

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : GENIE INDUSTRIELLE ET
MAINTENANCE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Professionnel**

Par : MECHTA Ahlem

MOHAMMED SAID Zakarya

Intitulé

**Développement d'un simulateur pour simuler
les erreurs d'une machine-outil à commande
numérique durant un trajet circulaire**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr .AMROUNE Saleh

Université de M'sila

Président

Dr .SLAMANI Mohamed

Université de M'sila

Rapporteur

Mr .Farhat H

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

DEDICACE

À nos parents pour leurs encouragements dans toutes les

étapes de nos vies,

À nos frères,

Remerciement

Nous profitons l'occasion pour remercier de fondateurs de nos cœurs le dieu qui aide nous à ce recherche, et nous voulons adresser tous nos remerciements aux personnes avec lesquelles nous avons pouvons échanger et qui nous ont aidés pour la rédaction de ce mémoire.

En commençant par remercier tout d'abord Monsieur l'encadreur M. SLAMANI, directeur de recherche de ce mémoire, pour son aide précieuse et pour le temps qu'il nous avons consacré. Et qui a su nous guider vers les bonnes références.

Nos profondes gratitudees et nos sincères remerciements aussi à tous les enseignants du département Génie Mécanique de l'Université de M'sila pour contribuer à nos formations durant toutes nos années d'étude.

Enfin, nous adressons plus sincères remerciements à nos familles : nos parents, nos sœurs et tous nos proches et amis, qui

nous avons accompagnés, aidés, soutenus et encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos Profonds remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Résumé

La perte de précision dans les machines-outils à axes multiples est due aux imperfections géométriques de la structure mécanique et aux modifications de cette structure sous l'effet de sollicitations statiques, thermiques et dynamiques. Même si certaines de ces imperfections peuvent être réduites par l'amélioration de la conception de la machine, il est cependant difficile d'éliminer totalement leurs effets. Pour cela, la modélisation, la prédiction ou simulation et la compensation de ces erreurs reste l'élément clé pour améliorer la performance de ces machines.

Pour une trajectoire d'outil donné qui est supposée correcte, introduite dans une machine-outil à grande vitesse, la trajectoire d'outil désirée sera pratiquement changée par l'effet des erreurs dynamiques et géométriques et causera des défauts et des marques indésirables sur la surface à usiner. Simuler et prédire d'une façon efficace ces erreurs exigent de bons modèles de représentations pour chaque erreur.

Le présent travail vise l'atteinte de trois objectifs. Le premier est de modéliser les erreurs géométriques et dynamiques d'une machine-outil à trois axes. Une fois les erreurs de la machine-outil modélisées, le second objectif vise à prédire les erreurs volumétriques. Le troisième objectif vise l'intégration de ces erreurs modélisées dans un simulateur pour simuler le trajet d'outil dans un mouvement circulaire.

Le simulateur développé permet à un utilisateur de machine-outil à commande numérique à trois axes de simuler le trajet d'outils dans un mouvement circulaire en fraisage à haute vitesse. Pour illustrer et évaluer l'efficacité et la robustesse du simulateur, une comparaison pour chaque source d'erreur machine a été effectuée entre notre simulateur et le simulateur commercial développé par l'entreprise Renishaw le leader mondial dans les domaines de la métrologie. Une grande similitude entre les deux simulateurs a été observée.

Liste des figures

Figure 01 : Erreurs des machines-outils	5
Figure 02. Erreurs géométriques (défauts de guidage et d'assemblage)	6
Figure 03. Schéma d'une machine cinq axes horizontale avec ses écarts de membrure. (Les lignes pointillées représentent les axes nominaux et les lignes continues représentent les axes réels)	7
Figure 04-1- Schéma des six degrés de liberté des erreurs de mouvement d'un chariot de machine-outil.....	8
Figure 04-2- Axe rotatif C.....	8
Figure 05. Sources d'erreurs thermiques dans une machine-outil	9
Figure 06. Structure globale du simulateur d'usinage	13
Figure 7-A Avant la compensation	14
Figure 7-B Après la compensation.....	14
Figure 08.Barre à billes	15
Figure 09. Interféromètre laser pour la mesure des erreurs de déplacement linéaire.....	16
Figure 10.Schéma d'essai de KGM sur une machine-outil	17
Figure. 11. Mesure des erreurs à l'aide de la barre à billes	20
Figure. 12. Six erreurs paramétriques le long d'un axe de machine.....	22
Figure 13 : Relation entre l'erreur de rectitude et l'erreur de tangage.....	24
Figure 14-a. Jeu d'inversion dans le système vis-écrou.....	25
Figure.14- b. Jeu d'inversion dans un axe d'une machine-outil	26
Figure. 15. Écartez les erreurs dans trois plans orthogonaux.....	27
Figure 16. Boucle d'asservissement pour une machine-outil à commande numérique	28
Figure. 17: schéma d'intégration des erreurs.....	29
Figure.18 structure arborescente composée d'objets d'interface	33
Figure.19 Exemple d'interface	34
Figure20: étapes de réalisation de l'interface	35
Figure 21. Programmation de l'interface graphique	39
Figure 22. Notre simulateur	46
Figure 23. Simulateur Renishaw	46
Figure 24. Erreur d'échelle, notre simulateur	48

