

Visa du chef de département des Sciences

et de la Technologie

Signature:.....

Date:.....

## **Etude numérique des erreurs géométrique d'une machine-outil de type « EMCO PC 155 » dues aux efforts de coupe- cas: fraisage**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de master académique en  
«*Installations Energétiques et turbo machine*»

Encadreur: **Me. MERGHACHE**

**Sidi Mohammed**

Signature:.....

Co-encadreur : **Me. FERNINI Brahim**

Signature:.....

Date:.....

Réalisé par:

Etudiant : **NEGHAZ Oualid**

Signature:.....

Date :.....

Examineur : **KHERRAB. M**

Signature:.....

Date :.....

Membres du jury

**MEDHKOUR. M**     **MAA** *Président*

**KHERRAB.M**     **MAA** *Examineur*

**MERGHACHE.S.M**     **MCB** *Encadreur*

**FERNINI.BM** **MCB** *Co-encadreur*

# *Remerciements*

*La réalisation de ce projet été rendue possible grâce a mon dieu et grâce au  
soutiende Plusieurs personnes que je tiens à remercier.*

*Je tiens à la fin de ce travail à remercier « **ALLAH** » le tout puissant de  
m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.*

*je voudrais exprimer ma reconnaissance à Mon  
encadreur**MERGHACHE Sidi Mohammed**, et Co-encadreur**FERNINI Brahim**  
pour la confiance*

*qu'il m'a témoignée tout au long demon Travail. Sa très grande disponibilité et  
son esprit de critiqueont grandement facilité la Réalisation de ce projet.*

*J'adresse mes remerciements à tous les enseignants, mes collègues, mes amis et  
toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*A mes parents pour leur soutien ET leur affection;*

*a mes frères;*

*a tout mes Amis.*

**Oualid NEGHAZ**

# Nomenclature

## Notations latines

$(x, y, z)$  Coordonnées cartésiennes.

$N$  Fréquence de rotation de l'outil [ $\text{tr min}^{-1}$ ]

$R$  Rayon final de la pièce [mm]

$D$  Diamètre final de la pièce [mm]

$V_c$  Vitesse de coupe [ $\text{tr min}^{-1}$ ]

$V_f$  Vitesse d'avance [ $\text{mm min}^{-1}$ ]

$f_a$  Avance par dent [mm]

$Z$  Nombre de dent

$S_c$  Section du copeau. [ $\text{mm}^2$ ]

$K_C$  La Résistance spécifique à la rupture par compression [ $\text{N mm}^{-2}$ ]

$H_m$  Epaisseur du copeau [mm]

$F_c$  Composante principale d'effort de coupe [N]

$F_A$  Composante axiale d'effort de coupe [N]

$F_R$  Composante radiale d'effort de coupe [N]

## Notation Grecque

$\omega$  Fréquence de rotation de la pièce. [ $\text{tr min}^{-1}$ ]

$a_p$  Profondeur de passe. [mm]

$\sigma_{xx}$  Rectitudes axiale [mm]

$\sigma_{yy}$  Rectitudes horizontale [mm]

$\sigma_{zz}$  Rectitudes verticale [mm]

$\epsilon_{xy}$  Déviations angulaires (lacet) [rad]

$\epsilon_{xz}$  Déviations angulaires (tangage) [rad]

$\epsilon_{xx}$  Déviations angulaires (roulis) [rad]

## Abréviation

MOCN      Machine-outil a commande numérique

CN          Commande numérique

UGV        Usinage a grand vitesse

DCN        Directeur de commande numérique

CNC        Commande numérique calculateur

CAO        Commande assisté par ordinateur

TGI        Transformation géométrique inverse

## List des figures

Figure 1.1 : Vue générale de machines à fraiser .....	11
Figure 1.2 : Centre d'usinage vertical 5 axes avec Station de tournage vertical « KOVOSVIT MAS MCU 1100 VT ».....	12
Figure 1.3 : Première machine-outil à commande numérique .....	13
Figure 1.4 : Architecture globale.....	14
Figure 1.5 : Eléments physiques d'un axe numérique classique. ....	16
Figure 1.6 : Partie commande d'un axe numérique.....	16
Figure 1.7 : Schéma général de l'asservissement d'un axe numérique.....	17
Figure 1.8 : Sous- ensembles technologiques d'un axe numérique.....	17
Figure 1.9 : Adresse informatiques et identificateurs des axes .....	18
Figure 1.10 : Structures des machines-outils: a- Centre de fraisage EMCO Mill E- 350 à 3 axes [S2], b- Centre de fraisage EMCO Mill E-900 à 4 axes[S3], c- Centre de fraisage EMCO MAXX Mill-350 à 5 axes .....	20
Figure 2.1 : Structure de base d'une MOCN avec 3 axes. ....	24
Figure 2.2 : Sources d'erreurs thermiques dans une machine-outil. ....	25
Figure 3.1 : Changement de repère.....	32
Figure 3.2 : La structure de la MOCN, b- La chaîne cinématique de cette machine-outil. ....	35
Figure 3.3 : Liaison linéaire idéale. ....	35
Figure 3.4 : Liaison linéaire réelle. ....	36
Figure 4.1 : Opération de fraisage .....	43
Figure 4.2 : Composantes de l'effort de coupe en fraisage. ....	44
Figure 4.3 : Types d'analyses sous SolidWorks Simulation. ....	46
Figure 4.4 : La fraiseuse verticale du type -EMCO PC Mill 155.....	47
Figure 4.5 : La fraiseuse verticale du type -EMCO PC Mill 155 : a- Modèle géométrique solide, b- Modèle éléments finis. ....	48
Figure 4.6 : Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe $a_p = 0.5$ mm. ....	51

Figure 4.7 : Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe $a_p = 1$ mm .....	53
Figure4.8 : Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe $a_p = 1.5$ mm .....	55
Figure 4.9 : Les Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe $a_p = 2$ mm .....	57
Figure 4.10 : L'évolution de déplacement de la structure en fonction de l'épaisseur moyen du copeau : a- $a_p = 0.5$ mm, b- $a_p = 1$ mm, c- $a_p = 1.5$ mm, d- $a_p = 2$ mm .....	58
Figure 4.11 : L'évolution de déplacement de la structure en fonction de la profondeur de passe : a- suivant X, b- suivant Y, c- suivant $Z_z$ .....	59

## Liste des tableaux

Tableau 01 : Classification des machines-outils. ....	19
Tableau 02 : Valeurs de décalage de l'origine des systèmes .....	36
Tableau 03 : Les paramètres de coupe .....	49
Tableau 04 : La variation de la ponte de déplacement par rapport à l'épaisseur de copeau ....	59
Tableau 05 : Variation du déplacement de l'outil en fonction de profondeur de passe. ....	60
Tableau 06 : Déplacement du bâti en fonction de profondeur de passe.....	60
Tableau 07 : Déplacement du chariot en fonction de profondeur de passe.....	60
Tableau 08 : Déplacement de la table en fonction de profondeur de passe .....	61
Tableau 09 : Déplacement de la pièce en fonction de profondeur de passe.....	61

# Sommaire

1. Remerciement	
2. Dédicaces	
3. Nomenclature	
4. List des figures	
5. Liste des tableaux	
6. INTRODUCTION GENERAL	
CHAPITRE 1 NOTIONS SUR LES MOCN	
1.1. Introduction .....	11
1.2. Etat de l'art sur la machine-outil à commande numérique .....	11
1.2.1. Historique .....	12
1.2.2. Définitions.....	13
1.2.3. Architecture globale d'une MOCN .....	14
1.2.4. Les axes de déplacements.....	15
1.2.4.1. Schéma général de la commande d'un axe.....	15
1.2.4.3. Commande des axes de la machine .....	18
1.2.4.4. Typologie des machines-outils à commande numérique .....	18
1.2.5. La programmation .....	20
1.3. Conclusion.....	21
CHAPITRE 2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ERREURS GEOMETRIQUES D'UNE MOCN	
2.1. Introduction .....	23
2.2. Les sources d'erreurs d'une machine-outil .....	23
2.2.1. Les erreurs géométriques et cinématiques.....	24
2.2.2. Les erreurs thermiques .....	24
2.2.3. Les erreurs dynamiques .....	26
2.2.4. Autres erreurs.....	26
2.3. Travaux de recherche sur les erreurs .....	26
2.4. Conclusion.....	29
CHAPITRE 3 MODÉLISATION DES ERREURS GÉOMÉTRIQUES D'UNE MOCN	
3.1. Introduction .....	31
3.2. Modélisation de l'erreur géométrique .....	31
3.2.1. Matrices de transformation homogènes.....	31
3.2.1.1. Position d'un solide dans l'espace.....	31

3.2.1.2.	Rappels .....	31
3.2.1.3.	Changements de repères .....	32
3.2.1.4.	Notations homogènes .....	33
3.2.2.	Calcul des matrices de transformation homogène .....	34
3.2.3.	Modélisation de MOCN à 3 axes « EMCO PC Mill 155 » .....	34
3.3.	Conclusion .....	40
<b>CHAPITRE 4 ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE COUPE SUR LA STRUCTURE D'UNE MOCN</b>		
4.1.	Introduction .....	42
4.2.	Brefs rappels sur la théorie de la coupe.....	42
4.2.1.	Vitesse de coupe .....	42
4.2.2.	Vitesse d'avance .....	43
4.2.3.	Profondeur de passe et engagement latéral .....	43
4.3.	Simulation du comportement mécanique de la structure de la MOCN .	44
4.3.1.	Description de l'outil de simulation utilisé.....	44
4.3.1.1.	Types d'analyse sous SolidWorks Simulation .....	45
4.3.1.2.	Types de packages SolidWorks Simulation .....	46
4.3.2.	Description des modèles géométriques et éléments finis de la machine-outil .....	46
4.3.2.1.	Modèle géométrique solide de la machine-outil .....	48
4.3.2.2.	Modèle éléments finis de la machine-outil.....	48
4.4.	Résultats .....	49
4.5.	Discussions des résultats .....	58
4.6.	Conclusion.....	62
<b>CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....</b>		
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		
<b>WEBOGRAPHIE.....</b>		
<b>ANNEXES .....</b>		
<b>ANNEXE.....</b>		
<b>ANNEXE.....</b>		
<b>ANNEXE.....</b>		
<b>RÉSUMÉ.....</b>		

# INTRODUCTION GENERALE

La précision peut être définie comme le degré d'accord ou conformité d'une pièce finie avec la précision requise dimensionnelle et géométriques. L'erreur, d'autre part, peut être comprise comme une déviation de l'arrête de l'outil de coupe de la position théorique requise pour produire une pièce avec la tolérance spécifiée. La grandeur de l'erreur dans une machine donne une mesure de sa précision, c'est l'erreur de translation maximale entre deux points dans le volume de travail de la machine. Bien sûr, cela dépend de la résolution du système. Les erreurs peuvent être classées en deux catégories à savoir les erreurs quasi-statiques et les erreurs dynamiques. De façon générale, la précision est fortement limitée par la structure géométrique de la machine et par la modification de cette structure sous des conditions statiques, thermiques et dynamiques. Les sources d'erreurs durant l'usinage sont regroupées selon trois catégories:

- Les sources d'erreurs dues à la machine;
- Les sources d'erreurs dues au procédé de coupe;
- Les sources d'erreurs dues à l'environnement[1].

A cet effet, ce mémoire de thèse est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente un bref historique sur l'état des machines-outils à commande numérique, leurs architectures globales, les axes de déplacements, ainsi que la classification et le choix de ces machines.
- Le deuxième chapitre synthétise une étude bibliographique concernant l'inventaire et l'évaluation des différentes sources d'erreurs d'une machine-outil à commande numérique à trois axes.
- Le troisième chapitre est consacré au développement d'un modèle mathématique qui calcule les erreurs géométriques de la machine étudiée. Ce modèle basé sur l'analyse géométrique de la structure cinématique de la machine-outil ainsi que des mouvements théoriques des différents axes de déplacement de cette MOCN.
- Le quatrième chapitre présente la conception et la simulation du comportement mécanique de la structure de la MOCN par logiciel SOLIDWORKS, ainsi que les résultats atteints et les discussions qui montrent l'influence des conditions de coupe sur la structure de cette machine. Et nous finirons par une conclusion générale

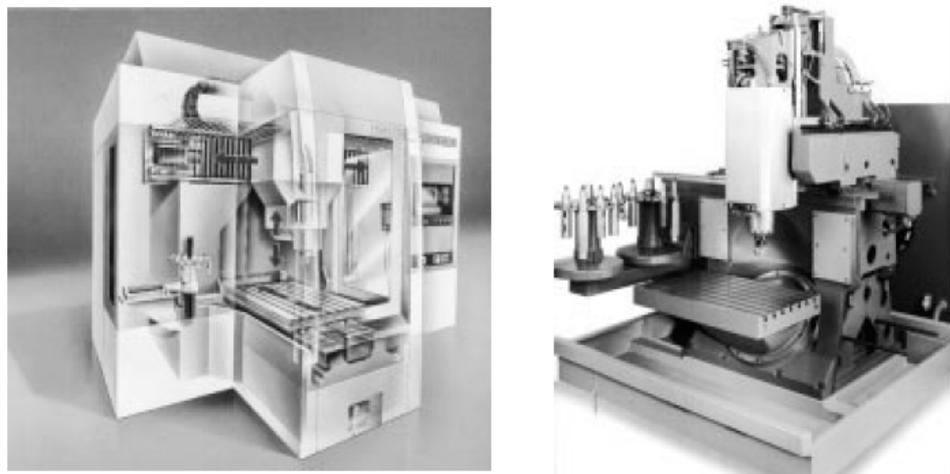
**CHAPITRE 1**  
**NOTIONS SUR LES**  
**MOCN**

# CHAPITRE 1

## NOTIONS SUR LES MOCN

### 1.1. Introduction

La machine-outil à commande numérique représentent encore le moyen de production le plus important des pièces mécaniques. De par l'avancée des techniques, la machine-outil a subi des modifications, et le couple outil - machine-outil s'est adapté aux exigences de productivité moderne[1]. La première partie de ce chapitre est consacré à l'étude de la machine-outil moderne, de manière à en recenser les fonctionnalités, ainsi que celle de leurs composants principaux. La seconde partie de ce chapitre vise à aider à la mise en œuvre rationnelle de ces machines.



**Fig.1.1- Vue générale de machines à fraiser.[1]**

### 1.2. Etat de l'art sur la machine-outil à commande numérique

Apparue, il y a seulement quelques dizaines d'années, la commande numérique (CN) impose actuellement sa technologie dans le monde de l'usinage. Conçue pour piloter le fonctionnement d'une machine à partir des instructions d'un programme sans intervention directe de l'opérateur pendant son exécution, elle a, dans un premier temps, permis de franchir un pas important dans l'automatisation des machines-outils traditionnelles [6].

Tours, fraiseuses, perceuses et aléseuses sont ainsi devenus capables d'assurer, en quantité comme en qualité, une production à peine imaginable quelques années auparavant. La CN est également à l'origine de nouvelles conceptions de machines polyvalentes comme le centre d'usinage, par exemple. Aujourd'hui, de plus en plus étroitement associée aux progrès de la micro-électronique et de l'informatique, la CN voit ses performances et sa convivialité augmenter régulièrement tandis que, en revanche, son prix et son encombrement ne cessent de diminuer. Elle pénètre, de ce fait, dans les plus petites entreprises et devient accessible à tous les secteurs industriels faisant appel aux procédés de positionnement ou de suivi de trajectoire.



**Fig.1.2-Centre d'usinage vertical 5 axes avec Station de tournage vertical « KOVOSVIT MAS MCU 1100 VT »[1].**

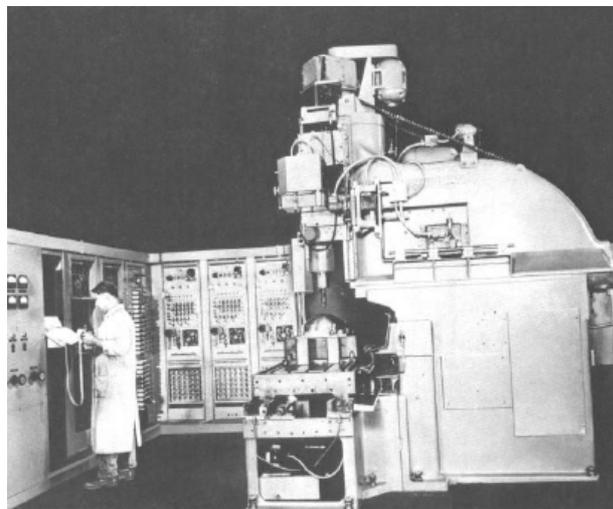
### 1.2.1. Historique

Les travaux menés par Falcon et jacquard à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle ont montré qu'il était possible de commander les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par un carton perforé. Leur métier à tisser de 1805 fut le premier équipement à être doté de cette technique et, de ce point de vue, il peut être considéré comme l'ancêtre de la commande numérique. Il faut cependant rattacher l'exploitation industrielle de la CN au développement de l'électronique. En 1947, à travers cité dans l'état du Michigan, John Parsons, fabrique pour le compte de l'US air force des pales d'hélicoptère par reproduction. Pour façonner ses gabarits, il utilise une méthode consistant à percer plusieurs centaines de trous faiblement espacés de manière à approcher du profil théorique [1].

L'emplacement et la profondeur de chaque trou sont calculés avec précision par un ordinateur IBM à cartes perforées. La finition de la surface est obtenue par des opérations manuelles de polissage. Mais, lorsque l'US air force confie à cette même personnes la réalisation de pièces de forme encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, ceux-ci réalisent que sa méthode est trop approximative et que seul un usinage continu en trois dimensions sera en mesure de donner satisfaction. Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes. Cette machine, une fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale, conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivants trois axes, est officiellement présentée en septembre 1952 dans le servomechanismslaboratory du MIT. L'information mathématique étant la base du concept, on lui donne le nom de numerical control. Il aurait pu tout aussi bien s'appeler commande symbolique ! Il faut encore attendre quelques années, de vastes fonds de l'US air force et l'appui des chercheurs du

MIT pour rendre la première MOCN réellement opérationnelle. Les différentes étapes de développement de la commande numérique sont les suivantes :

- 1954 : Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle;
- 1955 : à fond du lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN Fig.1.3;
- 1959 : apparition de la CN en Europe (foire de Hanovre).
- 1964 : en France, la télémechanique électrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais téléstatic;
- 1968 : la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante;
- 1972 : les mini calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC;
- 1976 : développement des CN à microprocesseurs;
- 1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel;
- 1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication débutent de l'ère de la fabrication flexible (CIM);
- 1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bit [1].



**Fig.1.3- Première machine-outil à commande numérique. [1]**

### **1.2.2. Définitions**

La MOCN est une machine totalement ou partiellement automatique à laquelle les ordres sont communiqués grâce à des codes qui sont portés sur un support matériel (disquette, cassette ...). Lorsque la machine-outil est équipée d'une commande numérique capable de réaliser les calculs des coordonnées des points définissant une trajectoire (interpolation), on dit qu'elle est à

calculateur, elle est appelée CNC (Commande Numérique par Calculateur). La plupart des MOCN sont des CNC [2]. Une machine-outil à commande numérique assure la réalisation automatisée des pièces, les mouvements nécessaires sont décrits dans un programme. On représente la structure d'une machine, en cours d'usinage, par un système bouclé, chaque élément contribue à la réalisation du contrat fonctionnel. Le réglage de la machine consiste à mettre en position relative ses différents éléments[4].

### 1.2.3. Architecture globale d'une MOCN

L'étape d'exécution de trajectoires multi axes en UGV est composée d'un ensemble de traitements et de transformations de données permettant à partir d'un programme d'usinage d'obtenir le mouvement relatif entre la pièce et l'outil. Pour mieux appréhender ces transformations, il est possible de décomposer les différents traitements, suivant l'architecture utilisée dans les centres d'usinage industriels pour l'analyser étape par étape. Cette décomposition peut être présentée sur quatre niveaux (Fig.1.4). Le niveau 1 correspond au directeur de commande numérique ou « contrôleur » qui traite les informations numériques d'un programme d'usinage en temps réel pour élaborer les consignes de commande des différents axes. Le niveau 2 correspond aux cartes d'axes et aux variateurs, qui réalisent, après conversion des données numériques en données analogiques, le pilotage des axes. Le niveau 3 regroupe l'ensemble de la chaîne mécanique qui réalise la composition des mouvements d'axe afin de créer le mouvement réel relatif entre l'outil et la pièce. Le niveau 4 comprend la broche, l'outil et la pièce. Les passages d'un niveau à un autre ainsi que les actions effectuées à chaque étage de cette architecture peuvent engendrer des erreurs et des écarts qui impactent la géométrie et l'état de surface de la pièce[38].

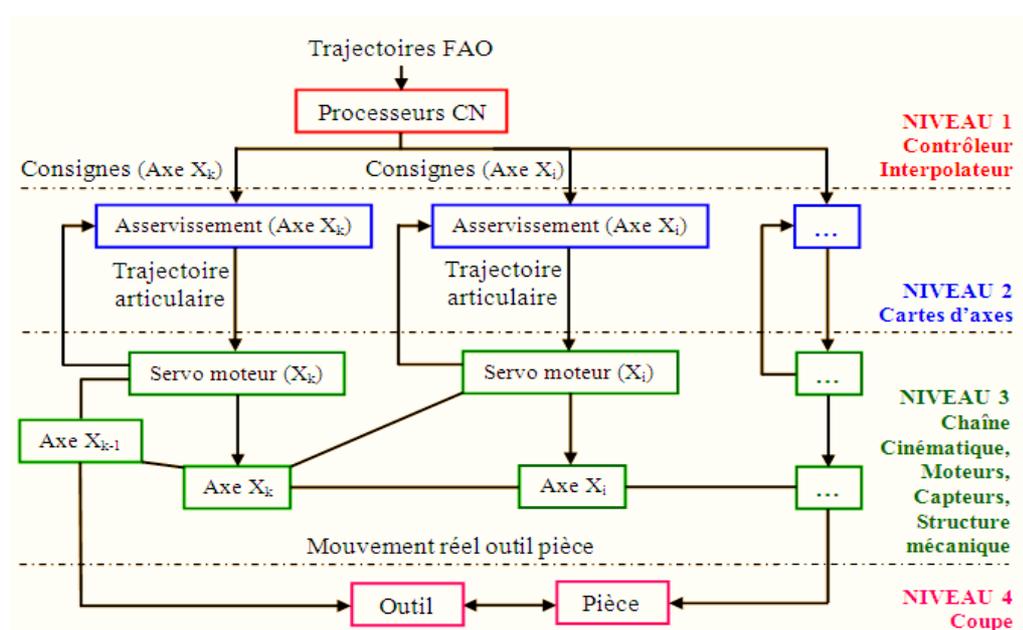


Fig.1.4-Architecture globale. [3]

Par exemple, l'exécution des trajectoires réalisées par la CN regroupant l'interpolation et la résolution de la Transformation Géométrique Inverse (TGI) sont sources d'erreurs pour la génération des consignes de position des axes. Le pilotage des axes et le suivi de trajectoires décrits par la cinématique et l'asservissement, dont les performances et la qualité jouent directement sur la géométrie de la pièce, sont également sources d'écarts.

Les phénomènes thermiques, les phénomènes dynamiques vibratoires dus aux actions mécaniques de coupe, ou encore les déformations de la structure de la machine, celle de l'outil et/ou de la pièce, influent également sur les écarts géométriques et la qualité de la pièce usinée [38].

