., & Matsushita, T. (2007). Prediction of Machining Accuracy of 5-Axis Machine Tools with Kinematic Errors. In *Proceedings of the 35th International MATADOR Conference* (pp. 285-288). Springer, London.
- [26] Tae, D. B., So, B. S., Jung, Y. H., & Cho, Y. J. (2007). A generic inverse kinematics model using the orthogonal characteristics of five-axis machine joints.
- [27] Munlin, M. A. (2004). Virtual Five-Axis Milling Machine: Tool Path Generation and Simulation. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 9(1), 1-11.
- [28] Chiou, J. C., & Lee, Y. S. (2007). Five-axis high speed machining of sculptured surfaces by surface-based NURBS path interpolation. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 639-648.
- [29] Yang, X. J., Sun, G. Y., & Li, Q. (2010). A new NURBS tool path generation algorithm for precise sculptured surface machining. In *Advanced Materials Research* (Vol. 97, pp. 2477-2480). Trans Tech Publications.

- [30] Xia, J., & Ge, Q. J. (2001). An exact representation of effective cutting shapes of 5-axis CNC machining using rational Bézier and B-spline tool motions. In *Robotics and Automation*, 2001.
- [31] Chu, C. H., & Chen, J. T. (2006). Tool path planning for five-axis flank milling with developable surface approximation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(7-8), 707.
- [32] My, C. A., Bohez, E. L., Makhanov, S. S., Munlinb, M., Phien, H. N., & Tabucanon, M. T. (2009). On 5-axis freeform surface machining optimization: vector field clustering approach. *International Journal of CAD/CAM*, 5(1).
- [33] Yun, J. D., Jung, Y. H., Tae, D. B., & Lee, J. G. (2009). A Geometric Postprocessing Method Using Joint Positions of a 5-Axis Machine. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (Vol. 2)*.
- [34] Lartigue, C., Thiebaut, F., & Maekawa, T. (2001). CNC tool path in terms of B-spline
- [35] Jha, R. K., Singh, B., & Pratihari, D. K. (2005). On-line stable gait generation of a two-legged robot using a genetic-fuzzy system. *Robotics and Autonomous Systems*, 53(1), 15-35. *Computer-Aided Design*, 33(4), 307-319
- [36] Lo, C. C. (2000). Two-stage cutter-path scheduling for ball-end milling of concave and wall-bounded surfaces. *Computer-Aided Design*, 32(10), 597-603.
- [37] Terry Lai, Wenhsiang andt Faddis and Robert Sorem. Incremental algorithms for finding the offset distance and minimum passage width in a pocket machining toolpath using the voronoi technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1) : 30–35, 2000. (Pages vii, 13 et 14.)
- [38] Laguionie, R. (2007). *Programmation avancée des machines-outils : implémentation de l'usinage trochoïdal et du tréfilage dans la chaîne numérique STEP-NC* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN) ; Université de Nantes).
- [39] Djassemi, M. (1998). A parametric programming technique for efficient CNC machining operations. *Computers & industrial engineering*, 35(1-2), 33-36.
- [40] Liang, H., & Li, X. (2009, November). A 5-axis Milling System Based on a New G code for NURBS Surface. In *Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 600-606). IEEE
- [41] Ryu, G. S. (2002). Implementation of web-based NC postprocessor builder1. *The journal of the Korean Society for Industrial and Applied Mathematics, IT series*, 6(2), 91-99
- [42] Agrawal, R.K., D.K. Pratihari and A.R. Choudhury, 2006. Optimization of CNC isoscallop free form surface machining using a genetic algorithm. *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 46(7-8): 811-819.