Figure 25. Erreur d'échelle, simulateur Renishaw	48
Figure 26. Erreur de perpendicularité, notre simulateur	50
Figure 27. Erreur de perpendicularité, simulateur Renishaw	50
Figure 28. Erreur de rectitude, notre simulateur	51
Figure 29. Erreur de rectitude, simulateur Renishaw	51
Figure 30. Jeu d'inversion Suivant x ou y, notre simulateur	54
Figure 31. Jeu d'inversion Suivant x ou y, simulateur Renishaw	54
Figure 32. Erreur cyclique suivant x et y, notre simulateur	55
Figure 33. Erreur cyclique x et y, simulateur Renishaw	55
Figure 34. Erreur de Servo-gain, notre simulateur	57
Figure 35. Erreur de Servo-gain, simulateur Renishaw	57

Plan de travail

1. Introduction.....	2
2/Revue de la littérature	5
2-1/sources d'erreurs.....	5
2-1-1/Erreurs quasi-statiques	6
2-1-1-1/Les erreurs géométriques	6
• Erreurs de membrure	6
• Les écarts de mouvement.....	7
2-1-1-2/ Erreurs cinématiques.....	8
2-1-1-3/ Écarts induits par la charge	8
2-1-1-4/Erreurs dues aux chargements thermiques.....	9
2-1-2/ Erreurs dynamiques	10
2-1-2-1/ Erreurs dynamiques dues à la machine-outil	10
2-1-2-2/ Erreurs dynamiques dues au procédé.....	10
• Erreurs induites par la force de coupe	10
• Température générée par la coupe.....	11
• Vibrations.....	11
2-1-2-3/Erreurs dues à la pièce et à l'outillage	11
2-2/Modélisation des erreurs	11
2-3/Simulation de trajectoire de l'outil	12
2-4/Compensation des erreurs	14
2-5/Mesure des erreurs	14
2-5-1/Systèmes de mesure	14
a)Système de mesure barre à billes	15
b) L'interférométrie laser	15
c)Encodeur planaire KGM	17
3/cadre théorique.....	19
3-1/Développement des techniques pour des performances des machines-outils.....	19
3-2/Modèle de prédiction des tests barre à billes	19
3-3/Modélisation des erreurs paramétriques pour les machines-outils	20
A/Modélisation des erreurs géométriques	21
A-1/Erreur de position (erreur d'échelle).....	21
A-2/ Erreur de rectitude	21

A-3/ Composants d'erreur angulaire	23
A-3-1/ Erreur de tangage et de lacet.....	23
A-3-2/ Erreur de roulis	24
A-4/Erreur de jeu d'inversion (backlash)	24
A-5/Erreur de perpendicularité	26
B/Modélisation des erreurs dynamiques.....	27
B-1/ Erreurs dues à l'incompatibilité des gains de système servo	27
C/Intégration des erreurs géométrique et dynamique	28
4/Développement de l'interface graphique	33
4-1/ Les interfaces graphiques.....	33
4-2/ Création d'une interface graphique	34
4-3/ développement de l'Interfaces graphique	35
5/Réalisation et validation du simulateur.....	46
1/Erreur d'échelle.....	47
2/Erreur de perpendicularité.....	49
3/Erreur de rectitude	50
4/Jeu d'inversion Suivant x ou y	52
4-1/Jeu à l'inversion positive	52
4-2/Jeu à l'inversion négative	52
5/Erreur cyclique	54
6/Erreur d'asservissement	56
Conclusion	59
Référence	61

INTRODUCTION

1/Introduction

Les machines-outils sont les moyens de production les plus importants pour les industries du travail des métaux. Sans le développement de ce type de machine, le niveau de vie élevé de l'époque actuelle serait impensable. Pour garantir ce niveau de développement et optimiser les rendements de production, les limites des machines-outils sont repoussées. Par conséquent, l'augmentation de la limite de ces machines peut aussi avoir un effet négatif sur l'état de la machine par l'augmentation des sollicitations mécaniques sur les sous-ensembles principaux tels que les entraînements, guides, broches, systèmes de lubrification, joints et dispositifs de surveillance et de détection. Ces systèmes contribuent, de manière significative, aux performances de la machine et à sa fiabilité tout au long de son cycle de vie. La surveillance et la compréhension de l'état de fonctionnement de ces sous-ensembles principaux est cruciale pour éviter des défaillances dans les processus d'usinage et des arrêts machines non planifiés. Pour cela, une maîtrise de la performance et de la technologie de maintenance des MOCN est demandée.