#### **1.2.4. Les axes de déplacements**

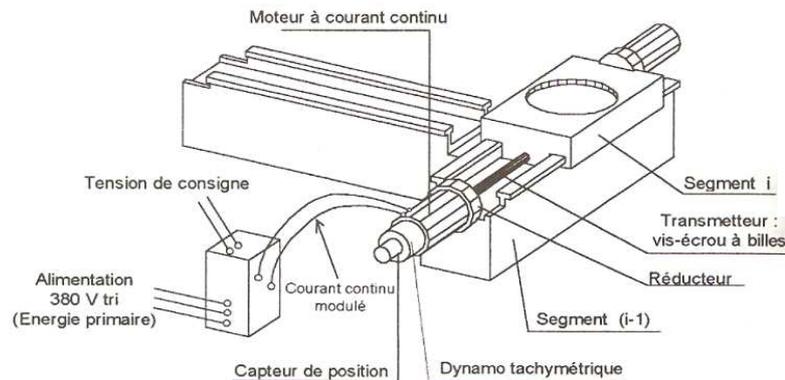
##### **1.2.4.1. Schéma général de la commande d'un axe**

Les axes de déplacement mettent en mouvement les parties mobiles des machines avec de fortes accélérations. Les axes sont constitués d'un guidage, un système d'entraînement, une motorisation et un système de mesure. Le guidage positionne précisément des solides. Il est assuré par des glissières, qui sont de plus en plus réalisées au moyen de rouleaux pré-contraints, afin de limiter les frottements et de supporter des charges plus élevées. Pour la motorisation, dans les cas de grande productivité, on cherche à minimiser les temps hors matière et on demande des vitesses de retour rapides importantes. Le mobile doit atteindre rapidement ces vitesses, d'où des accélérations importantes. En tournage, les efforts de pénétration développés par les opérations de perçage exigeant des couples moteurs importants pour faire avancer rapidement. En fraisage, l'augmentation de la fréquence de rotation entraîne une augmentation des vitesses d'avance. Les machines utilisées actuellement dans l'industrie automobile peuvent assurer des vitesses d'avance de travail de  $40 \text{ m.min}^{-1}$  et des accélérations de  $10 \text{ m.s}^{-2}$ . La transmission du mouvement se fait encore beaucoup au moyen de vis à billes précontraintes. On assiste à l'arrivée des moteurs dits linéaires qui éliminent les jeux et les frottements de l'entraînement. Un axe numérique est constitué de deux parties principales :

- La partie opérative d'un axe numérique est essentiellement matérielle. Elle comporte, dans le cas classique, les éléments suivants :
  - Un mobile : c'est le segment dont on veut commander la position par rapport au segment précédent de la structure mécanique articulée;
  - Un moteur : c'est l'élément qui anime l'articulation ;
  - Un transmetteur : c'est un mécanisme transformateur de mouvement entre moteur et mobile ;
  - Un modulateur d'énergie : c'est l'élément qui, transforme l'énergie primaire en énergie modulée, par rapport à la commande du moteur ;

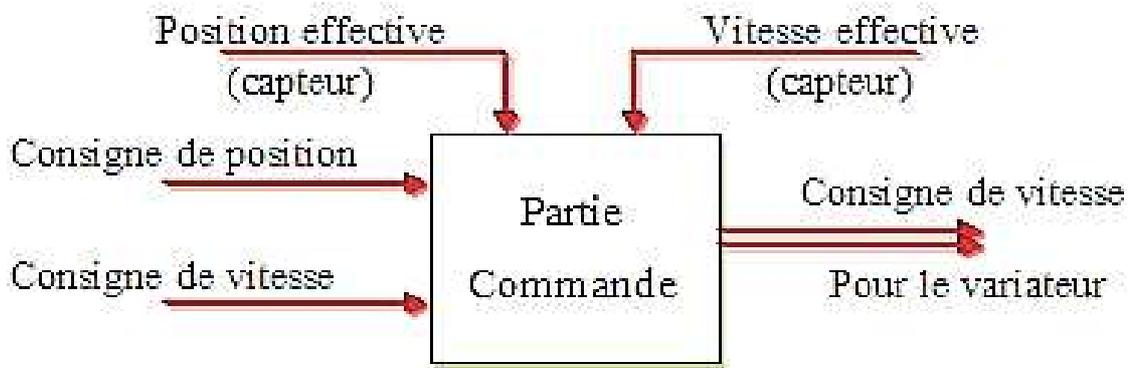
- Des capteurs : deux types de capteurs sont en général présents sur un axe mécanique (capteur de vitesse, capteur de position)[4] ;

La Fig.1.5 illustre les éléments physiques d'un axe numérique classique.



**Fig.1.5- Eléments physiques d'un axe numérique classique. [4]**

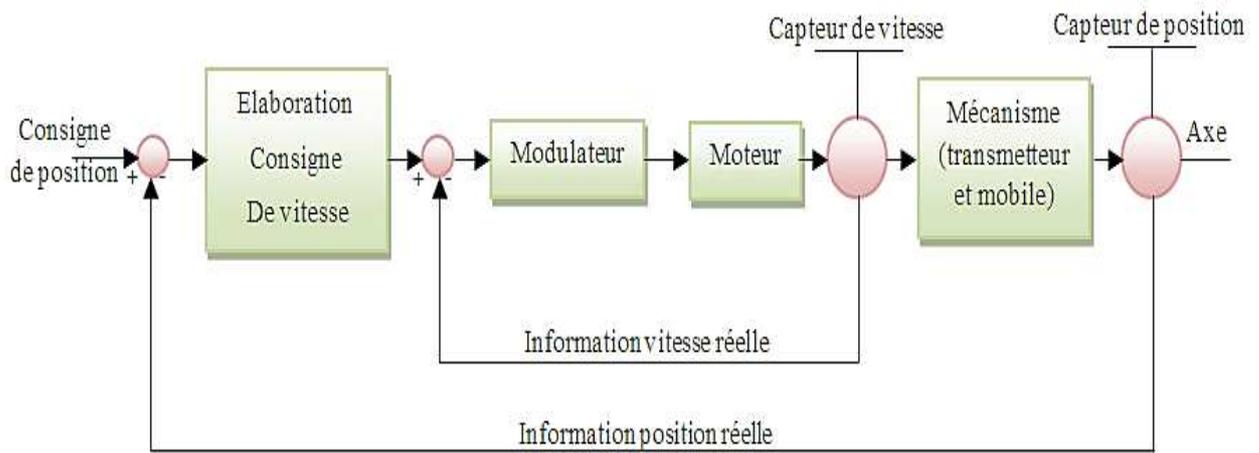
- La partie commande d'un axe numérique représenté par la Fig.1.6 est essentiellement constituée, pour ses éléments matériels, d'un dispositif électronique comportant une partie numérique et une partie analogique. Une partie de commande comporte des entrées qui reçoivent respectivement les consignes de position et de vitesse, ainsi que les informations du capteur de position et du capteur de vitesse). Une sortie, qui fournit la consigne de vitesse délivrée au variateur[4].



**Fig.1.6- Partie commande d'un axe numérique.**

En règle générale, sur une machine-outil à commande numérique, un axe numérique répond à une consigne de position. Le schéma général de l'asservissement est donné par la Fig.1.7. Il compte deux boucles de régulations impliquées :

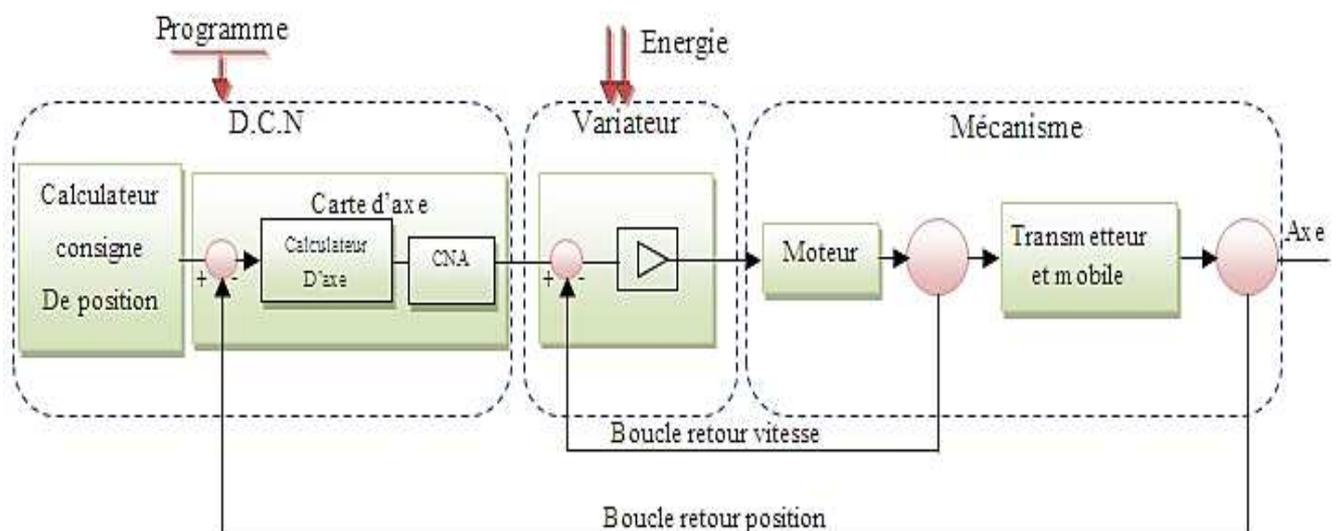
- Une boucle de régulation de vitesse;
- Une boucle de régulation de position.



**Fig.1.7- Schéma général de l'asservissement d'un axe numérique. [4]**

#### 1.2.4.2.Éléments principaux du système C.N.C. relatifs à la commande d'un axe

On désigne par C.N.C. un système de commande numérique à ordinateur intégré ; on constatera en fait qu'il existe plusieurs calculateurs dans ce système. On s'intéresse ici à la partie du DCN qui commande les axes. Le schéma fonctionnel ci-dessus a permis de mettre en évidence différents blocs fonctionnels. Ils sont regroupés dans des sous-ensembles technologiques que précise le schéma de la Fig.1.8.



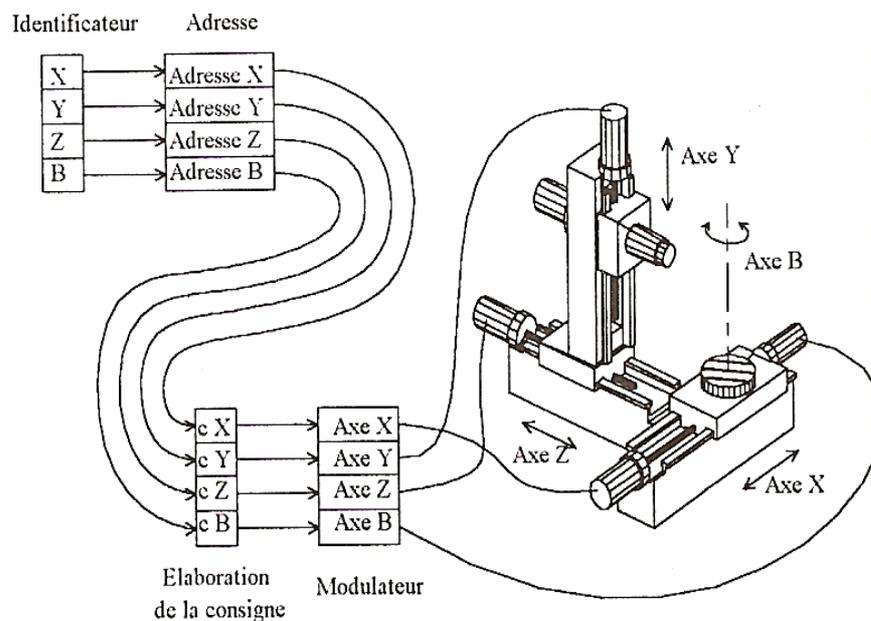
**Fig.1.8 - Sous- ensembles technologiques d'un axe numérique. [4.5]**

Les trois sous-ensembles correspondent à des éléments matériels généralement bien distincts :

- Le directeur de commande numérique DCN,
- Le variateur de vitesse;
- Le mécanisme proprement dit.

### 1.2.4.3. Commande des axes de la machine

La structure mécanique possède un certain nombre d'axe bien définis par leur nature et leur agencement spatial. Le D.C.N, qui permet de commander les axes de la machine, utilise des identificateurs qui sont en fait les adresse des ports de communication correspondants ; ces adresses sont accessibles à l'utilisateur. Les ports de communication permettent de faire transiter des valeurs jusqu'aux actionneurs des axes correspondants. Les axes peuvent être identifiés par un numéro ou par un identificateur alphanumérique (X, Y, Z, A, B,.....)[5].



**Fig.1.9- Adresse informatiques et identificateurs des axes. [5]**

Un DCN permet de commander les axes numériques de deux façons :

- Manuellement, pour les opérations de réglage et de mise au point;
- A partir d'une instruction de déplacement.

### 1.2.4.4. Typologie des machines-outils à commande numérique

Le classement des machines est nécessaire, car il aide au choix des machines, lors d'études des gammes de fabrication. Traditionnellement, on a classé les machines en fonction des formes de surfaces à réaliser : cylindriques / parallélépipédiques, tournage / fraisage. Cette classification est remise en cause, car la commande numérique et l'adaptation des structures de machine cassent le lien entre les deux couples.

On classe maintenant les machines-outils par le nombre de mouvements élémentaires qu'elles peuvent mettre en œuvre lors du déplacement de l'outil par rapport à la pièce. Seuls les axes sont décomptés. La mise en œuvre simultanée de plusieurs outils entraîne l'augmentation du nombre d'axes. Cette classification ne permet pas d'associer directement un type de forme usinable

à une classe de machine, car elle ne reflète pas la cinématique de l'outil. Par exemple, un tour à cinq axes ne permet pas de faire des pièces différentes par rapport à un tour à trois axes. Le Tableau 1.1 illustre la classification des machines-outils

**Tableau 1.1- Classification des machines-outils. [6]**

N°	mouvements	Désignation du type d'usinage et des opérations possibles
1	Z	Brochage, presse
2	X.Z	Tournage : toutes les formes obtenues ont le même axe de système
3	X.Y.Z	Fraisage : surfaçage, perçage, fraisage, de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste parallèle à une direction fixe par rapport à la pièce.
3	X.Z.C	Tournage, avec asservissement de la broche, permet le fraisage sur tour : tournage général, fraisage à l'outil tournant, perçage hors axe. La broche est asservie en position.
4	X.Y.Z.B	Fraisage : surfaçage, perçage, fraisage, de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste contenu dans un plan fixe par rapport à la pièce
4	X.Y.Z.C	Fraisage (cf X.Y.Z. C)
4	X.Y.Z.C	Tournage
4	2*(X.Z)	Tournage à deux tourelles
5	2*(X.Z).C	Tournage à deux tourelles et asservissement de la broche, (cf X.Z.C)
5	X.Y.Z.A.C	Fraisage de formes gauches : fraisage avec le flanc de l'outil ; fraisage avec d'épinçage, perçage en toutes directions.
5	X.Y.C.B.C	Fraisage de formes gauches (cf X.Y.Z.A.C)
5	X.Y.Z.A.B	Fraisage de formes gauches (cf X.Y.Z.A. B)

De plus, la broche se comporte comme un axe asservi. C'est le cas en tournage, où l'on peut être obligé de mettre en place une seconde motorisation lorsqu'elle génère un mouvement d'avance (tournage avec outil tournant). En fraisage, la broche est plutôt un demi-axe, car on cherche à asservir sa vitesse de rotation à la vitesse d'avance de l'outil pour assurer, par exemple, des interpolations hélicoïdales (taraudages) ou de façon à garantir l'avance par dent de l'outil.

Les machines 5 axes du type (X, Y, Z, A, C) sont privilégiés dans le cadre de l'usinage de pièces de dimensions importantes, bien qu'elles perdent en rigidité au niveau de la tête de la machine (Fig.1.10.)[6].



- interpolation hélicoïdale, trajectoire décrite par une hélice[6].

On assiste au développement actuel de l'interpolation polynomiale, où la trajectoire est décrite par une courbe polynomiale, ce qui permet d'assurer une meilleure dynamique de la trajectoire. Les ordres auxiliaires, sont des ordres séquentiels qui permettent soit de rendre réalisable, soit d'améliorer la réalisation de l'usinage. Programmer consiste à transposer la gamme d'usinage en langage compris par la machine. Le langage alphanumérique précise le code. En programmation manuelle, le langage utilisé est décomposé comme suit :

- Le format qui caractérise les mots utilisés,
- Les adresses, ce sont les lettres débutant un mot d'un langage machine. Celle-ci précise la fonction générale à commander (G, X, Y, Z, F, S, T, M).
- Les mots sont un ensemble de caractères comportant une adresse suivie de chiffres constituant une information (X25.236).
- Les blocs sont des groupes de mots correspondant aux instructions relatives à une séquence d'usinage (N150 GOI X200. Y 125.235 F250).
- Les fonctions sont tous les mots d'un langage machine autres que ceux définissant les cotes, et nécessaires pour assurer le fonctionnement d'une machine-outil. On trouve :
  - les fonctions préparatoires G;
  - les fonctions vitesse d'avance F;
  - les fonctions vitesse de broche S;
  - les fonctions outil T;
  - les fonctions auxiliaires M (mise en route de l'arrosage, de la broche, blocage ou déblocage de plateau ...)[40].

### 1.3. Conclusion

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre, un bref historique sur les machines-outils à commande numérique, leurs architectures globales, les axes de déplacements, ainsi que la classification et le choix de ces machines. Dans la deuxième partie, nous l'avons consacré à la programmation des machines. On conclut que la MOCN possède déjà une structure mécanique articulée et un capteur de position sur chacun de ces axes. Elle peut devenir une machine à mesurer en coordonnées si elle permet d'en assurer toutes les fonctions :

- Disposer d'un palpeur;
- Permettre l'acquisition des coordonnées mesure;
- Permettre le stockage des données;
- Assurer le traitement des résultats.

**CHAPITRE 2**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES**  
**ERREURS GEOMETRIQUES D'UNE**  
**MOCN**

## **CHAPITRE 2**

# **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ERREURS GEOMETRIQUES D'UNE MOCN**

### **2.1. Introduction**

Le degré de précision et de stabilité des machines-outils à commande numérique joue un rôle important dans la qualité finale des pièces fabriquées. De manière générale, la qualité mesure "le degré de conformité d'une pièce à des spécifications dimensionnelles et géométriques prédéfinies". Par contre, l'identification de la contribution de chaque source d'erreurs affectant la pièce, exige l'analyse des aspects technologiques définissant la structure des machines-outils le contrôle numérique et l'influence du procédé. Dans le but de donner à la problématique de la précision dans les machines-outils une dimension conceptuelle, il est préférable de procéder à une classification des facteurs qui l'affectent. Ce chapitre présente une recherche bibliographique sur les différentes sources d'erreurs d'une machine-outil à commande numérique. Il contient aussi quelques travaux antérieurs réalisés sur la modélisation des erreurs.

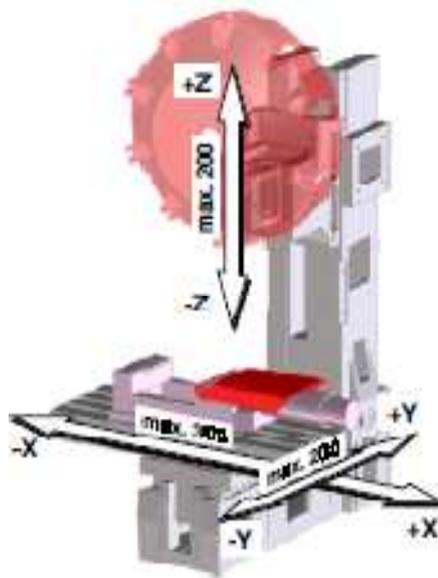
### **2.2. Les sources d'erreurs d'une machine-outil**

La précision de la pièce usinée est essentiellement déterminée par les performances de la machine-outil du point de vue de la conformité à la tolérance, à la définition de surface, etc. La précision est l'une des mesures les plus importantes de performances, la capacité de contrôler les erreurs pour optimiser le rendement tout en maintenant le coût est essentielle dans l'industrie de la machine-outil [8]. En général, Les erreurs peuvent être classées en deux catégories, à savoir les erreurs quasi-statiques et les erreurs dynamiques [9] :

- Les Erreurs quasi-statiques sont celles entre les outils et la pièce qui sont lentement variables avec le temps et liées à la structure de la machine-outil elle-même. Ces sources de ce type d'erreurs incluent :
  - les erreurs dues aux poids propres des composants de la machine
  - les erreurs géométriques sont définies comme des erreurs dans la forme de composants individuels de la machine-outil,
  - les erreurs cinématiques sont causées par des composants mal alignés dans la trajectoire,
  - les erreurs thermiques sont induites par les déformations thermo-élastiques dues à des sources de chaleur internes et externes d'une machine-outil. Ces erreurs sont un des sources d'erreur les plus difficiles à éliminer complètement.
  - les erreurs dues à la force de la coupe thermiques.

- Les erreurs dynamiques sont, d'autre part, principalement causés par des vibrations structurelles, mouvement d'erreur broche, les erreurs de commande, etc. Ils sont plus dépendants de la particulière condition de fonctionnement de la machine.

Dans l'ensemble, les erreurs quasi-statiques représentent environ 70 % du total des erreurs d'une machine [10.11]. Par exemple, pour une machine à commande numérique Fig.3.1. Chacun de ces éléments contribue à l'erreur totale du système qui est représenté par le budget d'erreur.



**Fig.2.1- Structure de base d'une MOCN avec 3 axes [5].**

### **2.2.1. Les erreurs géométriques et cinématiques**

Les erreurs géométriques interviennent dans la précision des mouvements relatifs quasi statiques des surfaces. Elles peuvent présenter un comportement souple et continu comme elles peuvent avoir un comportement aléatoire [9]. Les erreurs géométriques ont différentes composantes comme les erreurs du déplacement linéaire (précision de positionnement), de rectitude et de planéité, de l'angle d'inclinaison de broche, d'équerrage, etc. Les erreurs cinématiques sont principalement concernées par les erreurs de mouvement relatif à plusieurs composants mobile de la machine qui ont besoin de se déplacer conformément aux exigences fonctionnelles bien précises [12.13]. Elles sont particulièrement importantes pour les mouvements combinés des différents axes, comme pour le cas d'exécution d'interpolation circulaire et elles sont assez répandues dans les machines.