- [43] Chan, F.T.S., T.C. Wong and L.Y. Chan, 2005. A genetic algorithm-based approach to machine assignment problem. *Int. J. Prod. Res.*, 43(12): 2451-2472.
- [44] W. Tfaili. Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique. Thèse de doctorat. Université de Paris 12 - Val de Marne (2007).
- [45] L. Drdi. Les algorithmes génétiques. Thèse de doctorat (2005).
- [46] A. Touil, A. Benderradji. Optimisation des conditions d'usinage en fraisage. Mémoire fin d'étude. Université hadj lakhdar- Batna (2011).
- [47] Shi, X.H., Y.C. Liang, H.P. Lee, C. Lu and Q.X. Wang, 2007. Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP. *Inform. Process. Lett.*, 103(5): 169-176
- [48] Eberhart, R. and J. Kennedy, 1995. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS '95)*, pp: 39-43.
- [49] Kanan, H.R. and K. Faez, 2008. An improved feature selection method based on Ant Colony Optimization (ACO) evaluated on face recognition system. *Appl. Math. Comput.*, 205(2): 716-725
- [50] Dorigo, M. and C. Blum, 2005. Ant colony optimization theory: A survey. *Theor. Comput. Sci.*, 344(2-3): 243-278.
- [51] Chandra Mohan, B.C. and R. Baskaran, 2012. A survey: Ant colony optimization based recent research and implementation on several engineering domain. *Expert Syst. Appl.*, 39(4): 4618-4627.
- [52] Kanan, H.R. and K. Faez, 2008. An improved feature selection method based on Ant Colony Optimization (ACO) evaluated on face recognition system. *Appl. Math. Comput.*, 205(2): 716-725.
- [53] Yang, J. and Y. Zhuang, 2010. An improved ant colony optimization algorithm for solving a complex combinatorial optimization problem. *Appl. Soft Comput.*, 10(2): 653-660.
- [54] Ghosh, N., Y.B. Ravi, A. Patra, S. Mukhopadhyay, S. Paul, A.R. Mohanty and A.B. Chattopadhyay, 2007. Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion. *Mech.Syst. Signal Pr.*, 21(1): 466-479
- [55] El-Mounayri, H., H. Kishawy and J. Briceno, 2005. Optimization of CNC ball end milling: A neural network-based model. *J. Mater. Process. Tech.*, 166(1): 50-62.
- [56] F. Cus, J. Balic. Optimization of cutting process by GA approach. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 19 ,113–121, (2003).

- [57] R. Q. Sardiñas, M. R. Santana, E. A. Brindis. Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19, 127–133, (2006).
- [58] T. Ameer. Optimisation des conditions de coupe en utilisant le calcul évolutionnaire. Mémoire de magistère. Université Mohamed Khider - Biskra (2005).
- [59] L. Gao, J. Huang, X. Li. An effective cellular particle swarm optimization for parameters optimization of a multi-pass milling process. *Applied Soft Computing* 12, 3490–3499, (2012).
- [60] K. Vijayakumar, G. Prabhakaran, P. Asokan, R. Saravanan. Optimization of multi-pass turning operations using ant colony system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 43, no 15, pp 1633-1639. (2003).
- [61] J. Wu, Y. Yao. A modified ant colony system for the selection of machining parameters. *Seventh International Conference on Grid and Cooperative Computing*, pp89-94, DOI 10.1109/GCC.64 (2008)
- [62] F. Cüs, J. Balic, U. Züperl. Hybrid ANFIS-ants system based optimization of turning parameters. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol 36, no 1, pp 79-86 (2009).
- [63] Alavandar, S., & Nigam, M. J. (2008). Neuro-fuzzy based approach for inverse kinematics solution of industrial robot manipulators. *International Journal of Computers Communications & Control*, 3(3), 224-234
- [64] Ahmad, Z., & Guez, A. (1990, May). On the solution to the inverse kinematic problem. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings. 1990 IEEE International Conference on* (pp. 1692-1697). IEEE
- [65] Karlik, B., & Aydin, S. (2000). An improved approach to the solution of inverse kinematics problems for robot manipulators. *Engineering applications of artificial intelligence*, 13(2), 159-164.
- [66] Nguyen, L., Patel, R. V., & Khorasani, K. (1990, June). Neural network architectures for the forward kinematics problem in robotics. In *Neural Networks, 1990., 1990 IJCNN International Joint Conference on* (pp. 393-399). IEEE.
- [67] Narooei, K. D., & Ramli, R. (2014). Application of artificial intelligence methods of tool path optimization in CNC machines: A review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(6), 746-754.
- [68] Jahanpisheh, H. V., VUE, M. P. E. E. E., & L'OBTENTION, D. E. (2007). An Optimal Post-processing Module for Five-axis CNC Milling Machines. *École polytechnique*.
- [69] Denhavit, J. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *ASME J. Appl. Mech.*