D'autre part, les machines-outils à commande numérique sont des produits de grande valeur dans les systèmes de fabrication, elles sont habituellement utilisées pour fabriquer des pièces de haute précision à grande vitesse. Les défauts et défaillances de tout composant de la machine affecteraient la précision et l'efficacité de l'usinage, ce qui réduirait la qualité des pièces et diminué la productivité. Pour maintenir une performance constante des machines-outils, une maintenance appropriés et efficaces est essentiel.

Durant la dernière décennie, le contexte économique a imposé à l'industrie de l'usinage et de la fabrication de nouvelles normes de performance en ce qui concerne la qualité, la productivité, les coûts et les délais de production. Pour répondre à ces exigences, il est impératif de bien maîtriser la fabrication des pièces mécaniques tels les procédés d'usinage et de bien comprendre les sources d'erreurs dans les machines-outils. En outre, la compensation des erreurs des machines-outils est considérée comme une mesure efficace pour surmonter le facteur de vieillissement de la machine, ce qui montre une détérioration graduelle et mineure de sa performance.

La qualité de chaque pièce produite sur une machine à CN dépend en grande partie des performances de la machine. Les problèmes d'une machine entraînent systématiquement des pièces défectueuses. Que le défaut de la pièce soit 'superficiel', 'hors spécification' ou 'inutilisable'.

La caractérisation complète d'une machine-outil est difficile à réaliser étant donné le grand nombre de sources d'erreurs géométriques, thermiques et dynamiques dont les effets sur la précision des

pièces sont complexes. Les méthodes actuelles d'essais sont complexes, nécessitent beaucoup de temps et exigent un haut degré d'expertise en métrologie.

L'objectif de cette étude est de donner une contribution dans le domaine de la maintenance des MOCN et spécialement le diagnostic et l'analyse de la performance de ces machines par le développement d'un environnement de simulation permettant de simuler la trajectoire d'outil durant un mouvement circulaire et de prédire l'effet des erreurs des machines-outils sur les pièces usinées.

CHAPITRE 01

Revue De La Littérature

2/Revue de la littérature

2-1/ Sources d'erreurs

En pratique, les erreurs dans les machines -outils peuvent être variées dans le temps, en fonction de leurs sources, leurs effets et leurs comportements. La figure 1 montre que ces erreurs peuvent être largement regroupées en deux classes, les erreurs quasi-statiques et les erreurs dynamiques.

En général, un centre d'usinage se compose d'un lit, d'une colonne, d'une broche et des axes linéaires et / ou rotatifs. Chacun de ces éléments contribue à l'erreur totale du système qui est représenté par le budget d'erreur. Les erreurs peuvent généralement être classées comme suit:

A) Erreurs géométriques des composants et des structures de la machine;

B) Erreurs cinématiques;

C) Erreurs induites par des distorsions thermiques;

D) Les erreurs causées par les forces de coupe;

E) Erreurs d'instabilité du matériau;

F) Erreurs induites par la machine;

G) Erreurs d'instrumentation;

H) Usure de l'outil;

I) Autres sources d'erreurs comme les erreurs d'asservissement de la machine, les erreurs de poursuite, les erreurs d'interpolation et les erreurs algorithmiques [1-3].