### **2.2.2. Les erreurs thermiques**

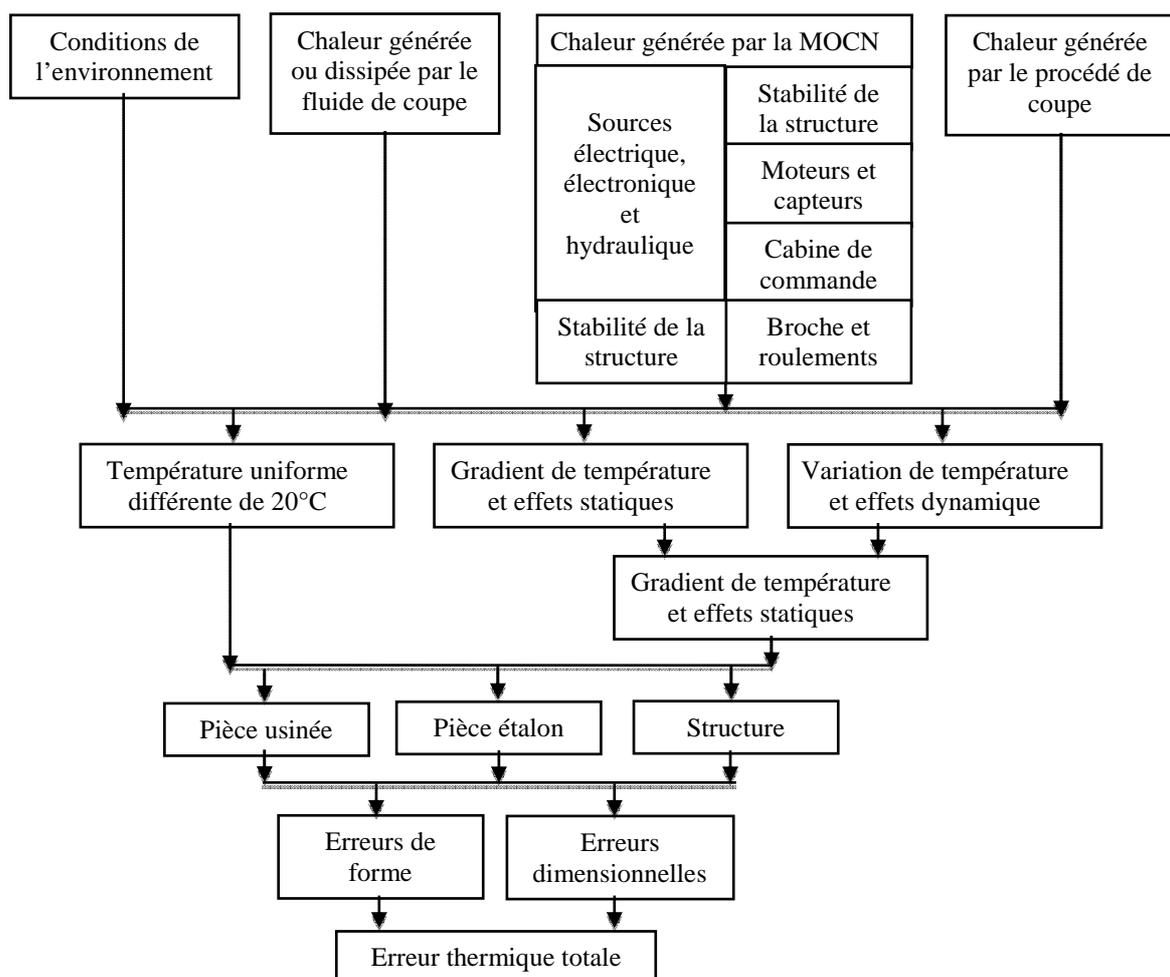
Les machines-outils fonctionnent, d'habitude, dans des environnements thermiquement instables où des changements de la température ambiante ou l'utilisation d'un liquide de refroidissement sont présents. L'aspect d'erreur qui varie avec le temps se compose de cette

instabilité thermique et des sources de chaleur de la machine. Les sources de chaleur internes sont les moteurs, les glissières linéaires, les roulements et les vis à billes [18].

Les erreurs thermiques sont de nature non linéaire et difficiles à estimer et à corriger. Six sources de distorsions thermiques qui peuvent influencer le comportement géométrique d'une MOCN ont été identifiées [9] :

- la chaleur due au processus de coupe,
- la chaleur générée par la machine,
- chaleur dégagée ou absorbée par le système de refroidissement ;
- échange thermique avec la pièce,
- chaleur dégagée par les opérateurs près de la machine ;
- mémoire thermique de l'environnement.

La source la plus critique et celle générée par la machine. La Fig.2.2 présente les sources thermiques possibles ainsi que leur mode d'action dans une machine-outil. Les mécanismes de transfert de la chaleur à travers la structure de la machine-outil sont variés (conduction, convection et radiation) [14.15].



**Fig.2.2-Sources d'erreurs thermiques dans une machine-outil.**

### 2.2.3. Les erreurs dynamiques

Dans une machine-outil, les erreurs dynamiques représentent les variations rapides dans le comportement dynamique du système MOP. Parmi les sources les plus importantes qui affectent ces erreurs, on trouve les efforts de coupe, les vibrations dues à la rotation de la broche et les vibrations induites dans la structure.

Les erreurs dynamiques varient rapidement dans le temps et elles affectent les caractéristiques locales de la pièce à usiner en termes de précision dimensionnelle et géométrique. De façon générale, ces erreurs peuvent être divisées en deux catégories majeures:

- les erreurs dynamiques dues à la machine-outil;
- les erreurs dues au procédé. [40]

### 2.2.4. Autres erreurs

D'autres erreurs, comme les erreurs de fixation, peuvent s'additionner aux défauts de la pièce usinée. Les erreurs de fixation sont causées par les défauts géométriques et la flexion des éléments du dispositif. Le mouvement possible de la pièce après serrage dépend de plusieurs facteurs comme la position des éléments d'agencements, la pression de serrage, le type de surface de contact, etc. Ainsi ce facteur pourrait être une source importante des erreurs[40].

## 2.3. Travaux de recherche sur les erreurs

Si l'inspection automatique, qui se termine par la détermination des erreurs, a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années, l'analyse et la compensation de ces erreurs ne trouvent pas le même intérêt. Dans ce qui suit, nous présentons quelques travaux typiques traitant le sujet :

- **Zhu** [16] à utiliser une méthode de modélisation d'erreur géométrique, l'identification et la compensation intégrée pour machines-outils (la machine est un système multi-corps rigide (MBS)), un modèle géométrique d'erreur a été établi. Il prend en charge l'identification des 21 paramètres géométriques d'erreur associés à axes mouvement linéaire basé sur un interféromètre laser, et six paramètres géométriques angulaires d'erreur pour chaque axe de rotation sur la base d'un bar-balle. Sur la base de ce modèle, une nouvelle méthode d'identification est proposée de tenir compte de ces erreurs géométriques. Enfin, les erreurs géométriques identifiées sont compensées par les codes correcteurs NC correspondants.
- **Cauvier** [17] à présenter le développement et l'évaluation d'un concept original, basé sur l'indice Hasofer-Lind, permettant d'estimer la capabilité d'un procédé à fabriquer des éléments tolérancés par une tolérance de position accompagnée d'une condition de matière (selon la norme [ASME 94a]). Il s'agit d'un indice de capabilité multivariable qui permet de suivre, à la fois, le diamètre des éléments percés ainsi que leur position, tout en tenant compte du nombre d'éléments contenus dans le patron. Afin de confirmer ce modèle, une étude *in-*

*situ* a été menée sur un centre d'usinage à têtes multiples pour comparer le modèle développé à des données réelles. De plus, un modèle cinématique de la machine d'usinage a été développé afin de déterminer les sources de variations observées lors de l'étude et de connaître l'incertitude associée au procédé d'usinage.

- **ErkanetMayer** [18] ont développé une nouvelle méthode de vérification de l'état volumétrique d'une machine-outil à cinq axes. La méthode proposée utilise la mesure d'un nouveau design d'artefact par le palpeur de contact présent sur la plupart des machines. L'artefact proposé est constitué de billes de références. Il est reconfigurable et non-étalonné et permet une flexibilité en termes du nombre et de la position des billes. Un modèle mathématique génère les erreurs volumétriques de la machine en identifiant et séparant les erreurs de montage de l'artefact et du palpeur des données de palpation.
- **Bouchenitfa**[11] à présenter un système simplifié pour un contrôle automatique qui fonctionne en quatre phases : une acquisition à l'aide d'un système optique qui fournira en sortie un nuage de points obtenu par scanning, un calcul des erreurs obtenu par comparaison avec un modèle CAO, après association avec le nuage de points représentant la pièce réelle, et enfin une compensation des erreurs appliquée sur le modèle CAO utilisé dans la phase de fabrication.
- **Guiassa**[19] à développer une technique qui vise l'amélioration de la précision des pièces fabriquées sur machines-outils. Elle utilise la machine-outil pour usiner et pour inspecter le profil réalisé en semi-finition. En finition une correction de la trajectoire 2 est calculée pour anticiper l'erreur attendue. La procédure de compensation utilisant la machine-outil pour inspecter et corriger la trajectoire d'outil en utilisant l'erreur détectée s'appelle le processus intermittent d'inspection.
- **Zargarbashi et Mayer** [20] ont développé un instrument (CapBall) qui se compose d'une tête de détection ayant trois capteurs capacitifs montée sur la broche et d'une bille montée sur la table de machine. Il utilise l'approche de «Chase-the-ball» et mesure directement les erreurs volumétriques d'une machine-outil à cinq axes. Un modèle mathématique a été généré pour identifier les huit erreurs de membrure et prédire les erreurs volumétriques avec ces erreurs dans les positions qui n'ont pas été considérées dans la procédure d'identification.
- **Bringmann et Knapp**[21] ont étalonné une machine-outil à cinq axes avec un seul montage, en utilisant cet instrument [22] et la stratégie de mesure «Chase-the-ball». Ils ont développé un modèle mathématique pour identifier les erreurs de membrure et d'échelle de la machine. La stabilité du modèle a été testée par l'analyse de la décomposition en valeurs singulières (SVD) et du conditionnement. Dans cette méthode, l'excentricité (l'erreur de montage) de la bille est mesurée en tournant la broche au moins 360° pendant la mesure continue. Une

analyse d'incertitude a été effectuée par les simulations de Monte Carlo avec lesquelles une machine ayant toutes les erreurs géométriques a été simulée et les effets de ces dernières sur les erreurs identifiées ont été étudiés.

- **Barka**[22] présente une nouvelle approche d'identification en temps réel des erreurs dans les machines-outils. Basé sur une structure optoélectronique, le système de mesure proposé permet d'évaluer simultanément et de façon dynamique les erreurs selon 5 des 6 degrés de liberté de chacun des axes de la machine et ce quelles que soient les conditions opératoires. De plus, cette approche simplifie de façon substantielle les procédures d'étalonnage et d'évaluation des performances métrologiques en fournissant des mesures qui reflètent avec fidélité le comportement géométrique de la machine sans avoir recours à une analyse longue et coûteuse des différentes sources d'erreur.
- **Weikert**[23] a développé un nouvel instrument, R-Test, pour l'évaluation rapide de l'état volumétrique d'une machine-outil à cinq axes. Il se compose de trois palpeurs analogues différentiels orthogonaux montés dans un support sur la table de la machine et d'une bille en céramique montée sur la broche qui est en contact avec les palpeurs. Le déplacement relatif de la bille causé par les erreurs géométriques de machine est converti en déplacements des palpeurs qui permettent de mesurer simultanément les déviations en  $x$ ,  $y$  et  $z$ .
- **Hong Yang** [24] a proposé une nouvelle méthode de modélisation dynamique d'erreur thermique appelé « *The Dynamic Thermal Error Modeling* » qui améliore la précision et la robustesse de la machine-outil. Cette stratégie de modélisation est basée sur la compensation d'erreur thermique issue des comportements dynamiques du champ de température et de la déformation thermique des structures de la machine-outil
- **Zargarbashi et Mayer**[25] a analysée l'application de la barre-à-billes à l'axe rotatif d'une machine à cinq axes par.
- **Lei et Hsu** [26] a présenté un appareil appelé «probe-ball» qui combine l'idée fondamentale de la barre-à-billes et du palpeur de mesure à trois dimensions. Il se compose d'un palpeur de mesure en 3D, d'une rallonge et d'une plaque de base avec une bille au-dessus et a été conçu pour mesurer les erreurs de positionnement totales d'une machine-outil à cinq axes.
- **Ibaraki** [27] a présenté un aperçu d'une méthode pour diagnostiquer des erreurs de mouvement grâce à des systèmes de commande d'asservissement par mesure de la précision de mouvement de la machine à arbitraires contours de forme, puis de régler à nouveau les systèmes de contrôle CNC servo de telle sorte que le rendement de contournage optimale peut être obtenue. Cette méthode est appelé DBB « double ball bar ». Elle est largement acceptée comme un outil pour mesurer la précision de mouvement des machines-outils à commande numérique.

- **Okafor et Ertekin**[28] ont étudié les erreurs géométriques et thermiques d'une machine à trois axes en utilisant un interféromètre laser. Les erreurs de position, tangage et lacet sont mesurées pour chaque axe. Les résultats ont montrés que l'exactitude de position linéaire est la meilleure quand la machine est en état froid et se détériore avec l'augmentation du temps d'opération de la machine pour chacun des trois axes.
- **Lee et Suh**[29] ont mesuré 19 composants d'erreur d'une fraiseuse verticale à trois axes à l'aide d'un interféromètre laser. La mesure a été effectuée trois fois pour chaque erreur à différentes températures pour détecter les erreurs thermiques.
- **Bryan** [30] a présenté la barre-à-billes pour l'évaluation de performance d'une machine-outil. Cet appareil mesure la distance entre le centre d'une bille fixe sur la table et le centre d'une bille mobile montée sur la broche de la machine. Rapide, simple et précis, il a été appliqué par beaucoup de chercheurs aux machines-outils à trois axes [23.31].

#### **2.4. Conclusion**

Dans le but de réaliser le système de mesure actuel, une revue bibliographique concernant la précision dans les machines-outils à commande numérique a été présentée. Dans cette étape, il était nécessaire d'analyser les différentes sources d'erreurs affectant d'une façon directe ou indirecte la précision, de proposer une classification typique des erreurs ainsi que leurs contributions dans la composante totale de l'erreur. Il était question également, des mesures et techniques d'évaluation et des approches de compensation de ces erreurs.

**CHAPITRE 3**  
**MODÉLISATION DES ERREURS**  
**GÉOMÉTRIQUES D'UNE MOCN**

## CHAPITRE 3

# MODÉLISATION DES ERREURS GÉOMÉTRIQUES D'UNE MOCN

### 3.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de développer un modèle cinématique explicite de la machine-outil à commande numérique afin de reproduire les déplacements de celle-ci. Ce modèle tient compte des erreurs géométriques de la machine étudiée. Il est possible d'estimer les déviations par rapport à la pose théorique de l'outil de coupe. Ce modèle ne tient pas compte des erreurs causées par des effets de nature thermique ou dynamique. L'élaboration de ce modèle peut être simplifiée en deux grandes étapes : en premier lieu, la définition de base de la cinématique de la machine à travers un modèle mathématique; en deuxième lieu, l'incorporation des erreurs géométriques de ce dernier.

### 3.2. Modélisation de l'erreur géométrique

#### 3.2.1. Matrices de transformation homogènes

##### 3.2.1.1. Position d'un solide dans l'espace

L'espace d'évolution d'un solide est de dimension 6 (3 paramètres de translation et 3 paramètres de rotation). On modélise généralement le déplacement en translation par la translation d'un point. Il existe plusieurs représentations possibles de la rotation : matrice de rotation, 3 angles (plusieurs solutions), une direction et un angle de rotation autour de cette direction, les quaternions... Aucune de ces représentations n'est satisfaisante pour toutes les applications. Dans notre cas, nous souhaitons modéliser un centre d'usinage. Ensuite, programmer les déplacements relatifs de palpeur (l'outil) dans un ou plusieurs repères liés à la pièce. Nous aurons donc besoin d'exprimer des positions dans plusieurs repères. La représentation des rotations par des matrices de transformation semble donc bien adaptée. Nous allons faire quelques rappels sur les matrices de rotation afin d'introduire une extension : les matrices de transformation homogènes [31].

##### 3.2.1.2. Rappels

$$\vec{V} = x\vec{i}_1 + y\vec{j}_1 + z\vec{k}_1 \quad (3.1)$$

Alors

$$V_{R_1} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Soit  $P$  un point de l'espace affine, on représente  $P$  par le vecteur  $\overrightarrow{O_1P}$ . Ce qui permet d'écrire

$$\overrightarrow{OP} = a\vec{l}_1 + b\vec{j}_1 + c\vec{k}_1 \quad (3.3)$$

Si on note  $P_{R_1}$  la représentation matricielle du vecteur  $\overrightarrow{O_1P}$  alors :

$$P_{R_1} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.2.1.3. Changements de repères

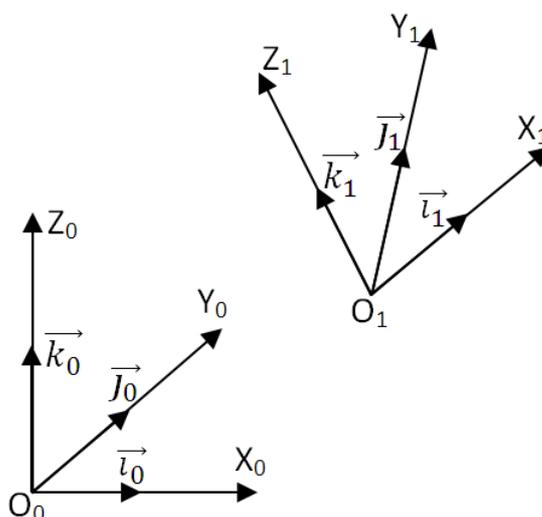


Fig.3.1-Changement de repère.

Soit  $R_0$  un autre repère associé à une autre base  $B_0 = \vec{l}_0 + \vec{j}_0 + \vec{k}_0$  et à l'origine  $O_0$ . Soit  $M_{R_0R_1}$  la matrice de transformation homogène de  $R_0$  à  $R_1$  :

$$M_{R_0R_1} = \begin{bmatrix} x_i & x_j & x_k \\ y_i & y_j & y_k \\ z_i & z_j & z_k \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Les colonnes de  $M_{R_0R_1}$  représentent les coordonnées des vecteurs de base  $B_1$  exprimées sur  $B_0$  :

$$i_{1R_0} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$j_{1R_0} = \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$k_{1R_0} = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Pour un vecteur on écrit un changement de repère :

$$\begin{aligned} \vec{V} &= x\vec{i}_1 + y\vec{j}_1 + z\vec{k}_1 \\ &= (xx_i + yy_i + zz_i) \cdot \vec{i}_0 + (xy_i + yy_i + zy_i) \cdot \vec{j}_0 + (xz_i + yz_i + zz_i) \cdot \vec{k}_0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Sous forme matricielle :

$$V_{R_0} = M_{R_0R_1} \times V_{R_1} \quad (3.10)$$

On peut remarquer l'ordre d'écriture des repères. Pour un point  $P$  il faut exprimer dans  $R_0$  le vecteur  $\overrightarrow{O_0P}$ . Or :

$$\overrightarrow{O_0P} = \overrightarrow{O_0O_1} + \overrightarrow{O_1P} \quad (3.11)$$

Soit  $O_0O_{1R_0} = \begin{pmatrix} x_{O_1} \\ y_{O_1} \\ z_{O_1} \end{pmatrix}$  la représentation matricielle du vecteur  $\overrightarrow{O_0O_1}$  sur la base  $B_0$ .

Les coordonnées de  $P$  dans le repère  $R_0$  s'expriment alors sous forme matricielle :

$$P_{R_0} = O_0O_{1R_0} + M_{R_0R_1} \times P_{R_1} \quad (3.12)$$

#### 3.2.1.4. Notations homogènes

Afin de simplifier les écritures, nous souhaitons écrire un changement de repère pour un point ou pour un vecteur de la même manière : un produit matriciel. Pour cela, on ajoute une quatrième coordonnée aux représentations matricielles des points et des vecteurs :

On représente les vecteurs par  $V_{R_0} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 0 \end{pmatrix}$  et les points par  $P_{R_0} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$

Si on définit les matrices de transformation homogènes :

$$H_{R_0R_1} = \begin{bmatrix} M_{R_0R_1} & O_0O_{1R_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & x_j & x_k & x_{O_1} \\ y_i & y_j & y_k & y_{O_1} \\ z_i & z_j & z_k & z_{O_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

On peut alors écrire :

$$V_{R_0} = H_{R_0R_1} \times V_{R_1} \quad (3.14)$$

$$P_{R_0} = H_{R_0R_1} \times P_{R_1} \quad (3.15)$$

De même on peut vérifier la composition des matrices de passages homogènes :

$$H_{R_0R_2} = H_{R_0R_1} \times H_{R_1R_2} \quad (3.16)$$

### 3.2.2. Calcul des matrices de transformation homogène

Les repères  $R_P$  et  $R_1$  d'une part, et  $R_4$  et  $R_0$  d'autre part sont fixes l'un par rapport à l'autre. Ils permettent à l'opérateur de positionner le repère pièce là où il veut. Les repères  $R_P$  et  $R_0$  sont confondus pour un déplacement nul des liaisons  $L_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ). Dans le cas où pour cette position les repères  $R_1$  et  $R_n$  sont aussi confondus, les matrices de transformation  $H_{R_1R_P}$  et  $H_{R_nR_0}$  sont égales. L'écriture des matrices de transformation  $H_{R_iR_{i+1}}$  ne pose pas de problème. On calcule ensuite la matrice  $H_{R_1R_n}$  en faisant le produit des matrices  $H_{R_iR_{i+1}}$ . La matrice  $H_{R_P R_0}$  qui représente la position de l'outil par rapport à la pièce est donc le produit de matrice suivant :

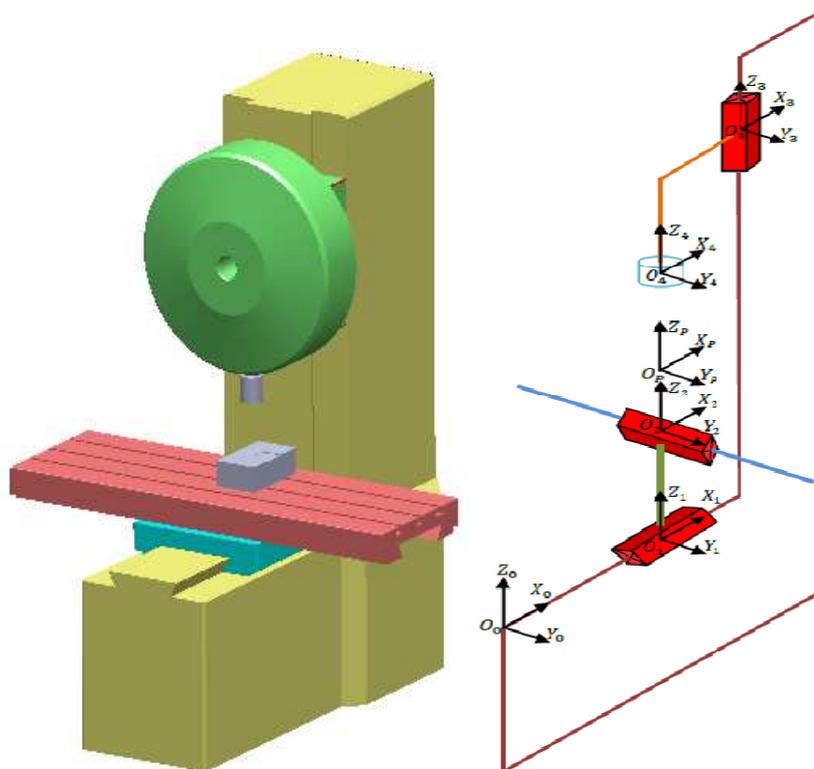
$$H_{R_P R_0} = H_{R_P R_1} \times H_{R_1 R_{n+1}} \times \dots \times H_{R_{n+1} R_0} \quad (3.17)$$

### 3.2.3. Modélisation de MOCN à 3 axes « EMCO PC Mill 155 »

L'amélioration des performances métrologiques d'une machine-outil passe nécessairement par l'analyse géométrique de sa structure cinématique. L'identification des erreurs structurelles est nécessaire afin d'analyser les défauts géométriques. Pour illustrer le concept des erreurs géométriques, une application porte sur l'identification des erreurs dans une machine à outil à commande numérique tel qu'illustré à la Fig.3.2-a. Cette machine est composée principalement des éléments suivants :

- Une table en translation par rapport au bâti selon l'axe y;
- un chariot en translation par rapport au chariot inférieur selon l'axe x;
- une tourelle guidée à son tour par rapport au bâti selon l'axe z.