- [70] Olabi, A. (2011). Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [71] Whitney, D. E. (1972). The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 94(4), 303-309.
- [72] Pieper D.L., "The kinematics of manipulators under computer control", Ph. D. Thesis, Stanford University, 1968
- [73] Roth B., "Performance evaluation of manipulators from a kinematic viewpoint", Cours de Robotique, IRIA, Toulouse, 1976, p. 233-263
- [74] Lee H.Y, Liang C.G., "Displacement analysis of the general 7-link 7R mechanism", *J. of Mechanism and Machine Theory*, Vol. 23(3), 1988, p. 219-226
- [75] Raghavan M., Roth B., "Inverse kinematics of the general 6R manipulator and related linkages", *Trans. of the ASME, J. of Mechanical Design*, Vol. 115, 1990, p. 502-508.
- [76] Paul R.C.P., *Robot manipulators: mathematics, programming and control*, MIT Press, Cambridge, 1981.
- [77] Khalil W., Dombre E., *Modelisation, identification and control of robots*, Hermes Penton Science, London, ISBN 1-90399-613-9, 2002, 480 p.
- [78] Pechard, P. Y. (2006). Usinage de pieces de formes complexes: méthode de choix de stratégie d'usinage UGV. Master de sciences et technologies, LURPA.
- [79] Marshall, S., & Griffiths, J. G. (1994). A survey of cutter path construction techniques for milling machines. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 32(12), 2861-2877.
- [80] Tan, S. T., Sze, W. S., & Wong, W. Y. (1990). A survey and classification of cutter path generation methods for three-axis NC milling. *Advanced manufacturing engineering*, 2(2), 103-113.
- [81] Bobrow, J. E. (1985). NC machine tool path generation from CSG part representations. *Computer-aided design*, 17(2), 69-76.
- [82] Loney, G. C., & Ozsoy, T. M. (1987). NC machining of free form surfaces. *Computer-Aided Design*, 19(2), 85-90.
- [83] Hwang, J. S. (1992). Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces. *Computer-aided design*, 24(12), 667-676.
- [84] Kim, K., & Ko, B. (1994). Generating Cartesian NC tool paths for sculptured surface manufacture. *Computers & industrial engineering*, 26(2), 359-367.
- [85] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation de commande numérique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation_de_commande_numérique).
- [86] Lavernhe, S. (2006). Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoires 5 axes UGV (Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan).