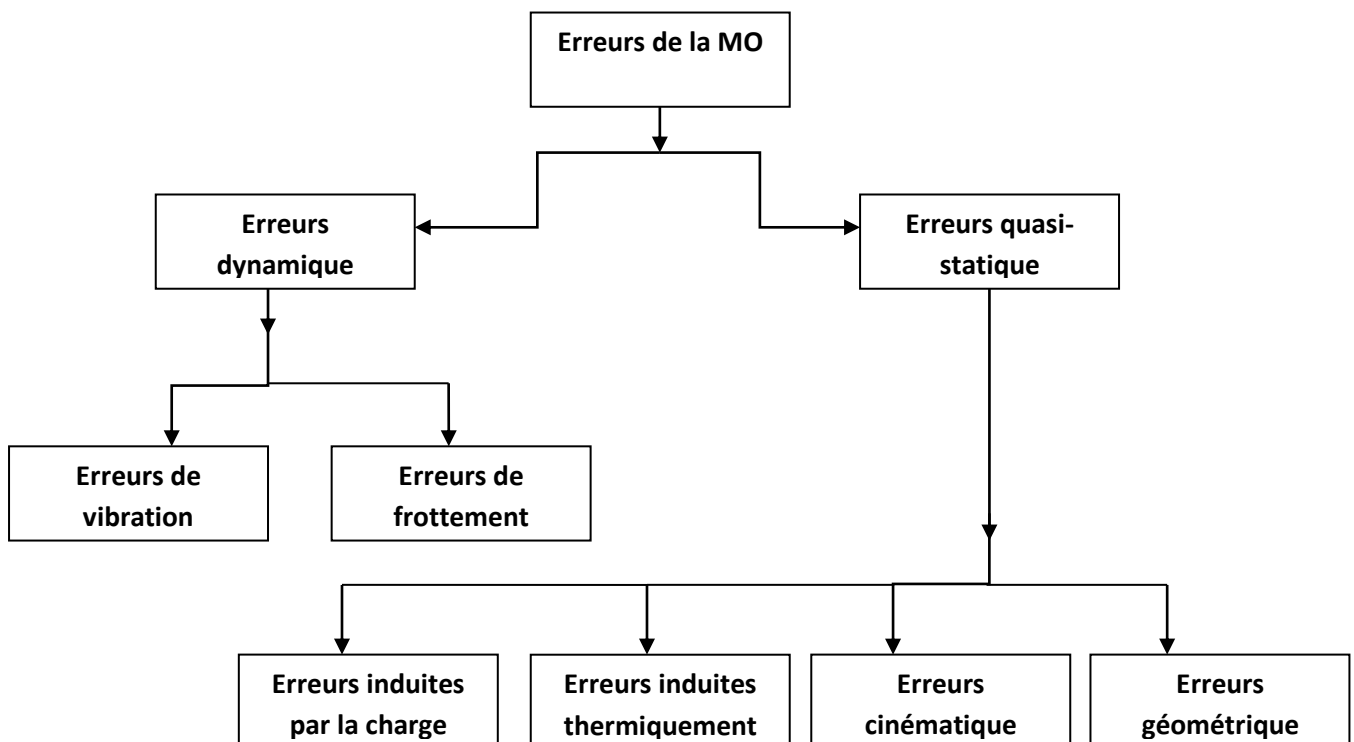


Figure 01 : Erreurs des machines-outils [4].

2-1-1/Erreurs quasi-statiques

Ces erreurs sont définies comme les erreurs sur la position relative entre l'outil et la pièce à usiner et varient lentement en fonction du temps. Elles dépendent de la structure de la machine et elles comportent principalement les erreurs géométriques, les erreurs cinématiques et les erreurs sous des contraintes statiques et thermiques [5].

2-1-1-1/Les erreurs géométriques

Les erreurs géométriques sont généralement causées par les défauts de la structure et des composants de la machine-outil. Elles sont associées aux composantes structurelles de la machine, des défauts d'assemblages et de l'inexactitude des composantes utilisées dans la machine [6]. La Figure 02 illustre un cas où seuls les défauts de guidage du premier axe sont représentés en plus des défauts d'assemblage du deuxième axe.