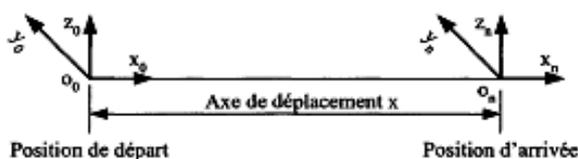
L'outil est monté sur la tourelle. La pièce à usinée est maintenue d'une manière isostatique sur la table de la machine. Avant d'entamer l'étude cinématique de la MOCN illustrée dans la figure 3.2, il est important de noter la différence entre une liaison linéaire idéale et une liaison linéaire réelle en introduisant le concept des matrices homogènes [32.33].



**Fig.3.2- a- La structure de la MOCN, b- La chaîne cinématique de cette machine-outil.**

Dans le cas d'une liaison linéaire idéale, le déplacement peut être caractérisé par une translation pure représentée par la matrice de transformation homogène (3.17) permettant d'évaluer la position de l'élément mobile dans son mouvement selon l'axe de déplacement principal comme illustré dans la Fig.3.3.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$



**Fig.3.3- Liaison linéaire idéale.**

La Fig.3.4 présente le cas d'une liaison linéaire réelle. La matrice de transformation homogène (3.18) permet de caractériser la position de l'élément mobile ainsi que les erreurs

associées dans son déplacement dans le volume de travail de la machine. Les erreurs sont sous forme de déviations linéaires (rectitudes axiale ( $\sigma_{xx}$ ), horizontale ( $\sigma_{xy}$ ) et verticale ( $\sigma_{xz}$ )) et de déviations angulaires (lacet ( $\varepsilon_{xy}$ ), tangage ( $\varepsilon_{xz}$ ) et roulis ( $\varepsilon_{xx}$ )).

$$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xz} & \varepsilon_{xy} & x + \sigma_{xx} \\ \varepsilon_{xz} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \sigma_{xy} \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 1 & \sigma_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$



**Fig.3.4- Liaison linéaire réelle.**

Le schéma cinématique présenté à la figure 3.2-b permet de définir l'agencement des différents systèmes de coordonnées et montre comment chaque système de coordonnées peut être exploité de manière à déterminer la relation spatiale entre la pièce et palpeur/l'outil. Les systèmes de coordonnées sont définis de la manière suivante Tableau 3.1:

- Le système de coordonnées principal  $R_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$  est placé au coin de la table de la machine.
- Le système de coordonnées associé au chariot  $R_1(O_1, x_1, y_1, z_1)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_1, Y_1, Z_1)$  par rapport au  $R_0$ .
- Le système de coordonnées associé à la table  $R_2(O_2, x_2, y_2, z_2)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_2, Y_2, Z_2)$  par rapport au  $R_0$ .
- Le système de coordonnées relié à la tourelle  $R_3(O_3, x_3, y_3, z_3)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_3, Y_3, Z_3)$  par rapport au  $R_0$ .
- Le système de coordonnées relié à palpeur/l'outil  $R_4(O_4, x_4, y_4, z_4)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_4, Y_4, Z_4)$  par rapport au  $R_3$ .
- Le système de coordonnées relié à la pièce  $R_P(O_P, x_P, y_P, z_P)$  est défini à l'aide d'un vecteur  $(X_P, Y_P, Z_P)$  par rapport au  $R_0$ .

**Tableau 3.1- Valeurs de décalage de l'origine des systèmes.**

Origine de repère	Description	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$
$O_0$	Coordonnées du système	0	0	0
$O_1$	Chariot (X)	200	0	0
$O_2$	Table (Y)	0	0	90
$O_3$	La tourelle (Z)	0	0	450
$O_4$	Palpeur/Outil	0	0	-150
$O_P$	Pièce	0	0	140

Dans cette analyse, les matrices de transformation homogène sont désignées de manière à établir la relation spatiale entre les éléments mobiles et leurs guidages respectifs :

- $H_{R_0R_1}$  représente la matrice de transformation des coordonnées du chariot par rapport au bâti de la machine.
- $H_{R_1R_2}$  représente la matrice de transformation des coordonnées de la table par rapport au chariot.
- $H_{R_2R_3}$  représente la matrice de transformation des coordonnées de la tourelle verticale par rapport à la table.
- $H_{R_3R_4}$  représente la matrice de transformation des coordonnées de palpeur/ l'outil par rapport à la tourelle verticale.
- $H_{R_0R_P}$  représente la matrice de transformation des coordonnées de la pièce par rapport au bâti de la machine.

Le seul degré de liberté du chariot est le mouvement dans la direction transversale (x). La matrice de transformation homogène idéale « MTHI » correspondante est la suivante:

$$H_{R_0R_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x + X_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

En supposant que le chariot est fixe, le seul degré de liberté de la table est le mouvement dans la direction longitudinale (y). La MTHI correspondante est la suivante:

$$H_{R_1R_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_2 \\ 0 & 1 & 0 & y + Y_2 \\ 0 & 0 & 1 & Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

En supposant que le chariot et la table sont fixes, le seul degré de liberté de la tourelle est le mouvement dans la direction verticale (z). La MTHI correspondante est la suivante:

$$H_{R_2R_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_3 \\ 0 & 1 & 0 & Y_3 \\ 0 & 0 & 1 & z + Z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Tout mouvement de palpeur/l'outil est interdit par rapport à la tourelle. La MTHI correspondante est la suivante:

$$H_{R_3R_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_4 \\ 0 & 1 & 0 & Y_4 \\ 0 & 0 & 1 & Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

La pièce est maintenue en position isostatique par rapport à la table de la MOCN .La MTHI » correspondante est la suivante:

$$H_{R_0R_p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_p \\ 0 & 1 & 0 & Y_p \\ 0 & 0 & 1 & Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

La matrice de transformation homogène réelle « MTHR » doit tenir compte de la position réelle et de l'orientation de chaque élément mobile dans son déplacement. Pour le chariot, la matrice de transformation homogène réelle correspondante est la suivante :

$$H_{R_0R_1} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xz} & \varepsilon_{xy} & \sigma_{xx} + x + X_1 \\ \varepsilon_{xz} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \sigma_{xy} + Y_1 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 1 & \sigma_{xz} + Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Pour la table, la MTHR correspondante est la suivante :

$$H_{R_1R_2} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{yy} & \sigma_{yx} + X_2 \\ \varepsilon_{yz} & 1 & -\varepsilon_{yx} & \sigma_{yy} + y + Y_2 \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yx} & 1 & \sigma_{yz} + Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Pour la tourelle, la MTHR réelle correspondante est la suivante :

$$H_{R_2R_3} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{zy} & \sigma_{zx} + X_3 \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{zx} & \sigma_{zy} + Y_3 \\ -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zx} & 1 & \sigma_{zz} + z + Z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Pour palpeur/l'outil, la MTHR est la suivante :

$$H_{R_3R_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \sigma_{ox} + X_4 \\ 0 & 1 & 0 & \sigma_{oy} + Y_4 \\ 0 & 0 & 1 & \sigma_{oz} + Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Les termes  $\sigma_{ox}$ ,  $\sigma_{oy}$  et  $\sigma_{oz}$  sont les déviations linéaires dues au changement de la longueur du outil selon les axes x, y et z. Les erreurs d'orientation pendant le montage de la pièce à mesurer sont supposées nulles. La MTHR correspondante est la suivante :

$$H_{R_0R_p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_p + \sigma_{px} \\ 0 & 1 & 0 & Y_p + \sigma_{py} \\ 0 & 0 & 1 & Z_p + \sigma_{pz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Les termes  $\sigma_{px}$ ,  $\sigma_{py}$  et  $\sigma_{pz}$  sont les erreurs dues au placement initial de la pièce selon les axes x, y et z. En utilisant les matrices de transformation réelle, la position de palpeur/l'outil par rapport à la référence est représentée par la multiplication des matrices (3.24), (3.25), (3.26) et (3.27):

$$H_{référence\ outil} = H_{R_0R_1} \times H_{R_1R_2} \times H_{R_2R_3} \times H_{R_3R_4}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xz} & \varepsilon_{xy} & \sigma_{xx} + x + X_1 \\ \varepsilon_{xz} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \sigma_{xy} + Y_1 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 1 & \sigma_{xz} + Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{yy} & \sigma_{yx} + X_2 \\ \varepsilon_{yz} & 1 & -\varepsilon_{yx} & \sigma_{yy} + y + Y_2 \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yx} & 1 & \sigma_{yz} + Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$* \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zz} & \varepsilon_{zy} & \sigma_{zx} + X_3 \\ \varepsilon_{zz} & 1 & -\varepsilon_{zx} & \sigma_{zy} + Y_3 \\ -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zx} & 1 & \sigma_{zz} + z + Z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \sigma_{ox} + X_4 \\ 0 & 1 & 0 & \sigma_{oy} + Y_4 \\ 0 & 0 & 1 & \sigma_{oz} + Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

D'une façon similaire, le point d'interférence idéale Palpeur-Pièce est donné par la matrice suivante :

$$H_{référence\ pièce} = H_{R_0R_p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_p + \sigma_{px} \\ 0 & 1 & 0 & Y_p + \sigma_{py} \\ 0 & 0 & 1 & Z_p + \sigma_{pz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Le vecteur de correction est ainsi:

$$V_{vecteur\ de\ correcti\ on} = H_{référence\ pièce} - H_{référence\ outil}$$

$$(3.31)$$

### 3.3. Conclusion

Cette étude vise à améliorer la prédiction de la capabilité de mesure d'une MOCN. Pour cela, un modèle cinématique simulant le comportement variationnel de la MOCN sera réalisé à partir des matrices de transformation homogènes idéales et des matrices de transformation homogènes réelles. Dans ce modèle, les erreurs géométriques de la MOCN ainsi que les positions de chaque articulation seront utilisées comme intrants. Les extrants de ce modèle seront les erreurs de position et d'orientation réelle du palpeur/ l'outil par rapport à sa position idéale. Il sera alors possible de prédire le comportement des erreurs observables en fonction de la configuration de mesure et du contrôle.

**CHAPITRE 4**  
**ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES**  
**CONDITIONS DE COUPE SUR LA**  
**STRUCTURE D'UNE MOCN**

# CHAPITRE 4

## ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE COUPE SUR LA STRUCTURE D'UNE MOCN

### 4.1. Introduction

Les erreurs provoquées par les efforts de coupe sont, à un premier niveau, la déflexion directe de la structure, de l'outil ou de la pièce à usiner. Par contre, à un second niveau, il s'agit de tous les phénomènes vibratoires qui sont engendrés durant le procédé d'usinage. L'un des phénomènes vibratoires prédominant dans la limite opérationnelle d'une machine est l'apparition de l'auto excitation vibrationnelle, aussi appelée le broutage. Dans ce chapitre nous intéressons à l'influence des paramètres de coupe sur la structure d'une machine-outil à commande numérique.

### 4.2. Brefs rappels sur la théorie de la coupe

Les paramètres de coupe sont des grandeurs primordiales lors de l'usinage. Ces paramètres conditionnent les phénomènes physiques rencontrés lors de la coupe. Leur choix est directement lié à l'intégrité de l'outil et à la qualité géométrique de la surface usinée tout en assurant une production optimale à moindre coût.

#### 4.2.1. Vitesse de coupe

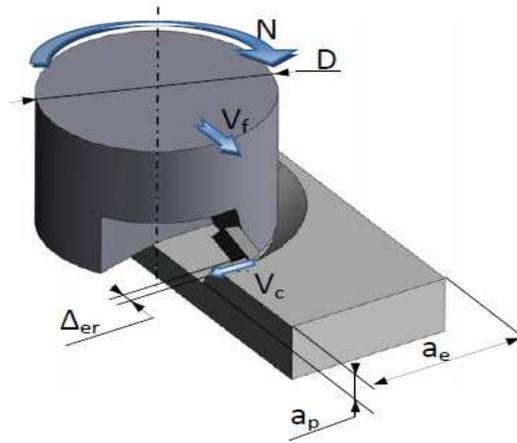
La vitesse de coupe (Fig.4.1) notée  $V_c$  est directement liée au mouvement de coupe. Cette vitesse est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la fréquence de rotation de la pièce  $\omega$  (en  $\text{rd.s}^{-1}$ ).

$$V_c = R * \omega \quad (4.1)$$

La fréquence de rotation de l'outil  $N$  (en  $\text{tr.mn}^{-1}$ ) peut alors être déduite avec l'équation suivante :

$$N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D} \quad (4.2)$$

Où  $R$  et  $D$  (mm) sont respectivement le rayon et le diamètre final de la pièce ou de l'outil.



**Fig.4 .1- Opération de fraisage.**

#### 4.2.2. Vitesse d'avance

L'avance instantanée radiale  $\Delta_{er}$ (Fig.4.1) varie de 0 à l'avance par dent  $f$ . Ce paramètre correspond à la différence de déplacement radial de l'outil entre le passage pour une même position angulaire de deux arêtes de coupe successives. La vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil. Cette vitesse dépend de l'avance par dent  $f_a$ , du nombre de dent  $Z$  et de la fréquence de rotation  $N$ .

$$V_f = f_a * Z * N \quad (4.3)$$

#### 4.2.3. Profondeur de passe et engagement latéral

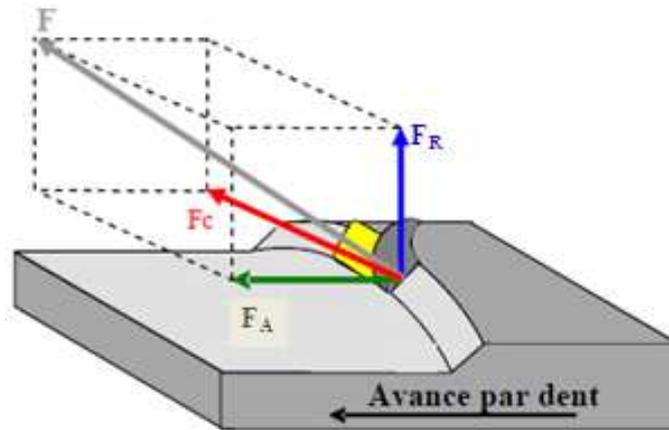
La profondeur de passe  $a_p$  est la profondeur axiale engagée dans la matière (Fig.4.1). La profondeur de passe associée à l'avance influence la formation du copeau car elle modifie la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière. L'engagement latéral noté  $a_e$  correspond à la profondeur de coupe latérale.

#### 4.2.1. Les efforts de coupe

Pour déterminer les efforts qui s'exercent sur l'outil, il faut tenir compte des conditions de coupe et des propriétés mécaniques du matériau usiné, (Figure 4.2). Au cours de la formation du copeau, l'effort de coupe peut être décomposé en trois composantes suivant les directions privilégiées :

- composante tangentielle ou composante principale de coupe  $F_C$ : c'est la composante agissant dans la direction de la vitesse de coupe.

- composante d'avance ou composante axiale  $F_A$ : c'est la composante agissant dans la direction de la vitesse d'avance.
- composante de refoulement ou composante radiale  $F_R$ : c'est la composante agissant dans une direction perpendiculaire aux deux autres et elle agit dans le sens de l'axe de la fraise.



**Fig.4.2-Composantes de l'effort de coupe en fraisage.**

L'effort de coupe  $F_C$  dépend de la résistance spécifique à la rupture par compression  $K_C$  de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé ainsi que du mode de travail [34.35]. Pour la commodité des calculs on admet la relation suivante pour l'effort de coupe :

$$F_C = S_c * K_C \quad (4.4)$$

Avec :

$K_C$  : La Résistance spécifique à la rupture par compression ;

$S_c$ :Section du copeau définie par l'avance  $f_a$  et la profondeur de passe  $a_p$ , soit :

$$S_c = a_p * f_a \quad (4.5)$$

Pour les efforts d'avance et de pénétration ils sont donnés par les équations suivantes :

$$F_A \approx \left(\frac{1}{2} \text{ à } \frac{2}{3}\right) * F_C \quad (4.6)$$

$$F_R \approx 0.3 * F_C \quad (4.7)$$

### **4.3. Simulation du comportement mécanique de la structure de la MOCN**

#### **4.3.1. Description de l'outil de simulation utilisé**

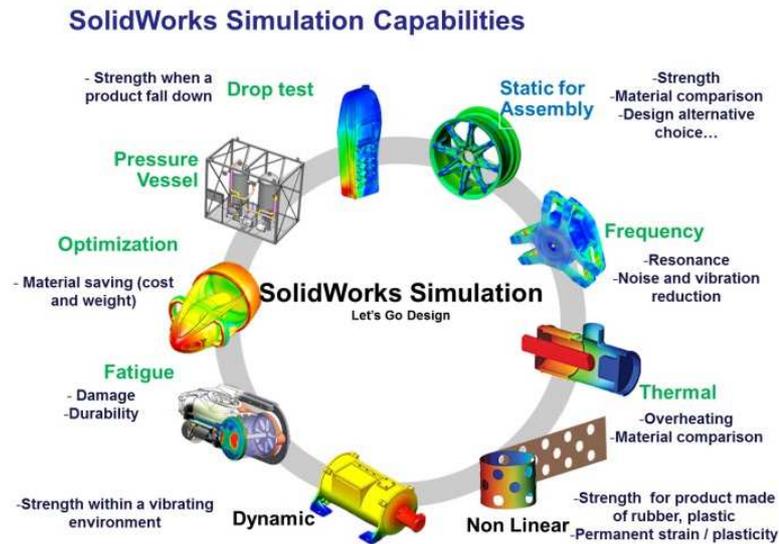
L'outil de simulation utilisé est le code SolidWorks Simulation « SWS ». C'est un outil de conception et de dessin Assistés par ordinateur « CAO/DAO ». Ce moyen aide les ingénieurs à concevoir les différents systèmes de l'engineering. Il est basé sur l'analyse par éléments finis

« AEF ». Il est originalement développé par l'association : Structural Recherche and Analysis Corporation « SRAC » établie en 1982, qui est devenue aujourd'hui une partie de l'association SolidWorks. L'association de SRAC avec SolidWorks avait créé le simulateur CosmosWorks en 1995 [36]. Seulement, en 2001, SRAC est acquise par Dassault Systems « DS », la compagnie mère de l'association SolidWorks et elle est devenue un partenaire crédible avec SolidWorks en 2003. CosmosWorks est renommé SolidWorks Simulation en 2009 et il est intégré avec SolidWorks Computer Aided Design « CAD » software qui l'utilise pour créer le modèle géométrique solide des objets. SolidWorks est un code solide, paramétrique, à fonction axée et développé spécifiquement pour le système de gestion windows operating system « WOS ».

#### 4.3.1.1. Types d'analyse sous SolidWorks Simulation

Le code SWS permet d'effectuer les principaux types d'analyses des structures statiques et dynamiques (Fig.4.3) :

- **Analyse statique** : elle donne les outils nécessaires qui rendent performant l'analyse statique des pièces et des assemblages lorsque les charges sont appliquées lentement et peuvent être considérées constantes.
- **Analyse non linéaire** : elle traite les performances dynamiques non linéaires des corps sous l'effet des charges.
- **Analyse fréquentielle/modale** : cette analyse offre la possibilité de déterminer les fréquences naturelles et les modes propres associés des pièces et des assemblages ainsi que les participations massiques dans chaque direction principale.
- **Analyse du flambage** : cette analyse détermine les modes et les charges critiques de flambage des structures.
- **Analyse thermique** : elle permet la détermination de la distribution du champ de température due au transfert de chaleur dans les pièces ou les assemblages.
- **Analyse de la fatigue** : elle permet d'examiner les paramètres caractéristiques de la fatigue des matériaux sous des charges cycliques sur la durée de vie et de déterminer le facteur d'endommagement.
- **Analyse de la pression des coques** : elle traite les paramètres de conception dans le processus de conception des coques sous des charges de pression internes ou externes.
- **Analyse dynamique linéaire** : elle étudie les effets de l'application des charges dépendant du temps ou de la fréquence sur les corps.
- **Analyse du fluide dynamique** : elle traite les écoulements des fluides compressibles et incompressibles internes et externes dans les systèmes dynamiques.



**Fig.4.3-Types d'analyses sous SolidWorks Simulation. [37]**

#### 4.3.1.2. Types de packages SolidWorks Simulation

Ce code industriel est disponible sous forme de quatre différents packages :

- **Simulation Xpress** : il dispose d'outils de simulation de l'analyse statique des pièces avec des types de chargements et des conditions aux limites très limitées.
- **SolidWorks Simulation** : ce package traite l'analyse statique des pièces et des assemblages.
- **SolidWorks Simulation Professionnel** : il examine les analyses : statique, thermique, de flambage, fréquentielle, test d'entraînement, l'optimisation et l'analyse de la fatigue des pièces et des assemblages.
- **SolidWorks Simulation Premium** : il comprend les outils de simulation de toutes les analyses faisables par SWS professionnel plus les analyses non linéaires et dynamiques.

#### 4.3.2. Description des modèles géométriques et éléments finis de la machine-outil

Les fraiseuses verticales à console du type «EMCO PC Mill 155» Fig.4.4 sont des machines de haute précision. Ces fraiseuses sont destinées au fraisage des pièces très variées d'acier, de fonte, et de métaux non ferreux particulièrement avec des fraises de face, en bout, cylindrique, à doigt pour la production des pièces séparées et en série, elles permettent l'usinage des plans verticaux et horizontaux, des rainures, des angles, de taillage d'engrenages, le fraisage de roues dentées, des alésoirs, des contours des cames et d'autres pièces dont l'usinage nécessite un pivotement autour de l'axe de la fraise, effectué à l'aide d'une tête de division ou d'un plateau circulaire amovible. Ces fraiseuses peuvent être utilisées dans les lignes de transferts et les chaînes permettant ainsi le fraisage normal et en avalant aux régimes de coupe ordinaires aussi bien qu'aux régimes des cycles automatiques. Le rendement de la fraiseuse est maximum à l'usinage des pièces par la méthode du fraisage rapide grâce à la vitesse augmentée (jusqu'à 5000 tr/min).