- [87] Morishige, K., Ishizuka, S., & Takeuchi, Y. (2007). Development of Tool Fabrication CAD/CAM for Conicoid End Mill. *IJAT*, 1(2), 128-135.
- [88] Chung, Y. C., Park, J. W., Shin, H., & Choi, B. K. (1998). Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC verification. *Computer-Aided Design*, 30(8), 587-594.
- [89] RE Barnhill and SN Kersey. A marching method for parametric surface/surface intersection. *Computer Aided Geometric Design*, 7(1) :257–280, 1990. (Page 18.).
- [90] Robert E Barnhill, Gerald Farin, M Jordan, and Bruce R Piper. Surface/surface intersection. *Computer Aided Geometric Design*, 4(1) :3–16, 1987. (Pages 18, 37, 69 et 78.)
- [91] [Zhu, 1993] Cui Zhu. How to obtain a good surface finish in nc machining of free-formed surfaces. *Computers in industry*, 23(3) :227–233, 1993. (Page 21.).
- [92] Chen YJ, Ravani B, Offset surface generation and contouring in computer aided design. *ASME Journal of mechanisms, transmissions and automation in design*. Vol 109, pp 132-142, 1987).
- [93] Hwang JS, Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces. *Computer-Aided Design*, Vol 24, No 12, pp 667 -676, 1992.
- [94] Sundararajan V, Wright PK, Volumetric feature recognition for machining components, *Computer-Aided Design*, Vol 36, pp 11-25, 2004
- [95] Chen YH, Lee YS and Fang SC, Optimal cutter selection and machining plane determination for process planning and NC machining of complex surfaces, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 5, 1998
- [96] Lee YS, Choi BK and Chang TC, Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining, *International journal of production research*, Vol. 30, No. 06, 1992.
- [97] Dahmane N, Optimisation des opérations d'ébauche dans le cas du fraisage dans la masse, Thèse de Doctorat ENSAM Paris, No. 93-05, 1993
- [98] SUNA G, SEQUINB CH and WRIGHT PK, Operation decomposition for free form surface features in process planning, *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp 621-636, 2001.
- [99] Held M, A geometry based investigation of the toll path generation for zig-zag pocket machining – *Visual Computing*, Vol. 7, No 5/6, pp 399-407, 1995.
- [100] Park, S. C., & Choi, B. K. (2000). Tool-path planning for direction-parallel area milling. *Computer-Aided Design*, 32(1), 17-25.
- [101] Park SC, Choi BK, Uncut Free Pocketing Tool-Paths Generation using Pair-Wise Offset Algorithm, *Computer-Aided Design*, Vol 33, No 10, pp 739-746, 2001.
- [102] C. Touzet, «Les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme ». Préface de Jeanny Hérault, EC2 éd. France. 1992.
- [103] F. Moutarde « Introduction aux réseaux de neurones ». Centre de Robotique (CAOR), Ecole des Mines de Paris. Avril 2007.

- [104] M. Yessin AMMAR «Mise en oeuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition Batch/Continu». Thèse de Doctorat de l'I.N.P. Toulouse. Juillet 2007.
- [105] Marc Parizeau « Réseaux de neurones » Thèse doctorat. Université LAVAL. 2004.
- [106] Ferroudji, K. (2010). Classification des particules par ultrason et réseaux de neurones artificiels (Application aux embolies) (Doctoral dissertation, Université ElHadj Lakhdar de Batna.
- [107] M. Verleysen and K. Hlavačková, «An Optimised RBF Network for Approximation of Functions». In: Proc of European Symposium on Artificial Neural Networks, Brussels (Belgium), April 1994.
- [108] Charles Pelletier, « Classification des sons respiratoires en vue d'une détections automatique des sibilants». Université du Québec. 2006
- [109] S. Haykin, « Neural Networks a Comprehensive Foundation », Prentice-Hall Inc, second edition. 1999.
- [110] J. Moody, C. J. Darken, « Fast learning in networks of locally-tuned processing units», Neural Comput. 1, 281–294. 1989.
- [111] A. Saha, J. D. Keeler, «Algorithms for Better Representation and Faster Learning in Radial Basis Function Networks», Advances in Neural Information Processing Systems 2, Edited by David S. Touretzky, pp. 482–489, 1989.
- [112] Nabil Benoudjit and Michel Verleysen, « On the Kernel Widths in Radial-Basis Function Networks ». Université Catholique de Louvain Neural processing letters ISSN 1370-4621. vol. 18, no2, pp. 139-154. Belgique. 2003
- [113] NF ISO 10791-6 (2014). Conditions d'essai pour centres d'usinage – Partie 6 : Précision des vitesses et interpolations
- [114] NF ISO 841 (2004). Systèmes d'automatisation industrielle et intégration - Commande numérique des machines, système numérique de coordonnées et nomenclature du mouvement.
- [115] Panchanand, Jha, and Biswal, B.B., (2014). A neural network approach for inverse kinematic of a SCARA manipulator, International Journal of Robotics and Automation (IJRA), 3(1), 52-61
- [116] Feng, Y., Yao-nan, W. and Yi-min, Y, (2014). Inverse kinematics solution for robot manipulator based on neural network under joint subspace, Int J Comput Commun, 7(3), 459-472.
- [107] Chiddarwar, S.S. and Babu, N.R., (2010). Comparison of RBF and MLP neural networks to solve inverse kinematic problem for 6R serial robot by a fusion approach, Engineering applications of artificial intelligence, 23(7), 1083-1092
- [118] Lin, YI, and Shen, Y., (2003). Modelling of five- axis machine tool metrology models using the matrix summation approach, Int J Adv Manuf Technol., 21(4), 243-248