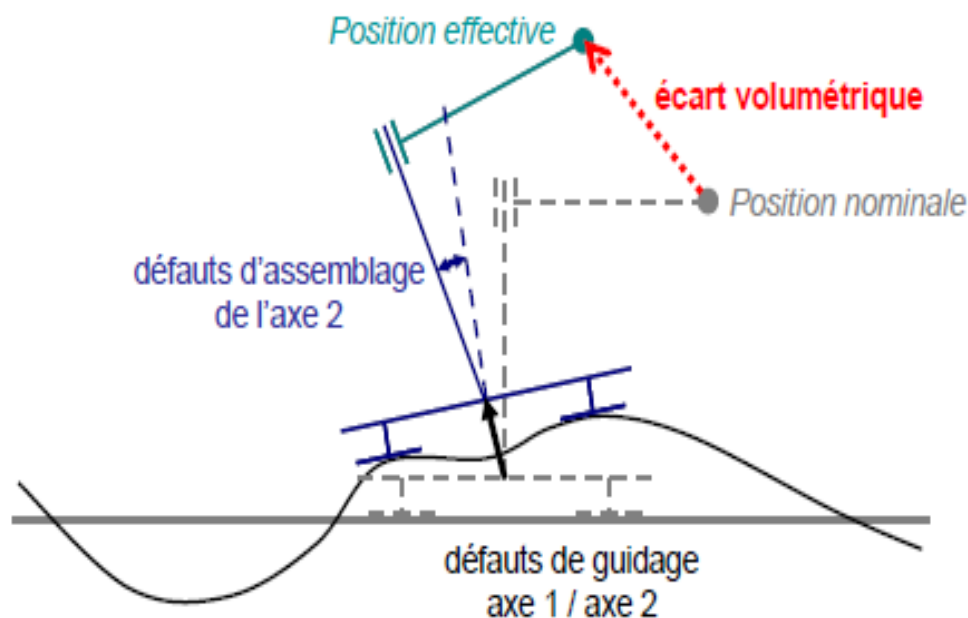
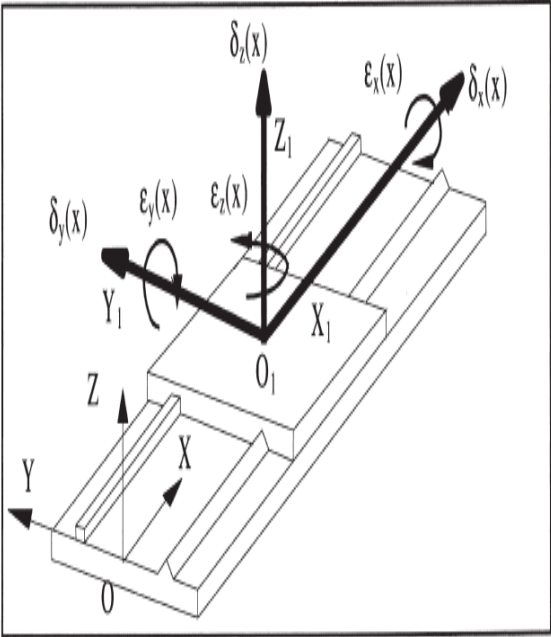
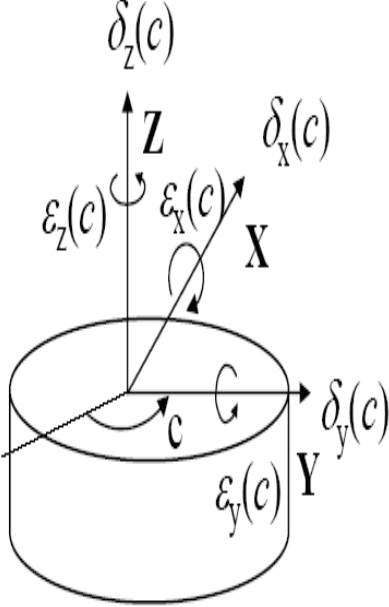


Figure 02. Erreurs géométriques (défauts de guidage et d'assemblage) [7].

- **Erreurs de membrure**

Il s'agit des défauts des composantes à leur fabrication ou à l'installation indépendante des positions des axes. Pour une machine-outil à trois axes, les erreurs géométriques de membrure sont les trois erreurs de perpendicularité entre les axes linéaires. Pour une machine-outil à cinq axes (figure 03), il ya 8 (huit) erreurs de membrure :

- trois erreurs de perpendicularité entre les axes linéaires.
- deux erreurs d'orientation pour chaque axe rotatif.
- une erreur linéaire d'entraxe entre deux axes rotatifs.

Axe linéaire	Axes rotatifs
	
<p>Figure 04-1- Schéma des six degrés de liberté des erreurs de mouvement d'un chariot de machine-outil [10].</p>	<p>Figure 04-2- Axe rotatif C [11].</p>

Ces erreurs de mouvement sont trois écarts cinématiques articulaires de translation ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$) et trois écarts de rotation ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$).

2-1-1-2/ Erreurs cinématiques

Les erreurs cinématiques sont des variations de position dans le comportement fonctionnel des éléments d'une machine-outil. Ce type d'erreur est souvent rencontré dans le cas d'applications nécessitant la combinaison d'axes ou de mouvements. Pour éviter ces erreurs, une coordination précise entre les mouvements n'est non pas seulement utile mais obligatoire. Dans les machines-outils conventionnelles, cette coordination est réalisée à l'aide de trains d'engrenages. Au niveau des machines-outils à commande numérique, la coordination ou plus spécifiquement l'interpolation est obtenue par commande électronique [12].

2-1-1-3/ Écarts induits par la charge

Les machines-outils sont soumises à des chargements qui déforment les composants de la machine et en conséquence engendrent des déviations de position relative entre l'outil et la pièce. Ces

charges se différencient des écarts induits par la force de coupe par leur effet statique. Hocken a mentionné trois sources pour ces écarts [13].

1. Les contraintes qui persistent au moment de l'assemblage des composants de la machine et la relaxation des contraintes à long terme.
2. La déformation statique de la machine à cause du déplacement de ses composants. Elle survient surtout quand la machine est moins rigide pour supporter le poids mort des composants. Des mesures prises dans le design pour réduire ces écarts sont par exemple la conception de glissières de forme convexe et l'utilisation de contrepoids.
3. La déformation causée par le poids de la pièce tout dépendant de la position de cette dernière dans l'espace de la machine.