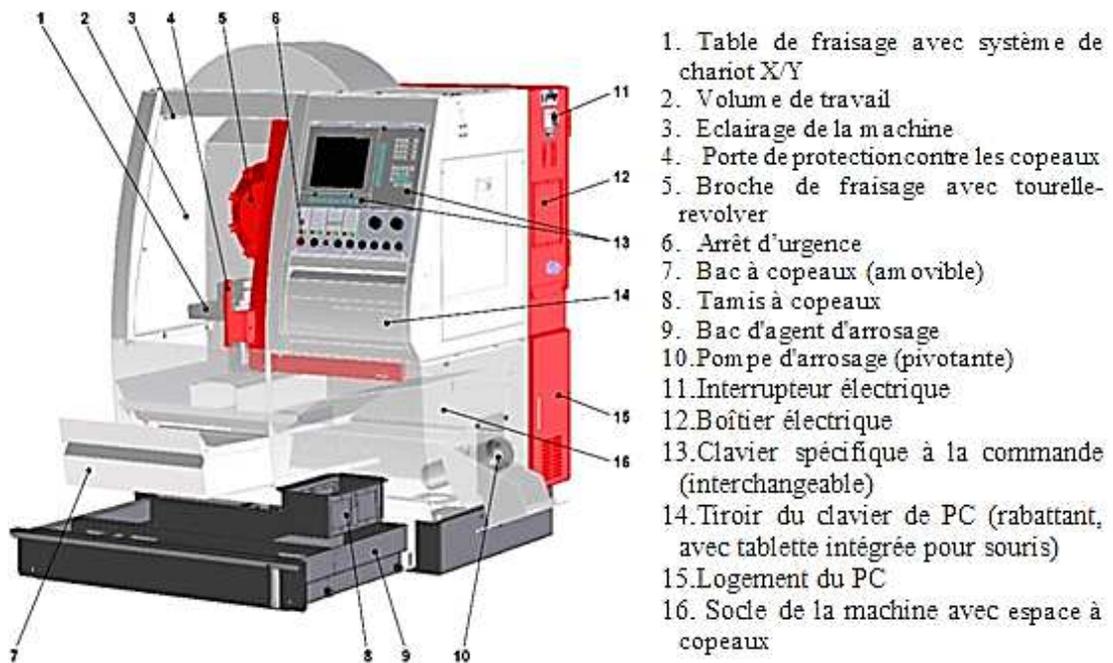


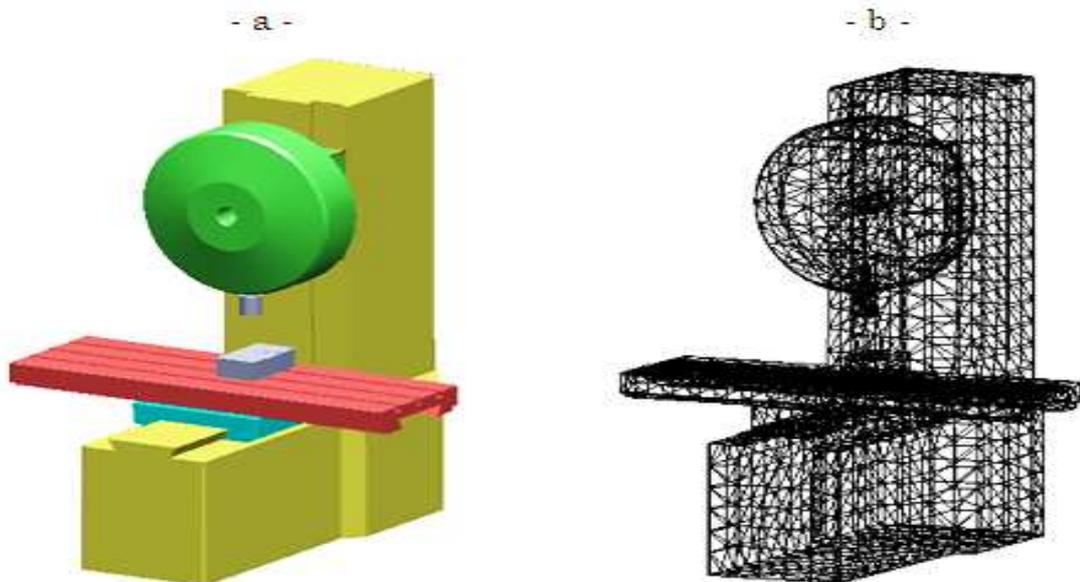
Fig.4.4-La fraiseuse verticale du type -EMCO PC Mill 155[ ?].

D'après la référence [7], la fraiseuse du type «EMCO PC Mill 155» se compose de :

- **Bâti** : Le bâti de la fraiseuse est un groupe de base portant les autres groupes et mécanismes, à l'intérieur du bâti est montée la boîte des vitesses ainsi que le réservoir d'huile, le bâti porte deux glissières, une verticale et l'autre horizontale sous forme de queue.
- **Boîte de Vitesses** : La boîte de changement de vitesses est exécutée comme un groupe indépendant, elle assure les vitesses de rotation de la broche, celle-ci est actionnée par un moteur à courant alternatif.
- **Tête porte-fraise pivotante** : Elle consiste en une broche verticale avec un rouleau porteur, monté dans une boîte séparée.
- **Boîte d'avances** : La boîte d'avances est un groupe indépendant monté au côté gauche de console.
- **Console** : La console est un groupe de base qui unit tous les mécanismes de la chaîne d'avances et distribue le mouvement aux avances longitudinale, transversale et verticale. La console porte les différents organes de commande et dispositifs.
- **Table et Chariot** : Le chariot se déplace sur les glissières rectangulaires de la console à l'aide de la vis de l'avance transversale et de l'écrou fixé dans le support. La course longitudinale de la table est réalisée par une vis tournante au filetage trapézoïdale et un écrou fixe.

#### 4.3.2.1. Modèle géométrique solide de la machine-outil

Le prototype physique de la machine-outil a été mis au point par un modèle CAO. Afin d'établir un Modèle élément fini, la simplification du modèle est nécessaire. Les composants avec moins d'effet sur les caractéristiques dynamiques de l'ensemble de la machine sont supprimés. Les petites caractéristiques des composants sont également supprimées. Le simplifiée modèle est présenté dans la Fig. 4.5-a. Selon les contraintes d'ordre pratique, la partie inférieure de la machine-outil est entièrement limitée. La position relative entre les surfaces de contact est constante à une certaine configuration. Par conséquent, les surfaces de contact sont définies comme contact obligatoire. La rigidité de contact n'est pas mise à jour pendant le processus de calcul. La rigidité initiale peut être obtenue automatiquement sur la plate-forme de SOLIDWORKS par le facteur de contact, la taille de l'élément et le module d'élasticité des matériaux de contact. La rigidité volonté est ajustée dans le processus de mise à jour du modèle élément finiselon les résultats de la simulation de la machine-outil.



**Fig. 4.5-La fraiseuse verticale du type -EMCO PC Mill 155 : a- Modèle géométrique solide, b- Modèle éléments finis.**

#### 4.3.2.2. Modèle éléments finis de la machine-outil

En analyse statique, le modèle éléments finis de la machine-outil à commande numérique (Fig. 4.5-a) est généré en procédant à l'importation du modèle géométrique (solide) de la structure modélisée sous SolidWorks (Fig. 4.5-b).

On définit les propriétés des matériaux, les contraintes (déplacements imposés), les chargements nécessaires et le type de maillage. Ainsi, le maillage global du système est généré par des éléments tétraédriques quadratiques 3D de tailles 41.634 mm. Le système est discrétisé en 12903 éléments liés à 20969 nœuds. Le type d'analyse structurelle que nous effectuons dépend de

l'opération usinage et le matériau à usiner. Nous avons utilisé les données récapitulées dans le tableau suivant :

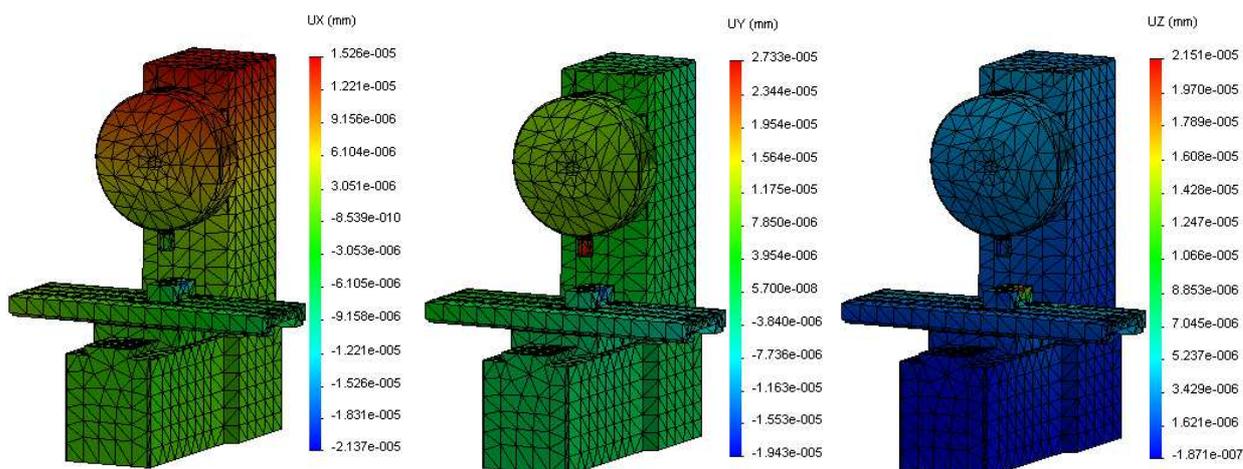
**Tableau 4.1- Les paramètres de coupe.**

Matériau à usiné	Profondeur de passe [mm]	Efforts de coupe [N]	$H_m$ [mm]					
			0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Acier non allié XC 35/XC 42 HB=500à 600 N/mm <sup>2</sup>	0.5	$K_C$	3150	2640	2210	1970	1850	1750
		$F_C$	146,48	122,76	102,77	91,61	86,03	81,38
		$F_A$	97,65	81,84	68,51	61,07	57,35	54,25
		$F_R$	43,94	36,83	30,83	27,48	25,81	24,41
	1	$K_C$	3150	2640	2210	1970	1850	1750
		$F_C$	292,95	245,52	205,53	183,21	172,05	162,75
		$F_A$	195,30	163,68	137,02	122,14	114,70	108,50
		$F_R$	87,89	73,66	61,66	54,96	51,62	48,83
	1.5	$K_C$	3150	2640	2210	1970	1850	1750
		$F_C$	439,43	368,28	308,30	274,82	258,08	244,13
		$F_A$	292,95	245,52	205,53	183,21	172,05	162,75
		$F_R$	131,83	110,48	92,49	82,44	77,42	73,24
	2	$K_C$	3150	2640	2210	1970	1850	1750
		$F_C$	585,90	491,04	411,06	366,42	344,10	325,50
		$F_A$	390,60	327,36	274,04	244,28	229,40	217
		$F_R$	175,77	147,31	123,32	109,93	103,23	97,65

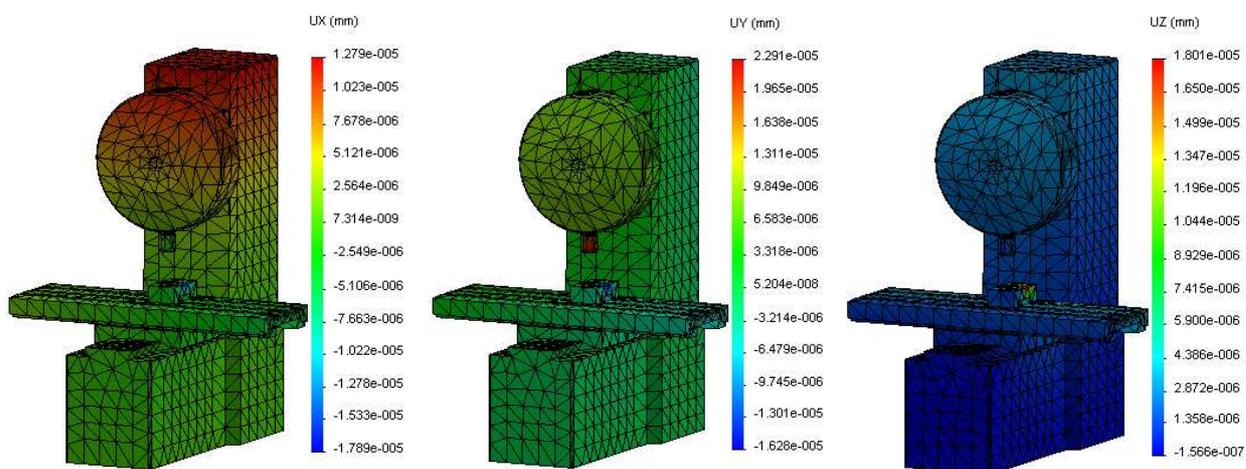
#### 4.4. Résultats

Les Fig.4.6, Fig.4.7, Fig.4.8 et Fig.4.9 montrent les résultats de simulation de la machine-outil à commande numérique menées dans cette étude. Les valeurs de déplacement de la structure de la machine suivant les trois directions sont données dans des tableaux (ANNEXE B). Ces résultats ont été obtenus pour l'usinage d'un matériau en acier non allié XC 35 et pour différents valeurs de profondeur de passe (0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm et 2mm).

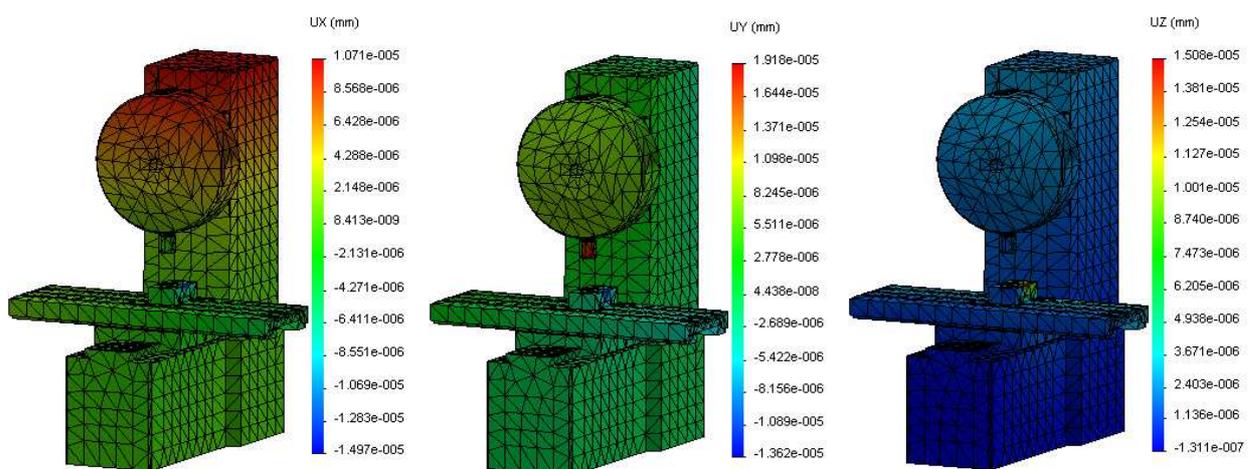
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.1$ mm



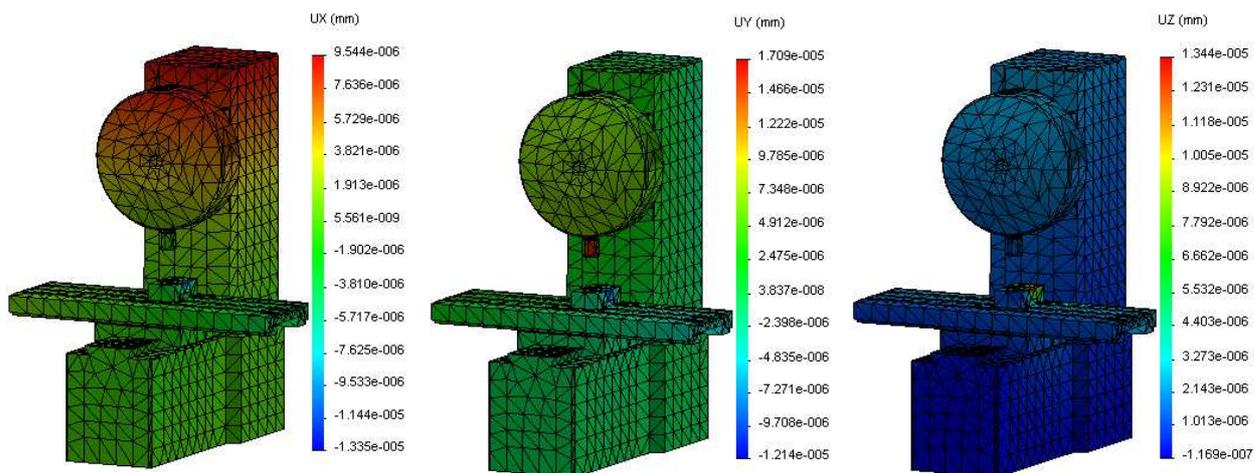
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.2$ mm



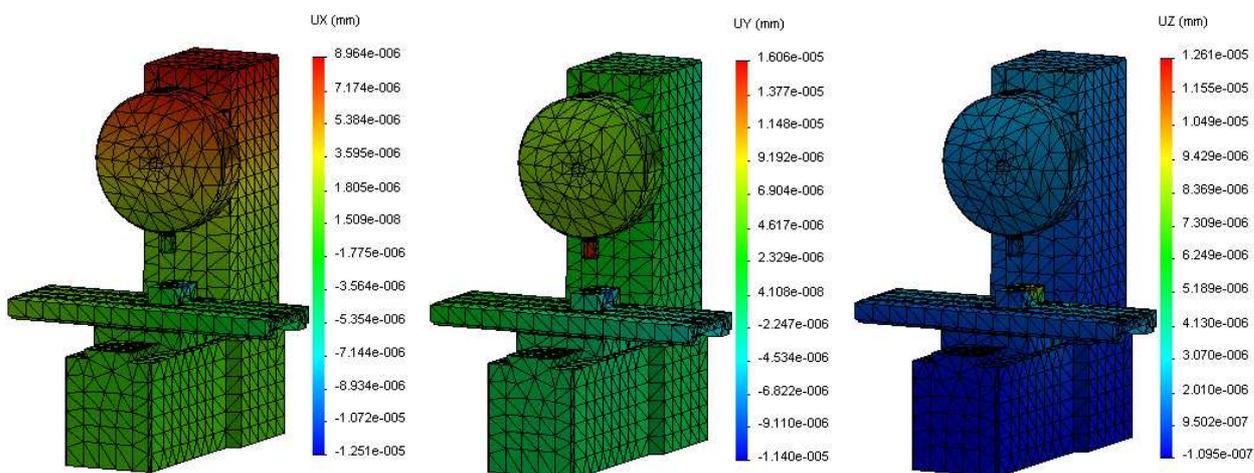
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.4$ mm



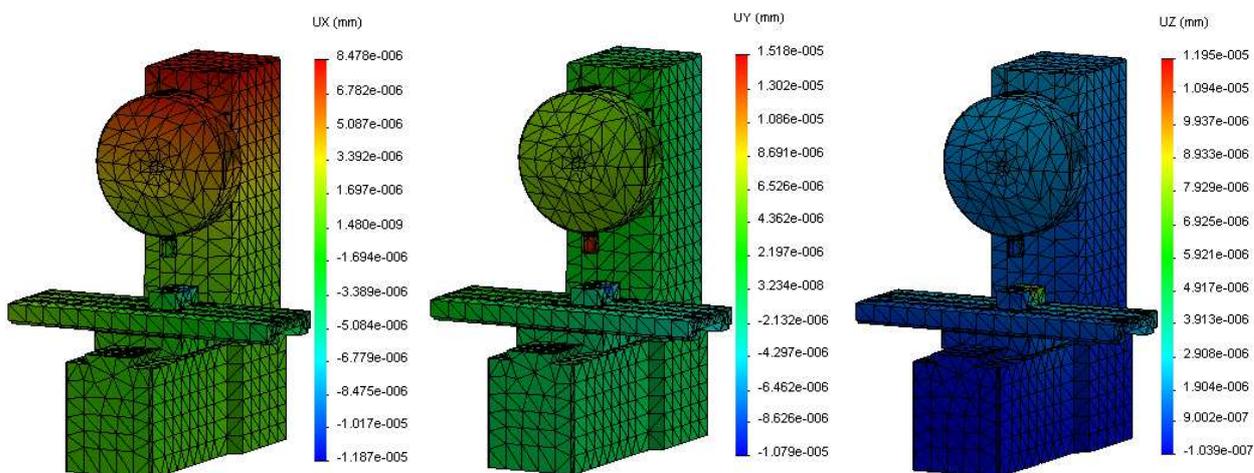
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.6$ mm



### Epaisseur du copeau $H_m = 0.8$ mm

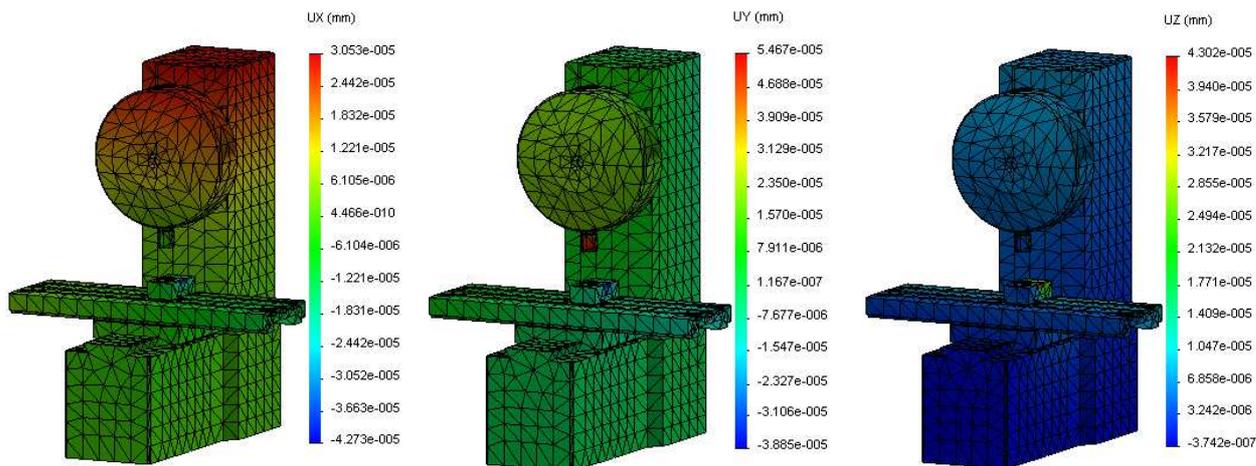


### Epaisseur du copeau $H_m = 1$ mm

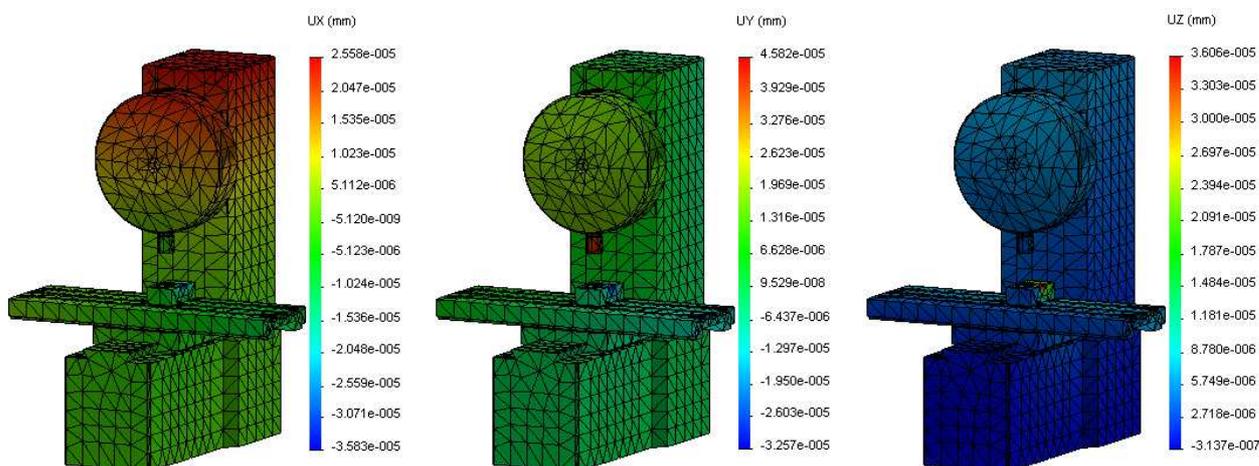


**Fig. 4.6-** Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe  $a_p = 0.5$  mm.

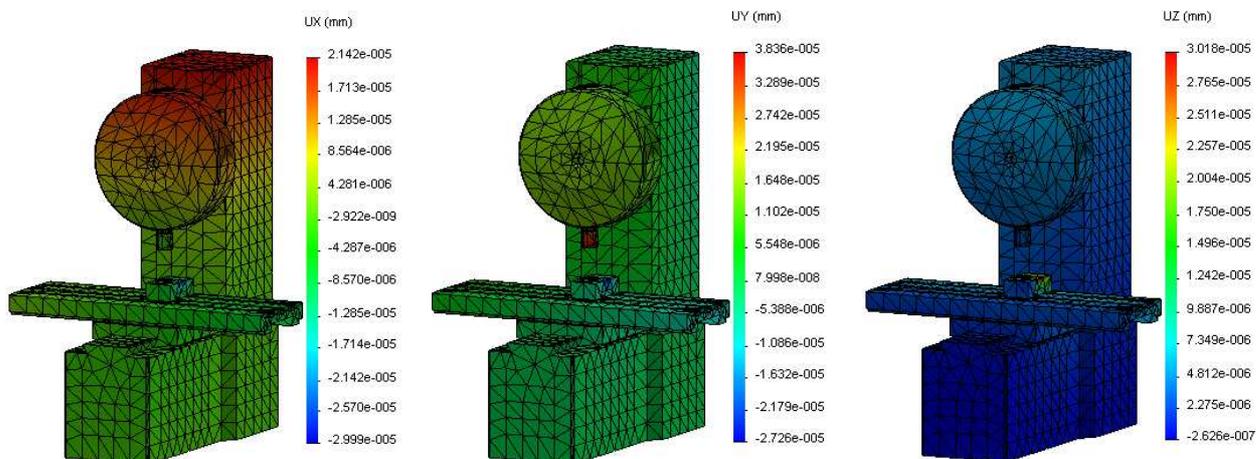
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.1$ mm