**الخلاصة:** إن التنبؤ بدقة المعالجة الآلية لأداة الماكينات ذات خمسة محاور هي عملية حيوية في التصنيع الدقيق لتصنيع أسطح صلبة وحررة. يقدم هذا العمل منهجاً جديداً للتنبؤ بالحلول المتعلقة بالأخطاء الحركية في ماكينة مكونة من خمس محاور إستراتيجية trochoidal. ويستند هذا النهج على الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) لاستراتيجية بالقطع trochoidal. اقترحنا نموذج perceptron متعدد الطبقات (MLP) لإيجاد حل kinematics معكوس لآلة مكونة من خمسة محاور. يتم الحصول على مجموعات البيانات لنموذج الشبكة العصبية باستخدام برنامج kinematics. يتم تقدير حل كل شبكة عصبية باستخدام معادلة الحركة الحركية للأداة الآلية لاختيار أفضل جهاز. ونتيجة لذلك ، يحسن تنفيذ الشبكة العصبية من أداء عملية التعلم. لهذا ، تم تقديم دراسة رقمية لاستراتيجية trochoidal والنتائج التجريبية مع أهداف لطحن كامل وضمان مراقبة الاشتباك الشعاعي. النتيجة التجريبية تبين كفاءة الطريقة عن طريق الحصول على

كلمات البحث: آلة خمسة محاور، الأخطاء الحركية ، لشبكة العصبية ANN ، استراتيجية بالقطع trochoidal

**Abstract:** The prediction of machining accuracy of a five-axis machine tool is a vital process in precision manufacturing for machining a hard and free form surfaces. This work presents a novel approach for predicting kinematic errors solutions in five-axis machine for trochoidal milling strategy. This approach is based on Artificial Neural Network (ANN) for trochoidal milling machining strategy. We proposed a multi-layer perceptron (MLP) model to find the inverse kinematics solution for a five-axis machine. The data sets for the neural-network model are obtained using kinematics software. The solution of each neural network is estimated using inverse kinematics equation of the machine tool to select the best one. As a result, the Neural Network implementation improves the performance of the learning process. For this, numerical study of trochoidal strategy and experimental results are presented with aims to full milling and to ensure a control of radial engagement. The experimental result shows the efficiency of the method by obtaining the tool path and the machining possibility of this new type of strategy emerging.

**Key words:** Five-axis machine, kinematic errors, neural network, trochoidal strategy of machining

**Résumé:** La prédiction de la précision d'usinage d'une machine-outil cinq axes est un processus essentiel dans la fabrication de précision pour l'usinage de surfaces de forme dure et libre. Ce travail présente une nouvelle approche pour prédire des solutions d'erreurs cinématiques dans une machine à cinq axes pour la stratégie de fraisage trochoïdal. Cette approche est basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN) pour la stratégie d'usinage par fraisage trochoïdal. Nous avons proposé un modèle de perceptron multicouche (MLP) pour trouver la solution cinématique inverse pour une machine à cinq axes. Les ensembles de données pour le modèle de réseau neuronal sont obtenus en utilisant un logiciel cinématique. La solution de chaque réseau neuronal est estimée en utilisant l'équation cinématique inverse de la machine-outil pour sélectionner la meilleure. En conséquence, la mise en œuvre du réseau neuronal améliore la performance du processus d'apprentissage. Pour cela, l'étude numérique de la stratégie trochoïdale et les résultats expérimentaux sont présentés dans le but de moudre complètement et d'assurer un contrôle de l'engagement radial. Le résultat expérimental montre l'efficacité de la méthode en obtenant

Mots clés: Machine à cinq axes, erreurs cinématiques, réseau de neurones, stratégie d'usinage trochoïdale