2-1-1-4/Erreurs dues aux chargements thermiques

Ces erreurs proviennent essentiellement de la chaleur introduite à partir de plusieurs sources. La figure 05 présente les sources thermiques possibles (externe et interne) ainsi que leur mode d'action dans une machine-outil.

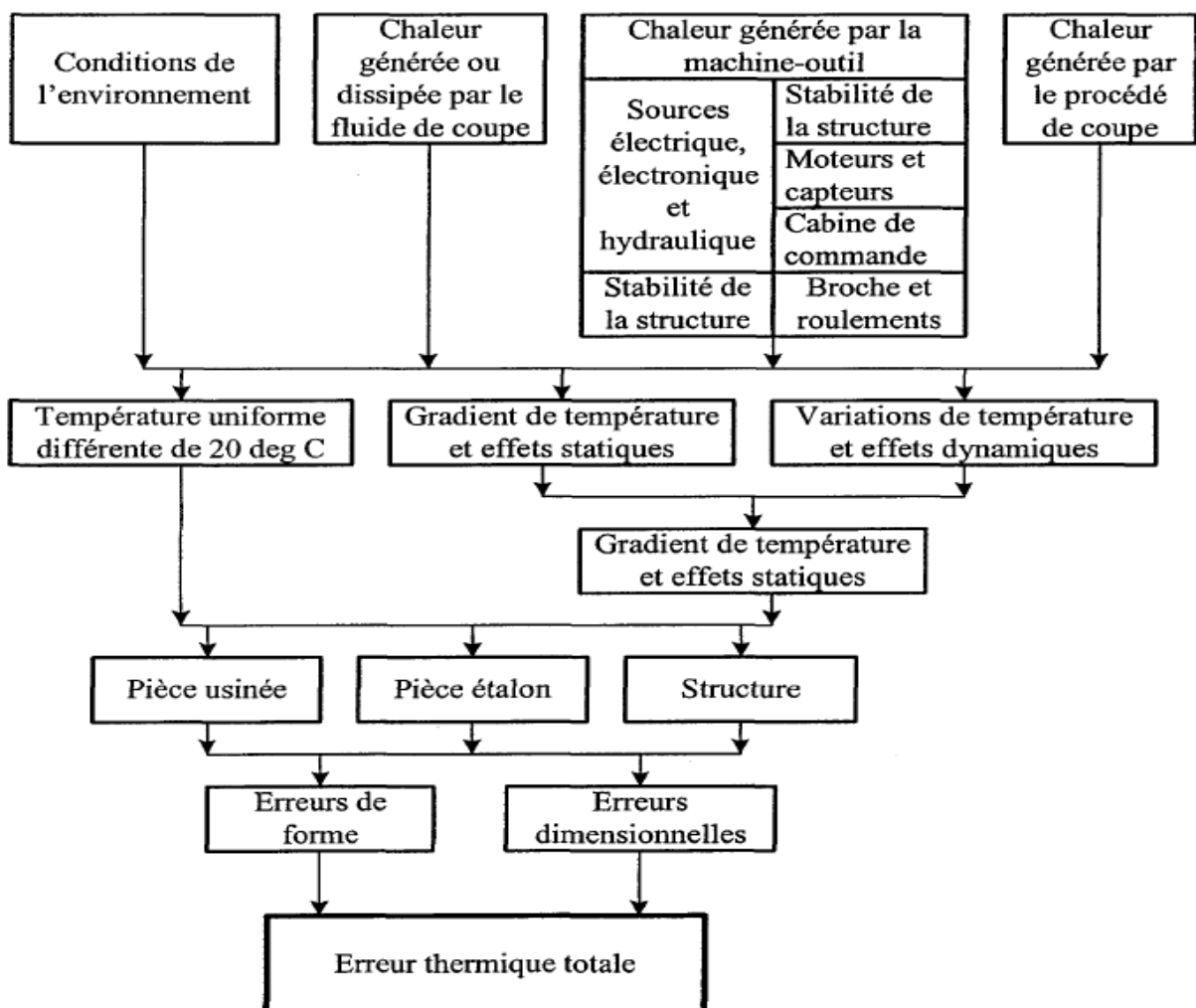


Figure 05. Sources d'erreurs thermiques dans une machine-outil [14]

La transmission de la chaleur à partir de toutes ces sources vers la structure de la machine-outil génère des gradients de température variables dans le temps. Ces gradients provoquent des distorsions et des contraintes thermiques ainsi que des variations dans la rigidité de la structure de la machine-outil. Ils affectent également les systèmes de mesure, la pièce et l'outil. En conséquence, le statut thermique de la machine-outil contribue largement à la variation de son comportement géométrique et cinématique [14].