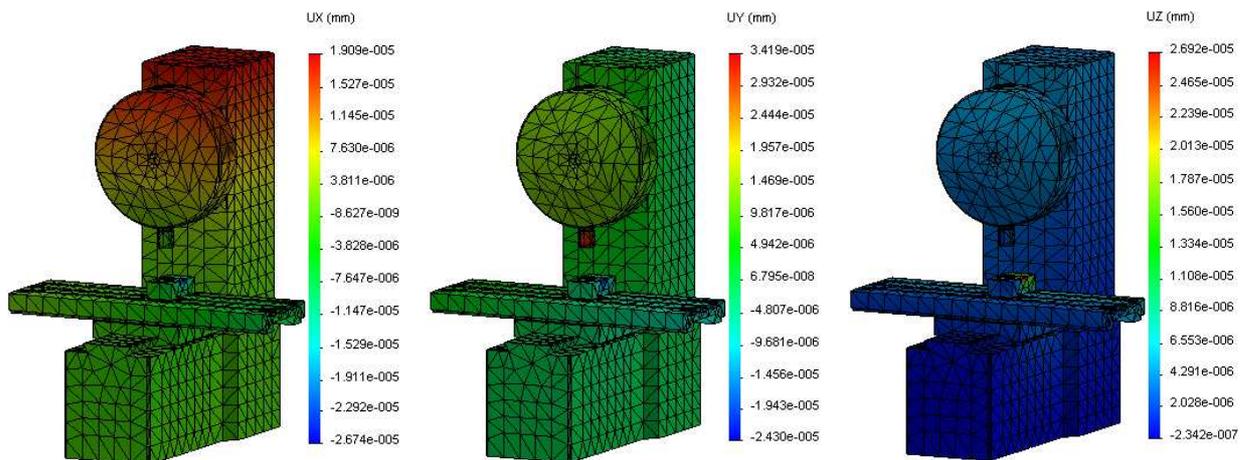
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.2$ mm



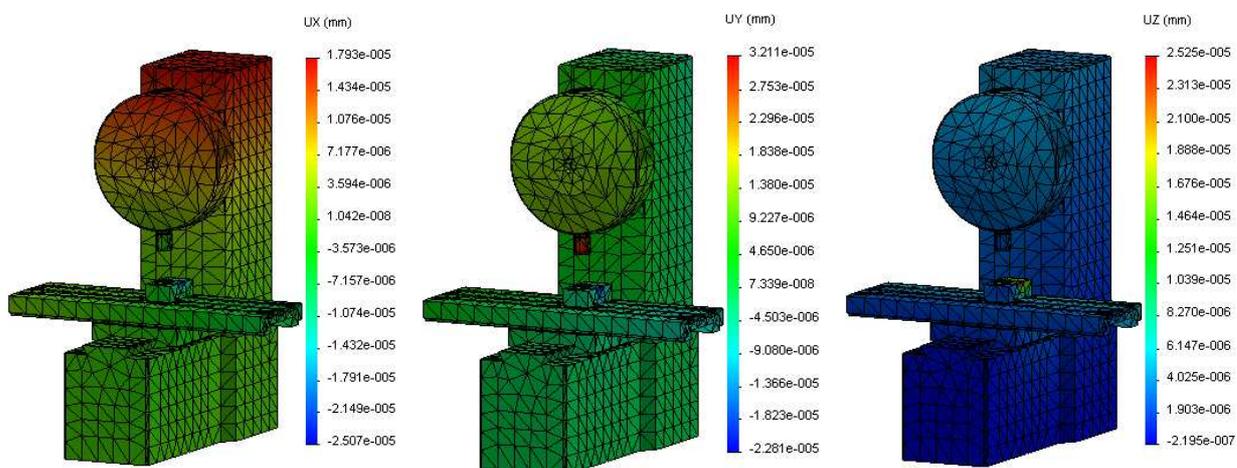
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.4$ mm



### Epaisseur du copeau $H_m = 0.6 \text{ mm}$



### Epaisseur du copeau $H_m = 0.8 \text{ mm}$



### Epaisseur du copeau $H_m = 1 \text{ mm}$

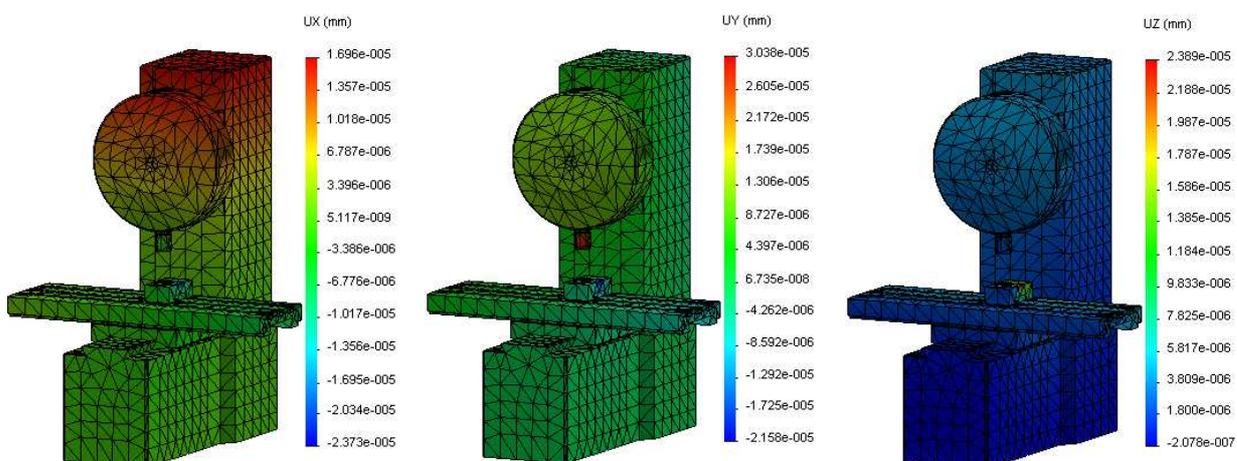
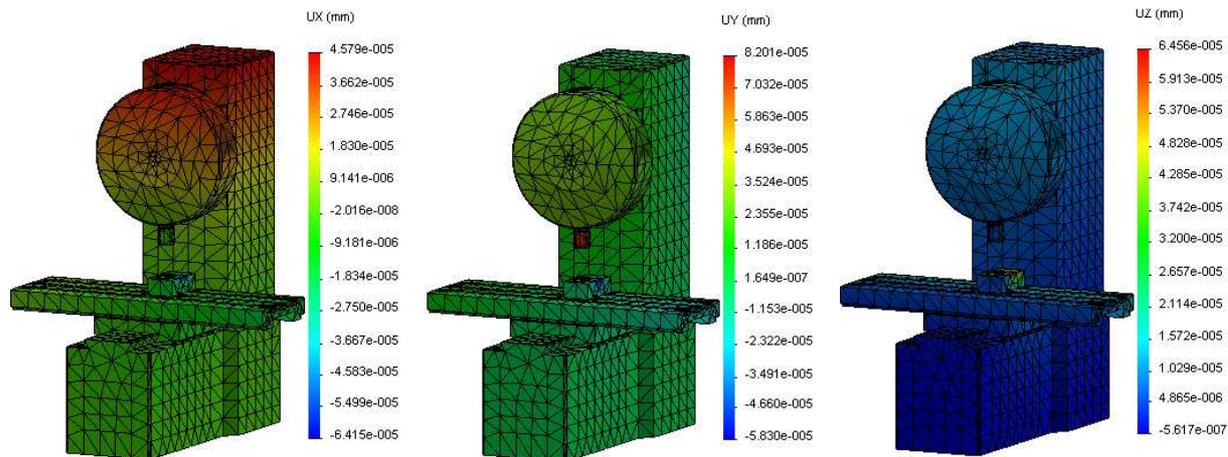
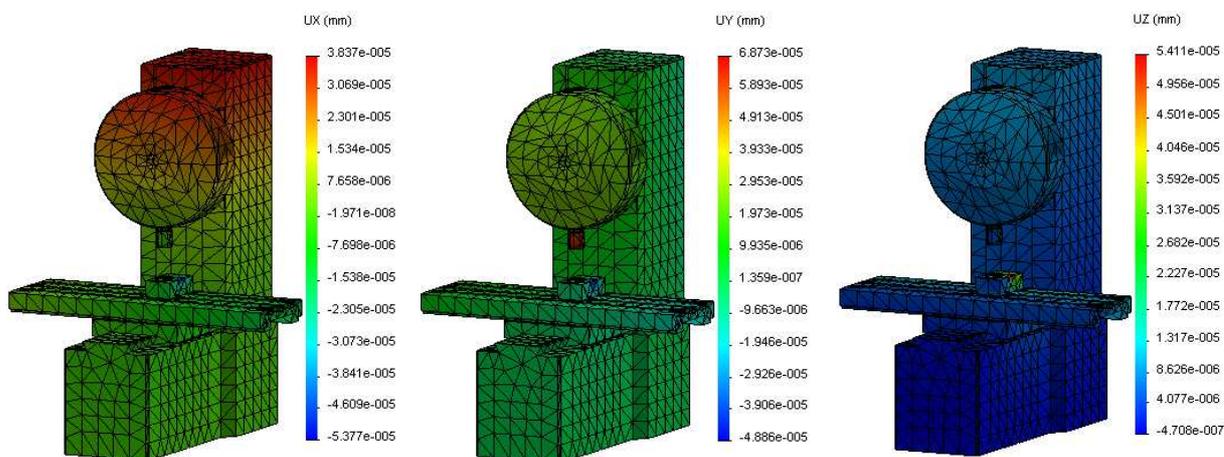


Fig.4.7- Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe  $a_p = 1 \text{ mm}$ .

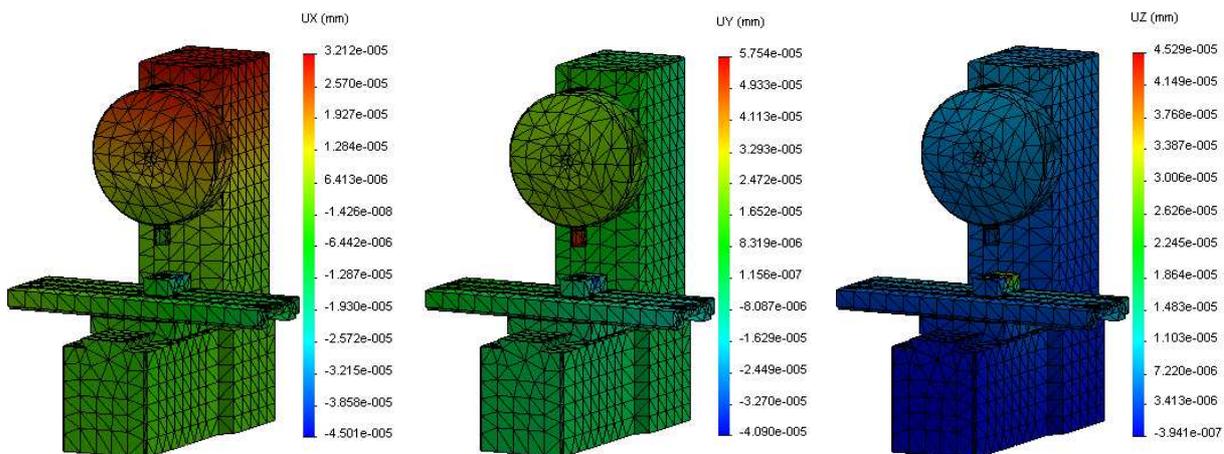
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.1$ mm



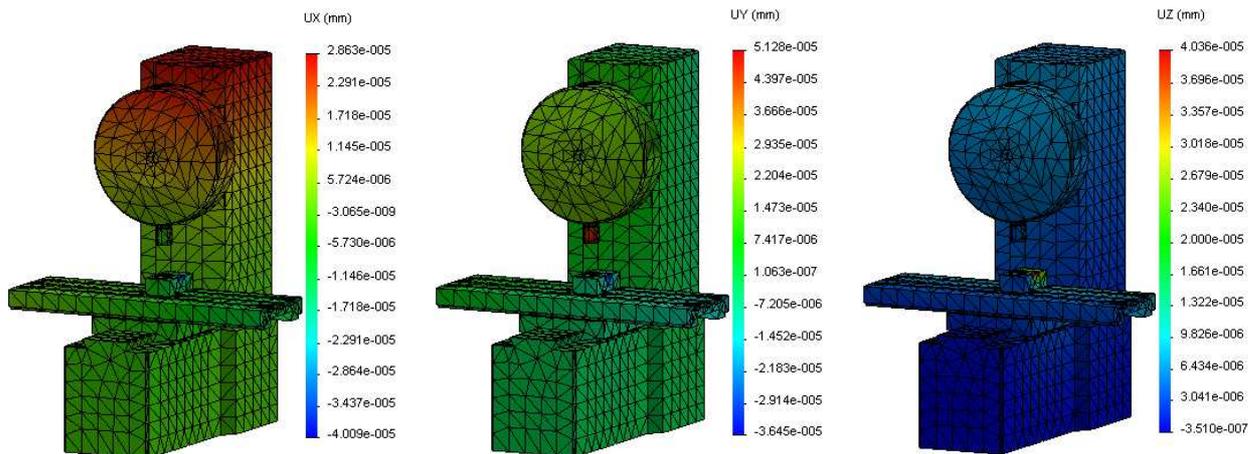
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.2$ mm



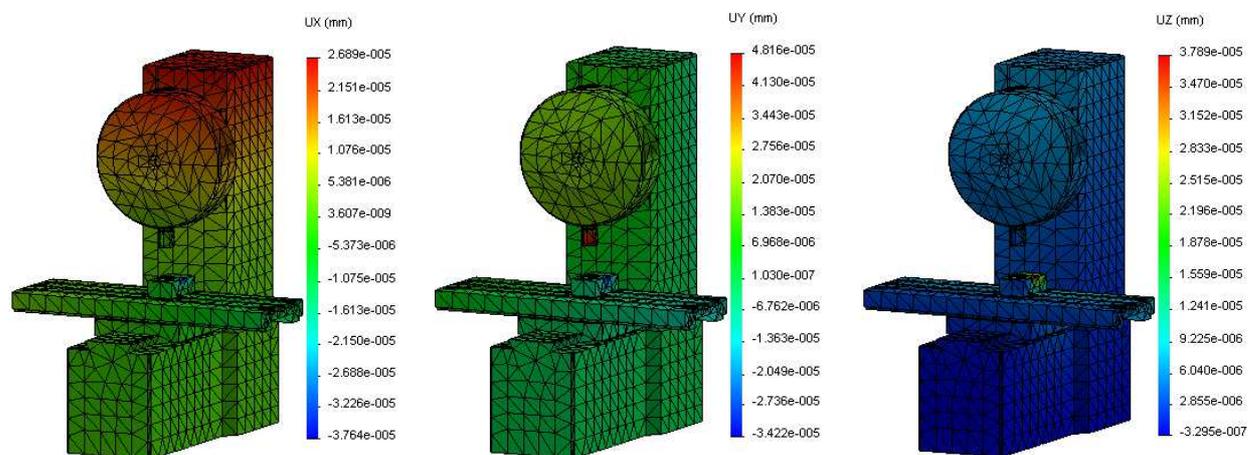
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.4$ mm



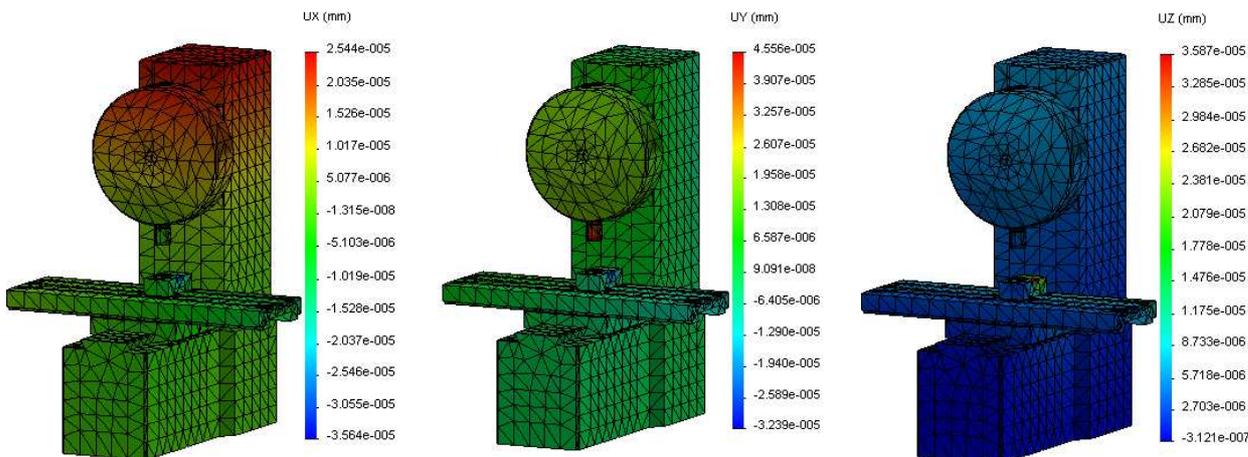
**Epaisseur du copeau  $H_m = 0.6$  mm**



**Epaisseur du copeau  $H_m = 0.8$  mm**

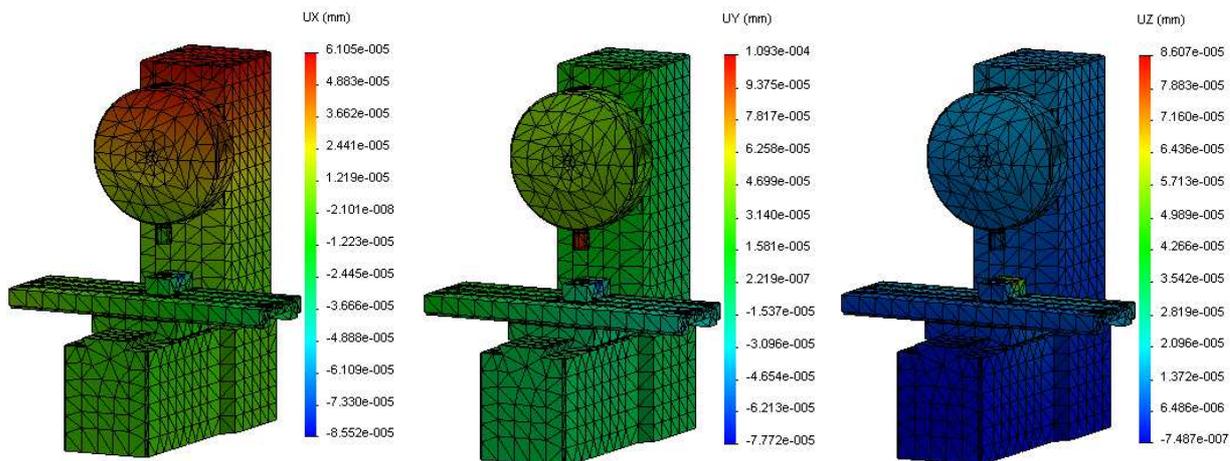


**Epaisseur du copeau  $H_m = 1$  mm**

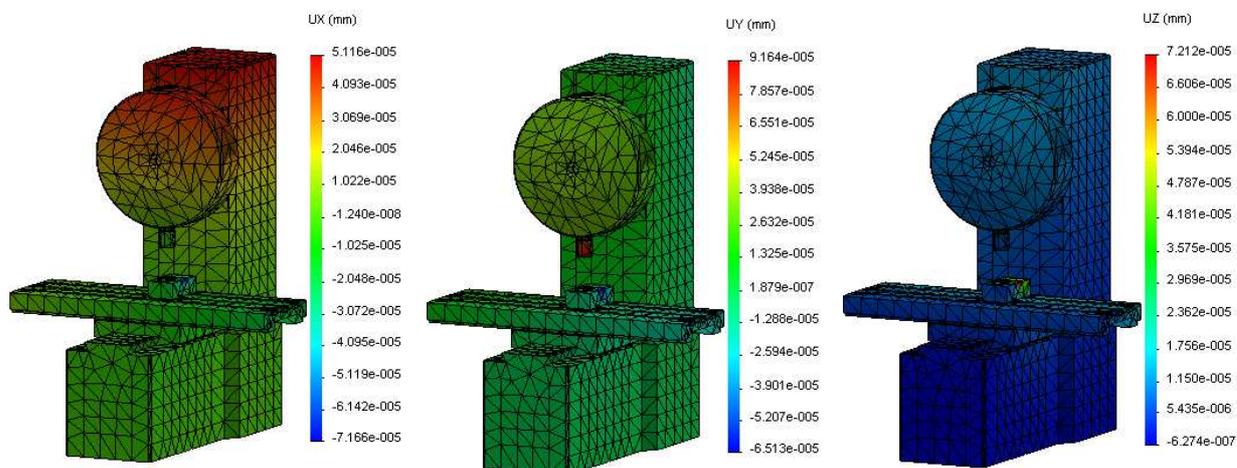


**Fig.4.8- Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe  $a_p = 1.5$  mm.**

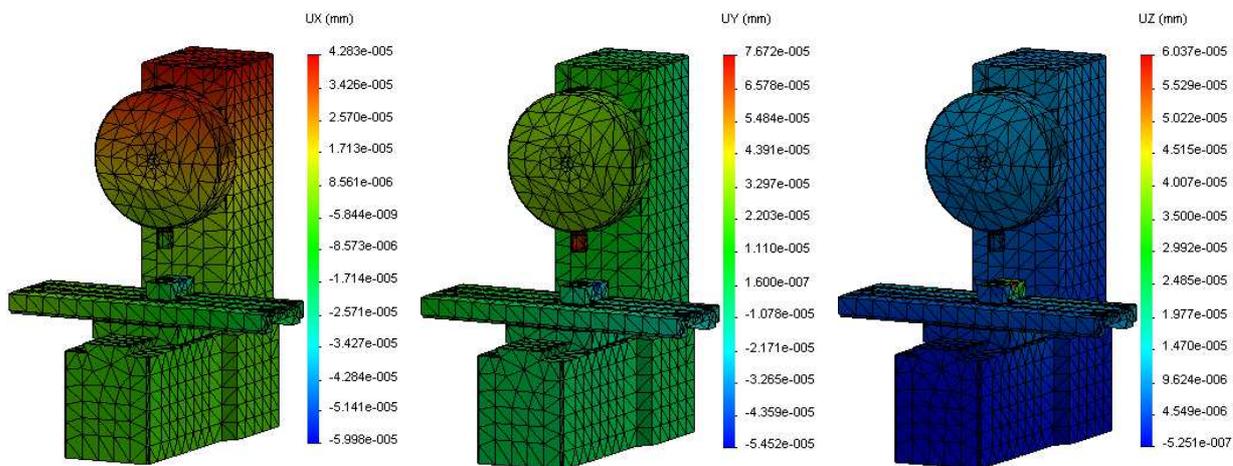
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.1$ mm



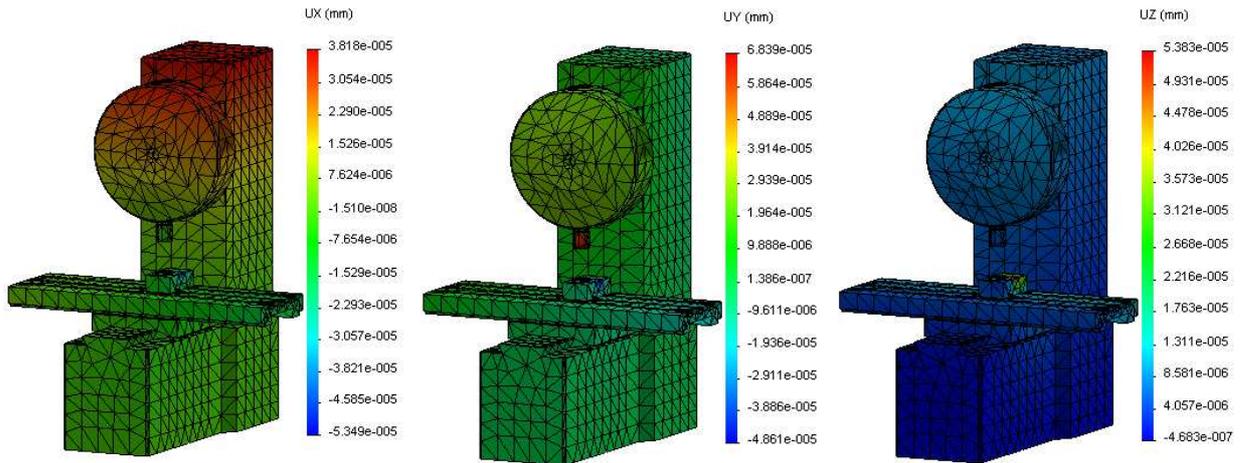
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.2$ mm



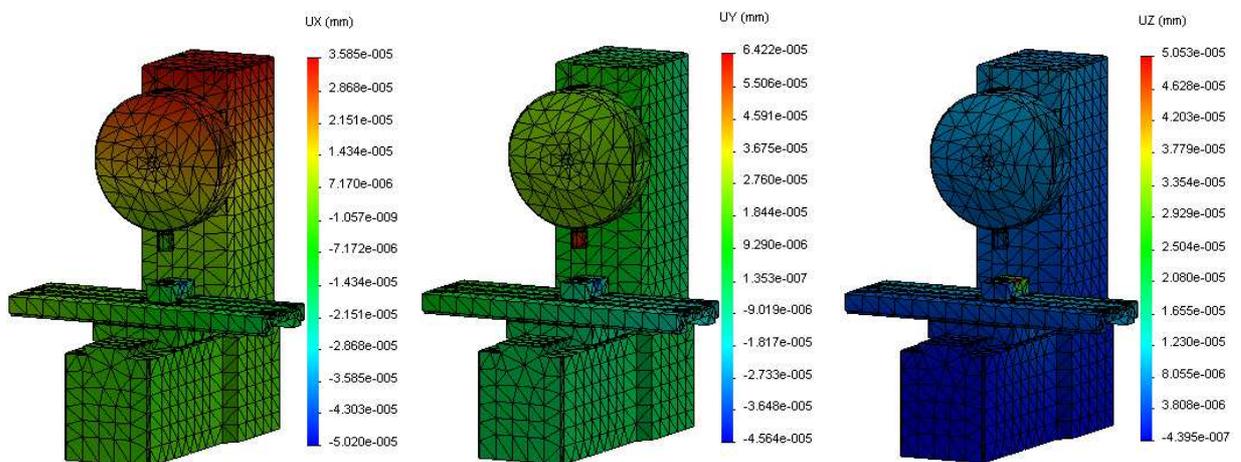
### Epaisseur du copeau $H_m = 0.4$ mm



### Epaisseur du copeau $H_m = 0.6 \text{ mm}$



### Epaisseur du copeau $H_m = 0.8 \text{ mm}$



### Epaisseur du copeau $H_m = 1 \text{ mm}$

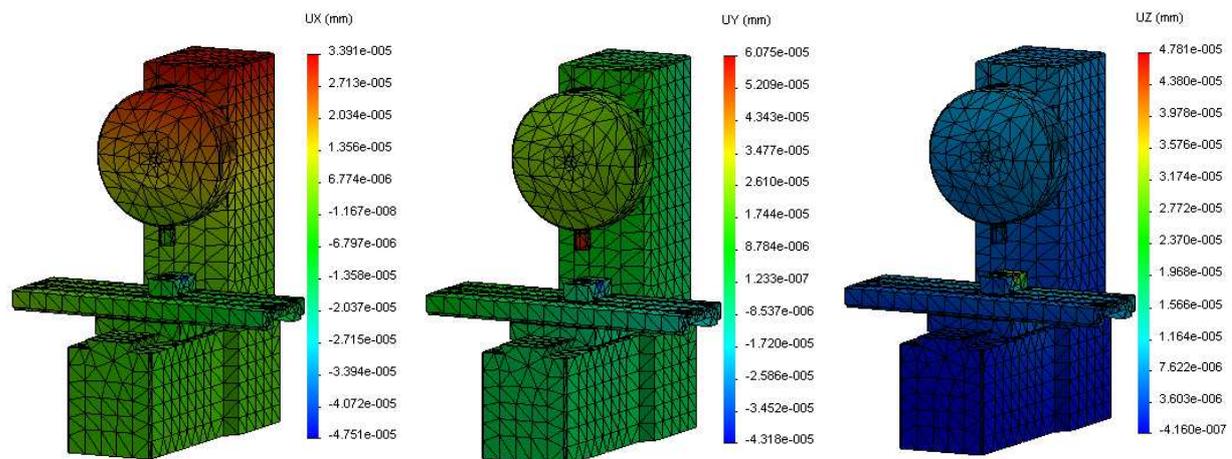
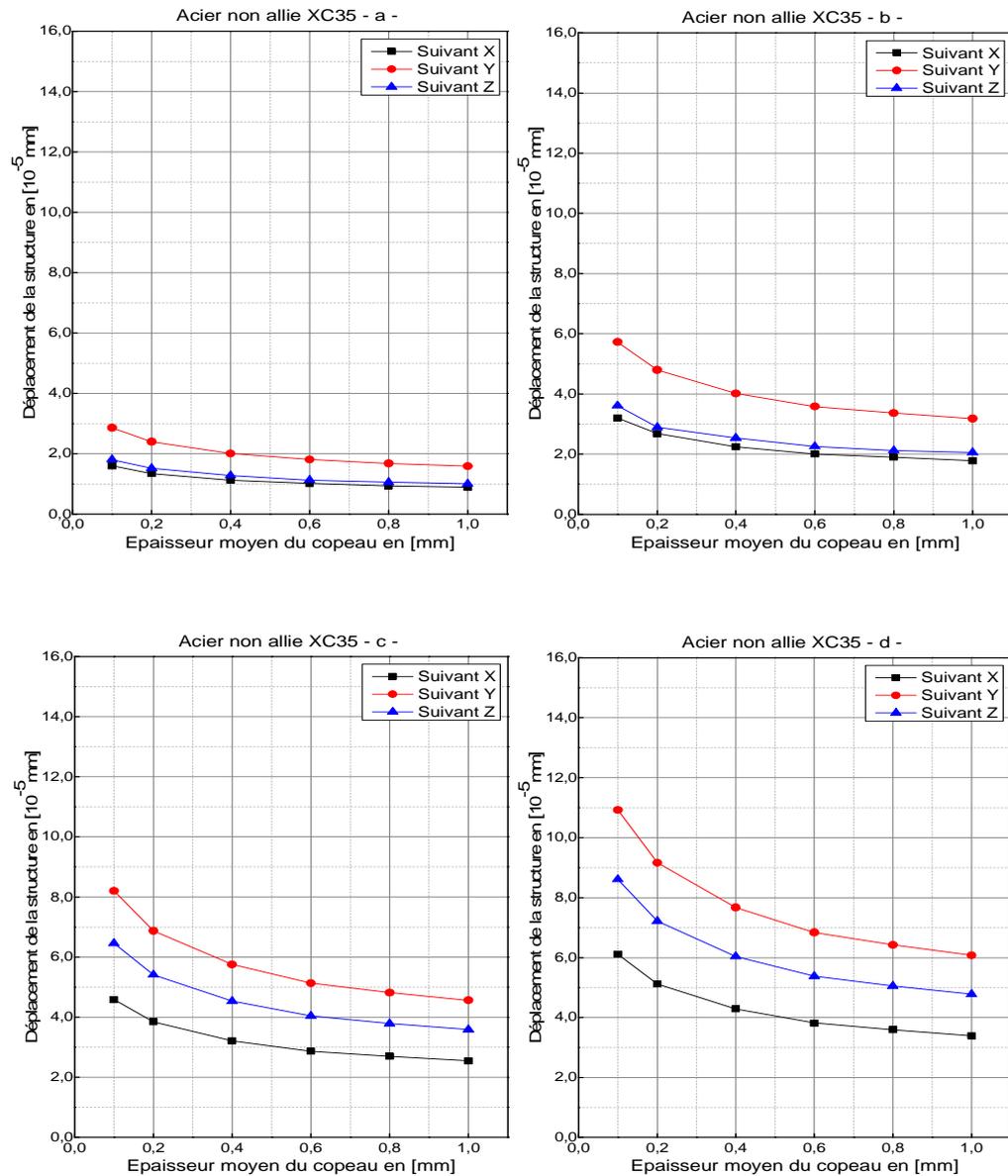


Fig.4.9- Les déplacements de la structure due aux efforts de coupe suivant les trois directions pour une profondeur de passe  $a_p = 2 \text{ mm}$ .

#### 4.5. Discussions des résultats

La Fig.4.10 représente les déplacements de la structure de la MOCN en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau.



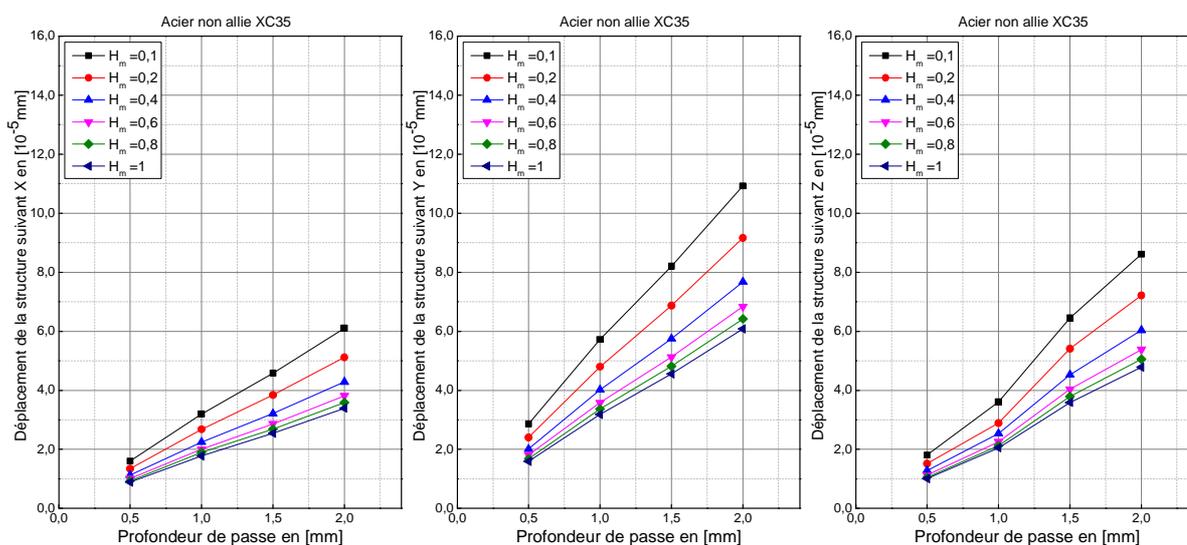
**Fig.4.10 -L'évolution de déplacement de la structure en fonction de l'épaisseur moyen du copeau : a-  $a_p = 0.5$  mm, b-  $a_p = 1$  mm, c-  $a_p = 1.5$  mm, d-  $a_p = 2$  mm.**

L'analyse de cette figure nous permet de déduire que lorsque l'épaisseur du copeau augmente, les déplacements de la structure diminuent pour les trois directions X, Y et Z :

- Premier graphe : le déplacement varie de  $1.6 \times 10^{-5}$  mm à  $0.888 \times 10^{-5}$  mm suivant X, de  $2.863 \times 10^{-5}$  mm à  $1.59 \times 10^{-5}$  mm suivant Y et de  $1.805 \times 10^{-5}$  mm à  $1.003 \times 10^{-5}$  mm suivant Z.
- Deuxième graphe : le déplacement varie de  $2.123 \times 10^{-5}$  mm à  $1.193 \times 10^{-5}$  mm suivant X, de  $3.799 \times 10^{-5}$  mm à  $2.136 \times 10^{-5}$  mm suivant Y et de  $2.396 \times 10^{-5}$  mm à  $1.3 \times 10^{-5}$  mm suivant Z.

- Troisième graphe : le déplacement varie de  $1.413 \times 10^{-5}$  mm à  $0.795 \times 10^{-5}$  mm suivant X, de  $2.529 \times 10^{-5}$  mm à  $1.423 \times 10^{-5}$  mm suivant Y et de  $1.594 \times 10^{-5}$  mm à  $0.986 \times 10^{-5}$  mm suivant Z.
- Quatrième graphe : le déplacement varie de  $0.86 \times 10^{-5}$  mm à  $0.465 \times 10^{-5}$  mm suivant X, de  $1.355 \times 10^{-5}$  mm à  $0.832 \times 10^{-5}$  mm suivant Y et de  $0.971 \times 10^{-5}$  mm à  $0.653 \times 10^{-5}$  mm suivant Z.

La Fig.4.11 montre la variation des déplacements de la structure de la MOCN en fonction de la profondeur de passe.



**Fig.4.11- L'évolution de déplacement de la structure en fonction de la profondeur de passe : a- suivant X, b- suivant Y, c- suivant Z.**

D'après la Fig.4.11 on remarque que les déplacements de la structure suivant les trois direction (X,Y,Z) augmente linéairement avec l'augmentation du profondeur de passe :

- Premier graphe : la ponte du déplacement suivant X varie de  $1.72 \times 10^{-5}$  à  $3.08 \times 10^{-5}$ .
- Deuxième graphe : la ponte du déplacement suivant Y varie de  $3.07 \times 10^{-5}$  à  $5.54 \times 10^{-5}$ .
- Troisième graphe : la ponte du déplacement de suivant Z varie de  $2.59 \times 10^{-5}$  à  $4.65 \times 10^{-5}$ .

Voir Tableau 4.2

**Tableau 4.2- La variation de la ponte de déplacement par rapport à l'épaisseur de copeau.**

Epaisseur du copeau [mm]		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Ponte de déplacement de la structure [ $10^{-5}$ mm]	X	3,08	2,57	2,17	1,93	1,81	1,72
	Y	5,54	4,61	3,89	3,46	3,25	3,07
	Z	4.65	3,89	3,28	2,92	2,74	2,59

Les résultats ont montré l'augmentation du déplacement de l'outil suivant les trois directions par l'augmentation de la profondeur de passe, et on remarque aussi que le déplacement suivant l'axe Y est plus grand que les autres axes X et Z par ce que l'effort d'avance de l'outil et

dans le sens de l'axe Y. On constate que l'écart de déplacement suivant Y par rapport aux écarts des déplacements X et Z augmente lorsque la profondeur de passe augmente. Voir Tableau 4.3

**Tableau 4.3-Variation du déplacement de l'outil en fonction de profondeur de passe.**

<b>Profondeur de passe [mm]</b>		0.5	1	1.5	2
<b>Déplacement de l'outil En [10<sup>-6</sup> mm]</b>	<b>X</b>	1.88	3.77	5.66	7.54
	<b>Y</b>	27.33	54.57	82.01	109.12
	<b>Z</b>	2.98	5.96	9.32	12.43

On constate que le déplacement du bâti suivant les trois directions augmente lorsque la profondeur de passe augmente, et on remarque aussi que le déplacement suivant l'axe X est plus grand que les autres axes Y et Z par ce que l'effort du coupe de l'outil est dans le sens de l'axe X. On observe que l'écart de déplacement suivant Y par rapport aux écarts des déplacements X et Z augmente lorsque la profondeur de passe augmente. Voir Tableau 4.4

**Tableau 4.4-Déplacement du bâti en fonction de profondeur de passe**

<b>Profondeur de passe [mm]</b>		0.5	1	1.5	2
<b>Déplacement du bâti [10<sup>-6</sup> mm]</b>	<b>X</b>	15.03	30.34	45.51	60.68
	<b>Y</b>	5.82	11.65	17.47	23.30
	<b>Z</b>	3.82	7.65	11.49	15.32

L'analyse de cette étude nous permet de déduire que lorsque la profondeur de passe augmente, il y a augmentation de déplacement du chariot suivant les trois directions.

Et on remarque aussi que le déplacement suivant l'axe Z est plus grand que les autres axes X et Y par ce que l'effort de la pénétration de l'outil est dans le sens de l'axe Z. Voir Tableau 4.5

**Tableau 4.5- Déplacement du chariot en fonction de profondeur de passe**

<b>Profondeur de passe [mm]</b>		0.5	1	1.5	2
<b>Déplacement du chariot En [10<sup>-6</sup> mm]</b>	<b>X</b>	1.66	3.34	5.02	6.71
	<b>Y</b>	2.21	3.86	6.65	8.86
	<b>Z</b>	2.53	5.10	7.60	9.98

On remarque que le déplacement de la table suivant les trois directions augmente lorsque la profondeur de passe augmente, et on constate aussi que le déplacement suivant l'axe Z est presque constant. On observe que l'écart de déplacement suivant Y est plus grand que l'écart de déplacement suivant X. Voir Tableau 4.6

**Tableau 4.6- Déplacement de la table en fonction de profondeur de passe.**

Profondeur de passe [mm]		0.5	1	1.5	2
Déplacement dutable En [ $10^{-6}$ mm]	<b>X</b>	-5.85	-11.71	-17.58	-23.44
	<b>Y</b>	-6.83	-13.66	-20.51	-27.34
	<b>Z</b>	4.23	8.46	12.70	16.90

Les résultats ont montré l'augmentation de déplacement de la pièce suivant les trois directions par l'augmentation de profondeur de passe, et on remarque que le déplacement suivant l'axe Z est plus grand que les autres axes X et Y car l'effort d'avance de l'outil est dans le sens de l'axe Y. Voir Tableau 4.7

**Tableau 4.7- Déplacement de la pièce en fonction de profondeur de passe.**

Profondeur de passe [mm]		0.5	1	1.5	2
Déplacement dupièce En [ $10^{-6}$ mm]	<b>X</b>	-16.83	-33.66	-50.53	-67.36
	<b>Y</b>	-15.25	-30.51	-45.78	-61.04
	<b>Z</b>	21.28	42.56	63.88	85.16

D'après le modèle mathématique développé précédemment par l'équation (4.31), on obtient le vecteur de correction des déplacements globale de la structure de la machine- outil à commande numérique en fonction des valeurs de profondeur de passe suivantes :

▪ **Profondeur de passe = 0.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 0 & 2.78 \times 10^{-5} & -2.57 \times 10^{-5} & -200.00080 \\ -2.78 \times 10^{-5} & 0 & 1.83 \times 10^{-5} & 99.99611 \\ 2.57 \times 10^{-5} & -1.83 \times 10^{-5} & 0 & -249.49586 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

▪ **Profondeur de passe = 1 mm**

$$\begin{bmatrix} 0 & 5.55 \times 10^{-5} & 5.18 \times 10^{-5} & -200.00157 \\ -5.55 \times 10^{-5} & 0 & 3.36 \times 10^{-5} & 99.99219 \\ 5.18 \times 10^{-5} & -3.36 \times 10^{-5} & 0 & -248.99176 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

▪ **Profondeur de passe = 1.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 0 & 8.40 \times 10^{-5} & -7.68 \times 10^{-5} & -200.00248 \\ -8.40 \times 10^{-5} & 0 & 5.51 \times 10^{-5} & 99.98826 \\ 7.68 \times 10^{-5} & -5.51 \times 10^{-5} & 0 & -248.48749 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

▪ **Profondeur de passe = 2 mm**

$$\begin{bmatrix} 0 & 11.21 \times 10^{-5} & -10.34 \times 10^{-5} & -200.00325 \\ -11.21 \times 10^{-5} & 0 & 7.33 \times 10^{-5} & 99.98436 \\ 10.34 \times 10^{-5} & -7.33 \times 10^{-5} & 0 & -247.98333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

#### 4.6. Conclusion

Ce chapitre a résumé la simulation du comportement mécanique de la structure d'une MOCN. Après une brève introduction sur les paramètres de coupes, la description de la fraiseuse EMCO PC MILL 155 et la présentation du logiciel de la conception et simulation SOLIDWORKS. Les résultats ont montré que dans le cas de fraisage, l'outil fléchit sous l'effort de coupe, ce qui affecte la précision de la pièce finie.

Pour surmonter ce problème, il faut bien choisir les conditions de coupe, à savoir la vitesse d'avance et la profondeur radiale et axiale de coupe pour réduire cette erreur. On observe aussi que la modification de la trajectoire d'outil permet d'améliorer la précision tout en gardant une production optimale. Cette procédure nécessite une bonne modélisation de l'effort de coupe et une description de la géométrie de l'outil.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce travail est consacré à l'évaluation des erreurs géométriques d'une machine-outil à commande numérique plus précisément sur l'amélioration des performances de ces machines-outils en termes de précision d'usinage et de mesure, dans le but de produire des pièces de bonne qualité. La première étape est consacrée à une étude bibliographique sur la machine-outil à commande numérique. En deuxième étape, nous présentant le but de réaliser le système de mesure actuel, une revue bibliographique concernant la précision dans les machines-outils à commande numérique a été présentée. Dans cette étape, il était nécessaire d'analyser les différentes sources d'erreurs affectant d'une façon directe ou indirecte la précision, de proposer une classification typique des erreurs ainsi que leurs contributions dans la composante totale de l'erreur. Il était question également, des mesures et techniques d'évaluation et des approches de compensation de ces erreurs. Et nous avons développé un modèle cinématique simulant le comportement variationnel de la MOCN à trois axes linéaires qui sera réalisé à partir de la matrice de transformation homogène. Ce modèle est conçu pour l'évaluation directe et simultanée des six erreurs géométriques sur une machine-outil à commande numérique. Cette configuration permet de quantifier les deux déviations linéaires, soit la rectitude horizontale et la rectitude verticale ainsi que les trois erreurs angulaires, le lacet, le tangage et le roulis.