2-1-2/ Erreurs dynamiques

Parmi les sources les plus importantes, il faut considérer les efforts de coupe, les vibrations dues à la rotation de la broche et les vibrations induites dans la structure. De façon générale, ces erreurs peuvent être divisées en deux catégories majeures: les erreurs dynamiques dues à la machine-outil et les erreurs dues au procédé. Il est important de noter que dans le cas des machines à mesurer tridimensionnelles, les effets dynamiques sont négligeables, cependant, la vitesse d'approche, la vitesse de mesure et la nature de contact entre le palpeur et la surface à mesurer sont des contraintes à considérer dans l'analyse dynamique.

2-1-2-1/ Erreurs dynamiques dues à la machine-outil

La rotation d'un outil de coupe ou de la pièce à usiner autour d'un axe précis est fondamentale pour l'obtention de la qualité de toute opération d'usinage. Cependant, cette dynamique pourrait être affectée par un certain nombre d'erreurs. Ces erreurs sont principalement causées par les défauts dans les roulements, les déformations causées par la distribution des charges, la variation des contacts entre les différentes composantes ou encore au comportement de la structure en fonction des modes d'excitations [15].

2-1-2-2/ Erreurs dynamiques dues au procédé

La coupe des métaux est un processus dynamique dans lequel la fonction d'enlèvement du métal génère des sollicitations qui affectent la précision de la machine-outil. Ces sollicitations ont des effets sur la variation des erreurs quasi-statiques et peuvent donner naissance à d'autres types d'erreurs. L'influence du procédé sur la précision peut être caractérisée par la coexistence des trois phénomènes suivants : les déformations sous l'effet des forces de coupe, la température générée par la coupe et les vibrations [15].

• Erreurs induites par la force de coupe

Au cours d'une opération d'usinage, les forces de coupe provoquent des efforts sur l'outil et sur la pièce. Ces sollicitations sont propagées dans les autres composantes de la machine et elles provoquent par conséquent des déformations qui se répercutent sur la qualité dimensionnelle et géométrique de la pièce finie. Ces erreurs sont une conséquence de la variation des forces de coupe

due aux défauts de forme de la pièce brute, de la variation de la rigidité du système de mise en position ou de la structure et de la variation des conditions de coupe (profondeur de passe, vitesse de coupe et vitesse d'avance). [14].

• **Température générée par la coupe**

Il est bien connu que l'usinage génère de la chaleur à cause du frottement de l'outil sur la pièce. Cette température va être généralement propagée dans la structure à travers les contacts mécaniques ou par le fluide de coupe et provoque des distorsions qui dégradent la précision globale de la machine-outil.

• **Vibrations**

Le mouvement relatif entre l'outil et la pièce résulte de la superposition des déplacements commandés par les mouvements de coupe et d'avance ainsi que les déplacements générés par la dynamique du procédé. La variation de ce mouvement relatif donne naissance à des vibrations et erreurs qui affectent principalement l'état de surface de la pièce finie.

2-1-2-3/Erreurs dues à la pièce et à l'outillage

Pendant chaque opération d'usinage qui implique l'enlèvement de la matière, les forces de coupe, les vibrations et l'usure de l'outil génèrent des contraintes mécaniques et thermiques. Ces contraintes affectent directement la pièce ou l'outil et contribuent à la dégradation de la précision et de l'intégrité de la surface.

2-2/Modélisation des erreurs

Pour modéliser et prédire les erreurs d'une machine-outil, ABBASZADEH-MIR et al [16] et ZARGARBASHI et al [17] s'appuient sur une modélisation qui intègre les défauts d'assemblage dans la transformation géométrique. Les défauts d'assemblage sont modélisés par un torseur de petits déplacements introduit à chaque liaison entre solide. Les torseurs sont supposés invariants vis-à-vis des coordonnées articulaires (les défauts de forme des axes ne sont pas pris en compte, seuls les défauts de direction et d'orientation sont considérés).

Les différentes techniques de modélisation des structures pour la simulation des écarts géométriques sous chargement dynamique peuvent être regroupées en quatre catégories, avec chacune ses avantages et inconvénients : de type masses concentrées, de type multi-corps solides reliées par des liaisons souples, de type Éléments Finis (E.F) ou de type hybride mélangeant les 3 précédentes. ZHANG et al [18], ALTINTAS et al [19], ZAEH et al [20], cherchent à réduire le nombre d'éléments composant les modèles, pour simuler le comportement dynamique de la machine, tandis que d'autres auteurs cherchent à modéliser en détail certains composants de la machine, comme les vis à billes, par exemple, qui interviennent dans les liaisons ZAEH et al [21].