En troisième étape, nous débutant tout d'abord, par une étude qui nous permet la détermination des efforts de coupe pendant une opération d'usinage de fraisage en fonction non seulement des conditions de coupe mais aussi de la géométrie d'outil. On constate que les efforts de coupe diminuent lorsque l'épaisseur du copeau augmente. Et elles augmentent considérablement avec l'augmentation de la profondeur de passe. Ensuite, on passe à la conception de la structure de notre machine-outil par le logiciel SOLIDWORKS. En finira par, une simulation de la structure de cette machine-outil par l'influence des paramètres de coupe pour déterminer la résistance et la rigidité en établissant un compte rendu des déplacements des composantes (bâti, chariot, table, outil et pièce). Le type d'analyse structurelle que nous effectuons dépend de l'opération d'usinage et le matériau à usiné. Les résultats de cette simulation ont montré que les déplacements et les déformations de la structure de la machine-outil augmentent linéairement avec l'augmentation de la profondeur de passe, et diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du copeau. On observe aussi :

- Le déplacement de l'outil suivant l'axe Y est plus grand que les autres axes X et Z par ce que l'effort d'avance de l'outil est dans le sens de l'axe Y.
- Le déplacement du bâti suivant l'axe X est plus grand que les autres axes Y et Z par ce que l'effort du coupe de l'outil est dans le sens de l'axe X.

- Les déplacements du chariot et de la pièce suivant l'axe Z sont plus grands que les autres axes X et Y, car l'effort de pénétration de l'outil est dans le sens de l'axe Z.
- Le déplacement de la table suivant l'axe Z est presque constant par rapport aux axes X et Y.

On conclut que la structure de machine-outil est rigide, car les déformations plastiques sont presque négligeables par rapport aux déformations élastiques.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Merghache, « Contrôle et mesure intégrée sur machine-outil CNC- Contribution à l'identification et étude des erreurs géométriques », département de génie mécanique, UABB Tlemcen. Mémoire de magister, 2009.
- [2] K. SORBY, « Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations », International Journal of Machine Tool and Manufacture, Volume (47), Pages (299–306), Elsevier, 2007.
- [3] A. Dugas, « Simulation d'usinages de formes complexes », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Thèse de Doctorat, 2002.
- [4] B. Mery, F. Charpentier, « Machines-outils à commande numérique », polycopié de cours IUFM de Créteil, Centre Scientifique et Technologique, site de Cachan, 1996.
- [5] B. Mery, Edition Hermès, « Machine à Commande Numérique », L'école supérieure des arts et métiers l'ENS de Cachan Paris, 1997.
- [6] E. Duc, E. Lefur, « Machines-Outils à Commande Numérique », L'école supérieure des arts et métiers l'ENS de Cachan Paris, 1997.
- [7] EMCO MAIER, « EMCO PC Mill 155 : Fraise commandée par PC pour la formation », Département Documentation Technique A-5400 Hallein, Austria, Réf.-N°. FR 4345, Edition A2001-04.
- [8] A. Slocum, « Precision Machine Design: Macromachine design philosophy and its applicability to the design of Micromachines », Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Page (37–42), 1992.
- [9] H. Bouchenitfa, « Contribution à la détermination et à l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maîtrise des procédés de fabrication », Départements de génie mécanique, Université Mentouri-Constantine, Thèse de doctorat, 2010.
- [10] J. Bryan, « International Status of Thermal Error Research », CIRP Annals, Volume (39), Pages (645–656), Elsevier, 1990.
- [11] J. K. Rai, P. Xirouchakis, « Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components », International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume (48), Pages (629–643), Elsevier, 2008.
- [12] A. Dugas, J.J. Lee, J.Y. Hascogt, « An enhanced machining simulator with tool deflection error analysis », Journal of Manufacturing Systems, Volume (21), Pages (451–463), Elsevier, 2002.
- [13] V. Rangunath, B. Moshe, « Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools », CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume (35), Pages (255–258), Elsevier, 1986.

- [14] R. Ramesh, M. Mannan, « Error compensation in machine tools – review. Part I: Geometric, Cutting- Force induced and fixture-dependent errors », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume (40), Pages (1235–1256), Elsevier, 2000.
- [15] K. Kim, K.M. Kim, « Volumetric accuracy analysis based on generalized geometric error model in multi-axis machine tools », *Journal of Mechanic Theory*, Volume (26), Pages (207–219), Elsevier, 1991.
- [16] S. Zhu, G. Ding, S. Qin, j. Lei , L. Zhuang , K. Yan, « Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume (59), Pages (24–29), Elsevier, 2012.
- [17] J. Cauvier, « Amélioration de la prédiction de la capabilité des centres d’usinage à têtes multiples », *Ecole de technologie supérieure, Université de Québec, Maîtrise en ingénierie*, 2011.
- [18] T. Erkan, « Méthodes de suivi de l’état des machines-outils par palpé d’artefacts », *Départements de génie mécanique, Ecole polytechnique de Montréal, Thèse de doctorat*, 2010.
- [19] R. Guiassa, « Compensation des erreurs d’usinage par le processus intermittent d’inspection », *Départements de génie mécanique, Ecole polytechnique de Montréal, Maîtrise ès sciences appliquées*, 2009.
- [20] S.H. Zargarbashi et J.R. Mayer, « Single setup estimation of a five-axis machine tool eight link errors by programmed end point constraint and on the fly measurement with Cap ball sensor », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume (49), Pages (759–766), Elsevier, 2009.
- [21] B. Bringmann et W. Knapp, « Model-based 'Chase-the-Ball' calibration of a 5-axes machining center C », *IRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume (55), Pages (531–534), Elsevier, 2006.
- [22] N. Barka, « Développement d'un système de mesure en temps réel des erreurs dans les machines-outils à axes multiples pour une compensation active », *département de mathématique et informatique Université du Québec à Rimouski, Maîtrise en ingénierie* 2005
- [23] S. Weikert, « R-test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools C », *IRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume (53), Pages (429–432), Elsevier, 2004.
- [24] H. Yang, Jun Ni, « Dynamic modeling for machine tool thermal error compensation », *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume (125), Pages (245–254), ASME, 2003.

- [25] S. H. H. Zargarbashi et J. R. R. Mayer, « Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume (46), Pages (1823–1834), Elsevier, 2002
- [26] W. T. Lei, Y. Y. Hsu, « Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball, Part I: Design and modeling », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume (42), Pages (1153–1162), Elsevier, 2002.
- [27] S. Ibaraki, Y. Kakino, K. Lee, Y. Ihara, J. Braasch, A. Eberherr, « Diagnosis and compensation of motion errors in NC machine tools by arbitrary shape contouring error measurement », *Laser Metrology and Machine Performance* Volume (4), Pages (59–68), Springer, 2001.
- [28] A.C. Okafor, Y.M. Ertekin, « Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 1: Linear positional errors », *Journal of Materials Processing Technology*, Volume (105), Pages (394–406), Elsevier, 2000.
- [29] E.S. Lee, S.H. Suh, J.W. Shon, « Comprehensive method for calibration of volumetric positioning accuracy of CNC-machines », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume (14), Pages (43–49), Elsevier, 1998.
- [30] J. B. Bryan, « Simple method for testing measuring machines and machine tools. Part 1: Principles and applications », *Precision Engineering*, Volume (4), Pages (61–69), Elsevier, 1982.
- [31] D. Sidobre, « Machines-outils à commande numérique », Université Paul Sabatier LAAS-CNRS, Toulouse, 2007.
- [32] A. Slocum, « Precision machine design », Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [33] K. Busch, H. Kunzmann and F. Waeldele, « Numerical error-correction of a coordinate measuring machine », *International Symposium on metrology for QualityControl in Production*, 1984.
- [34] Gaëtan. A, « identification et modélisation du torseur des actions de coupe en fraisage », Université Bordeaux 1, Thèse de doctorat, 2010.
- [35] M. Richard, « efforts de coupe – puissance de coupe et puissance absorbée », France 2007.
- [36] Prise en main de SolidWorks PDF (Académie d'Orléans-Tours).
- [37] tutorial solidworks 2012.
- [38] D. Prévost, S. Lavernhe, C. Lartigue « Modélisation d'axe de machine outil pour la simulation du suivi de trajectoires en UGV » 11ème colloque National AIP PRIMECA La Plagne, Apr 2009, La Plagne, France.13p, 2009.

[40] B. Ahmed« Etude de réalisation d'un support pour affutage des forets sur une machine à commande numérique » Thèse de Master, Octobre 2013

## NORMES

- [ISO-10360-2] Métrologie par coordonnées - Partie 2 : Évaluation des performances des machines à mesurer tridimensionnelles, 1994.
- [NF ISO 3592] AFNOR - Informations de sortie des processeurs CN, structure logique et mots majeurs - norme ISO 3592, identique norme AFNOR Z 65-510 – octobre 1980.
- [NF ISO 4342] ISO - Commande numérique des machines, données d'entrée des processeurs CN, langage de référence de base pour programme de pièce - norme ISO 4342, norme AFNOR NF Z 68-040 - octobre 1988.
- [NF ISO 4343] AFNOR - Informations de sortie des processeurs CN, éléments mineurs des enregistrements de type 2000, (instructions post-processeur) - norme ISO 4343, équivalent norme AFNOR Z 65-511 - décembre 1977.
- [NF ISO 6983] ISO-Commande numérique des machines-outils, format de programme et description des mots adresses, partie 1 : format de données pour les équipements de commande de mise en position, de déplacement linéaire et de contournage - norme ISO 6983-1, norme AFNOR NF Z 68-035 – octobre 1998.
- [NF Z 68-036] AFNOR - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 2 : codage et mise à jour des fonctions préparatoires G et des fonctions auxiliaires universelles M - norme AFNOR NF Z 68-036 - octobre 1988.
- [NF Z 68-037] AFNOR - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 3 : codage des fonctions auxiliaires M (classe 1 à 9) - norme AFNOR NF Z 68-036 - octobre 1988.
- [ASME 94a] ASME, ASME Y14.5M, « Dimensioning and tolerancing », American Society of Mechanical Engineers, 1994.

## WEBOGRAPHIE

- [S1] [http://www.transtecmo.fr/product-500-centre\\_dusinage\\_vertical\\_mas\\_mcu\\_1100\\_v\\_vt.html](http://www.transtecmo.fr/product-500-centre_dusinage_vertical_mas_mcu_1100_v_vt.html), 20 mars 2018
- [S2] <http://www.ridder.net/fraisage/fabriqueant/emco/emco-mill-e-350/3-1-1-2-934-2-0/>.23 mars 2018
- [S3] <http://www.ridder.net/fraisage/fabriqueant/emco/emco-mill-e-600-e-900-e-1200/3-1-1-2-558-2-0/>.23 mars 2018
- [S4] <http://news.directindustry.fr/press/emco/centre-usinage-axe-contrat-5-meilleur-rendement-cout-7241-428997.html>. 23 mars 2018

# **ANNEXES**

Profondeur [mm]	Déplacement suivant X [ $10^{-5}$ mm]					
	$H_m=0.1$	$H_m=0.2$	$H_m=0.4$	$H_m=0.6$	$H_m=0.8$	$H_m=1$
0,5	1,640	1,371	1,158	1,028	0,965	0,914
1,0	3,281	2,742	2,316	2,057	1,930	1,828
1,5	4,695	3,925	3,314	2,943	2,762	2,616
2,0	6,260	5,233	4,418	3,925	3,682	3,488

*Tableau A.1-Le déplacement de la structure de la machine-outil suivant X par rapport à la profondeur de passe.*

Profondeur [mm]	Déplacement suivant X [ $10^{-5}$ mm]					
	$H_m=0.1$	$H_m=0.2$	$H_m=0.4$	$H_m=0.6$	$H_m=0.8$	$H_m=1$
0,5	2,936	2,454	2,073	1,841	1,727	1,636
1,0	5,871	4,908	4,145	3,681	3,454	3,272
1,5	8,409	7,030	5,936	5,272	4,947	4,686
2,0	11,24	9,372	7,914	7,030	6,595	6,248

*Tableau A.2-Le déplacement de la structure de la machine-outil suivant Y par rapport à la profondeur de passe.*

Profondeur [mm]	Déplacement suivant X [ $10^{-5}$ mm]					
	$H_m=0.1$	$H_m=0.2$	$H_m=0.4$	$H_m=0.6$	$H_m=0.8$	$H_m=1$
0,5	1,852	1,547	1,304	1,159	1,089	1,030
1,0	3,704	3,094	2,612	2,322	2,177	2,064
1,5	6,619	5,533	4,670	4,148	3,891	3,686
2,0	8,826	7,376	6,228	5,533	5,192	4,917

*Tableau A.3-Le déplacement de la structure de la machine-outil suivant Z par rapport à la profondeur de passe.*

Ponte	Épaisseur du copeau [mm]					
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
X	3,08	2,57	2,17	1,93	1,81	1,72
Y	5,54	4,61	3,89	3,46	3,25	3,07
Z	4,65	3,89	3,28	2,92	2,74	2,59

*Tableau A.4-La pontedu déplacement de la structure de la machine-outil suivant les trois directions « X, Y et Z » par rapport à l'épaisseur  $H_m$ .*

## Déplacement de la table suivant x

- **Profondeur de passe = 0.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.611 \times 10^{-5} & 1.55 \times 10^{-5} & 1.503 \times 10^{-5} \\ 1.611 \times 10^{-5} & 1 & -0.696 \times 10^{-5} & 0.582 \times 10^{-5} \\ -1.55 \times 10^{-5} & 0.696 \times 10^{-5} & 1 & 0.382 \times 10^{-5} + 449.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 1 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -3.249 \times 10^{-5} & 3.128 \times 10^{-5} & 3.034 \times 10^{-5} \\ 3.249 \times 10^{-5} & 1 & -1.393 \times 10^{-5} & 1.165 \times 10^{-5} \\ -3.128 \times 10^{-5} & 1.393 \times 10^{-5} & 1 & 0.765 \times 10^{-5} + 449 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 1.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -4.874 \times 10^{-5} & 4.693 \times 10^{-5} & 4.551 \times 10^{-5} \\ 4.874 \times 10^{-5} & 1 & -2.091 \times 10^{-5} & 1.747 \times 10^{-5} \\ -4.693 \times 10^{-5} & 2.091 \times 10^{-5} & 1 & 1.149 \times 10^{-5} + 448.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 2 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -6.499 \times 10^{-5} & 6.258 \times 10^{-5} & 6.068 \times 10^{-5} \\ 6.499 \times 10^{-5} & 1 & -2.788 \times 10^{-5} & 2.330 \times 10^{-5} \\ -6.258 \times 10^{-5} & 2.788 \times 10^{-5} & 1 & 1.532 \times 10^{-5} + 448 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## Déplacement du chariot suivant y

- **Profondeur de passe = 0.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.276 \times 10^{-5} & 0.302 \times 10^{-5} & 0.116 \times 10^{-5} + 200 \\ 0.276 \times 10^{-5} & 1 & -0.335 \times 10^{-5} & 0.221 \times 10^{-5} \\ -0.302 \times 10^{-5} & 0.335 \times 10^{-5} & 1 & 0.253 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 1 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.510 \times 10^{-5} & 0.609 \times 10^{-5} & 0.334 \times 10^{-5} + 200 \\ 0.510 \times 10^{-5} & 1 & -0.639 \times 10^{-5} & 0.386 \times 10^{-5} \\ -0.609 \times 10^{-5} & 0.639 \times 10^{-5} & 1 & 0.510 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 1.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.833 \times 10^{-5} & 0.829 \times 10^{-5} & 0.502 \times 10^{-5} + 200 \\ 0.833 \times 10^{-5} & 1 & -1.009 \times 10^{-5} & 0.665 \times 10^{-5} \\ -0.829 \times 10^{-5} & 1.009 \times 10^{-5} & 1 & 0.760 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 2 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.111 \times 10^{-5} & 1.202 \times 10^{-5} & 0.671 \times 10^{-5} + 200 \\ 1.111 \times 10^{-5} & 1 & -1.334 \times 10^{-5} & 0.886 \times 10^{-5} \\ -1.202 \times 10^{-5} & 1.334 \times 10^{-5} & 1 & 0.998 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## Déplacement de la tourelle suivant z

- **Profondeur de passe = 0.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.611 \times 10^{-5} & 1.550 \times 10^{-5} & 1.503 \times 10^{-5} \\ 1.611 \times 10^{-5} & 1 & -0.696 \times 10^{-5} & 0.582 \times 10^{-5} \\ -1.550 \times 10^{-5} & 0.696 \times 10^{-5} & 1 & 0.382 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 1 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -3.249 \times 10^{-5} & 3.128 \times 10^{-5} & 3.034 \times 10^{-5} \\ 3.249 \times 10^{-5} & 1 & -1.393 \times 10^{-5} & 1.165 \times 10^{-5} \\ -3.128 \times 10^{-5} & 1.393 \times 10^{-5} & 1 & 0.765 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 1.5 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -4.874 \times 10^{-5} & 4.693 \times 10^{-5} & 4.551 \times 10^{-5} \\ 4.874 \times 10^{-5} & 1 & -2.091 \times 10^{-5} & 1.747 \times 10^{-5} \\ -4.693 \times 10^{-5} & 2.091 \times 10^{-5} & 1 & 1.149 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Profondeur de passe = 2 mm**

$$\begin{bmatrix} 1 & -6.499 \times 10^{-5} & 6.258 \times 10^{-5} & 6.068 \times 10^{-5} \\ 6.499 \times 10^{-5} & 1 & -2.788 \times 10^{-5} & 2.330 \times 10^{-5} \\ -6.258 \times 10^{-5} & 2.788 \times 10^{-5} & 1 & 1.532 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## Déplacement de l'outil

### ▪ Profondeur de passe = 0.5 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.188 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & 2.733 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 0.298 \times 10^{-5} - 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ▪ Profondeur de passe = 1 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.377 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & 5.457 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 0.596 \times 10^{-5} - 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ▪ Profondeur de passe = 1.5 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.566 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & 8.201 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 0.932 \times 10^{-5} - 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ▪ Profondeur de passe = 2 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.754 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & 10.962 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 1.203 \times 10^{-5} - 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## Déplacement de la pièce

### ▪ Profondeur de passe = 0.5 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1.683 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & -1.525 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 2.128 \times 10^{-5} + 140 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ▪ Profondeur de passe = 1 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -3.366 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & -3.051 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 4.256 \times 10^{-5} + 140 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ▪ Profondeur de passe = 1.5 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -5.053 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & -4.578 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 6.388 \times 10^{-5} + 140 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ▪ Profondeur de passe = 2 mm

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -6.736 \times 10^{-5} \\ 0 & 1 & 0 & -6.104 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1 & 8.516 \times 10^{-5} + 140 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La qualité des pièces produites par des machines-outils à commande numérique découle principalement du degré de précision et de stabilité des machines elles-mêmes. De manière générale, la qualité mesure "le degré de conformité d'une pièce à des spécifications dimensionnelles et géométriques prédéfinies». Cependant, une simple mesure ne permet pas d'identifier la contribution de chaque source d'erreur affectant la pièce. Il est alors important d'analyser les aspects technologiques définissant la structure des machines-outils, le contrôle numérique et l'influence du procédé. Dans le but de donner à la problématique de la précision dans les machines-outils une dimension conceptuelle, il est préférable de procéder à une classification des facteurs qui l'affectent. Les erreurs peuvent être classées selon la phase de travail pendant laquelle les sources qui les génèrent sont actives. Pendant la phase de préparation, les erreurs peuvent être associées aux procédures de réglage, aux erreurs de programmation et de conversion des programmes d'usinage en langage machine. Durant la phase d'usinage, les sources d'erreur qui affectent la précision sont beaucoup plus variées. Leurs effets peuvent être considérés comme étant la combinaison des contributions individuelles de tous les éléments constituant le système Machine-outil-Pièce, ainsi que l'interaction de ce système avec le procédé. Le but de cet article est de présenter une étude numérique sur l'évaluation des erreurs géométriques d'une MOCN de type EMCO PC MILL qui existe au sein de notre laboratoire, ces erreurs due aux efforts de coupes d'usinage d'un acier non allié XC35.

**Mot clés :** erreur; MOCN; efforts de coupe;déplacement; contrôle.

## **ABSTRACT**

The quality of parts produced by numerically controlled machine tools stems mainly from the degree of precision and stability of the machines themselves. In general, quality measures "the degree of conformity of a part to predefined dimensional and geometrical specifications". However, a simple measurement does not make it possible to identify the contribution of each source of error affecting the part. It is therefore important to analyze the technological aspects defining the structure of machine tools, numerical control and the influence of the process. In order to give the problem of precision in machine tools a conceptual dimension, it is preferable to classify the factors that affect it. The errors can be classified according to the phase of work during which the sources that generate them are active. During the preparation phase, errors can be associated with adjustment procedures, programming errors and conversion of machining programs into machine language. During the machining phase, the sources of error that affect accuracy are much more varied. Their effects can be considered as the combination of the

individual contributions of all the elements constituting the Machine-Tool-Room system, as well as the interaction of this system with the process. The purpose of this article is to present a numerical study on the evaluation of the geometrical errors of an EMCO PC MILL type MOCN that exists in our laboratory, these errors due to the machining cuts of a non-ferrous steel. XC35 ally.

**Keyword:** error; NC machine; cutting forces, shifting; control.

## ملخص

تتبع جودة القطع التي تنتجها آلات التشغيل ذات التحكم الرقمي مندرجة الدقة واستقرار الآلات نفسها بشكل عام، جودة القياس .  
"دراسة تطابق القطعة مع المواصفات الهندسية المحددة مسبقاً  
ومع ذلك، القياس البسيط لا يحدد كمصدر من مصادر الخطأ التي تؤثر على نوعية القطعة  
لذلك من المهم تحليل جوانب التكنولوجيا التي تحدد هيكل آلات التشغيل، التحكم الرقمي وتأثير العملية  
من أجل إعطاء مشكلة الدقة في آلات التشغيل، فمن الأفضل تصنيف العوامل التي تؤثر عليها. يمكن تصنيف الأخطاء وفقاً لمرحلة العمل التي تكون خلالها المصدر  
التي تولد لها الأنشطة . خلال مرحلة التصنيع، يمكن أن ترتبط الأخطاء بإجراء أو الضبط أو أخطاء البرمجيات وتحويلها إلى مجال معالجة البلوغ الآلة  
خلال مرحلة التصنيع، تكون مصادر الخطأ التي تؤثر على الدقة أكثر تنوعاً  
يمكن اعتبار آثارها بمثابة مجموعة من المساهمات الفردية لكل العناصر المكونة لنظام آلات التشغيل، بالإضافة إلى التقاطع لهذا النظام مع العملية  
الغرض من هذا البحث هو تقديم دراسة تقييمية عن تقسيم الأخطاء الهندسية لطراز EMCO PC MILL MOCN  
الموجود في المختبر الخاص بنا، وهذه الأخطاء ناتجة عن قطع تشكيلها لآلة غير الحديدية XC35 .

الكلمة المفتاحية: خطأ؛ آلات التشغيل ذات التحكم الرقمي، قوالت القطع، الإزاحة؛ السيطرة.