Dugas [22] a en effet développé un outil de simulation de stratégies d'usinage dans lequel il s'intéresse à la modélisation des asservissements. Cette dernière, couplée à une modélisation du contrôleur. Il propose de modéliser les deux boucles de vitesse et de courant par une fonction de transfert linéaire du deuxième ordre et les anticipations par des constantes. SUSANU [23], dans le cadre de ses travaux de doctorat, a présenté une première modélisation de l'asservissement des axes de translation du centre d'usinage Mikron UCP710. Son modèle permet d'avoir une première estimation des écarts d'asservissement qui donne des résultats cohérents, mais il est nécessaire de le raffiner pour obtenir plus d'exactitude et ainsi obtenir des valeurs d'écarts simulés équivalentes aux valeurs calculées à partir des grandeurs mesurées via les oscilloscopes de la CN .PREVOST [24]. Par rapport au modèle de SUSANU, les chaînes d'anticipation sont identifiées et modélisées. Enfin, la modélisation est basée d'une part sur les paramètres accessibles dans la CN, mais également sur une identification de paramètres numériques et physiques (inerties, frottement, anticipations, paramètres d'ajustements).

La modélisation indépendante de chaque axe suppose de négliger les possibles phénomènes de couplage d'axes. Des études préalables traitant de ces phénomènes sur des machines assez spécifiques ont déjà été effectuées. Il s'agit par exemple de robots de soudage (RAMESH et al. [25]) ou de machines à structure agile (BARRE et al. [26]).

D'autres modélisations existent souvent basées sur la modélisation des champs magnétiques et utilisées pour des études plus approfondies sur le courant et la tension (REMY [27]).

Dans le but d'établir un modèle à la fois simple et générique, certains phénomènes physiques liés d'une part au comportement dynamique, comme la rigidité des liaisons, les jeux à l'inversion, les vibrations ; et d'autre part aux filtres numériques et de compensations ne sont pas modélisés à ce stade (GROß et al. [28], SIEMENS, YEUNG et al. [29]).

2-3/Simulation de trajectoire de l'outil :

Un simulateur d'usinage a été développé par Hascoet et al [30] pour analyser les erreurs dynamiques. Les chercheurs présentent l'état actuel du simulateur d'usinage, ce qui peut estimer les forces de coupe et les erreurs de déflexion de l'outil en considérant les débits d'alimentation réels plutôt que ceux programmés.

Jusqu'à présent, les simulateurs effectuent une simulation en considérant simplement les aspects géométriques et ils n'ont pas de fonctionnalités pour détecter les erreurs dynamiques.

Pour estimer les erreurs dynamiques, de nombreux efforts pour développer les modèles qui peuvent analyser la dynamique des processus de coupe ont été réalisés pendant plusieurs années (Smith et Tlusty 1991, Ehmann et al, 1997) [31-32]. Généralement, ils aident à tester et à trouver les

conditions et les paramètres de condition de coupe appropriés. Ainsi, l'un des moyens souhaitables et directs d'estimer les erreurs dynamiques de manière plus systématique consiste à développer un simulateur d'usinage qui intègre un module d'analyse de processus de coupe pour estimer ces erreurs et peut refléter les erreurs estimées sur le modèle de simulation. Il n'y a pas de simulateur d'usinage commercial signalé de cette façon. Quelques chercheurs abordent ce problème (Imani et Elbestawi 1996, El Mounayri, spence, Elbestawi 1998) [33-34].

Le simulateur d'usinage développé peut estimer les erreurs dynamiques. Figure 06 montre la structure globale de cet simulateur d'usinage. Le simulateur dispose de quatre modules: (a) analyse du mouvement de la machine, (b) analyse géométrique, (c) analyse dynamique et (d) Analyse de simulation. L'algorithme pour estimer les débits d'alimentation réels a été incorporé dans le simulateur (Hascoet, Dugas, Lee 2000) [35]. En outre, un algorithme a été développé pour estimer les erreurs de suivi pour les mouvements linéaires et circulaires. Le deuxième module (analyse géométrique) détecte les erreurs géométriques. Le troisième module (analyse dynamique) évalue les différentes sources des erreurs dynamiques (déflexion de l'outil, déformation de la pièce, déflexion de la machine, etc.) et estime leurs effets sur la pièce usinée. La simulation repose sur un modèle 3D solide. Le quatrième module (Analyse de simulation) analyse les erreurs. Avec les résultats analysés, la simulation vérifie ce qu'il faut faire pour supprimer les erreurs. Actuellement, c'est l'utilisateur qui enquête sur les sources d'erreurs et trouve des actions correctes pour les supprimer.

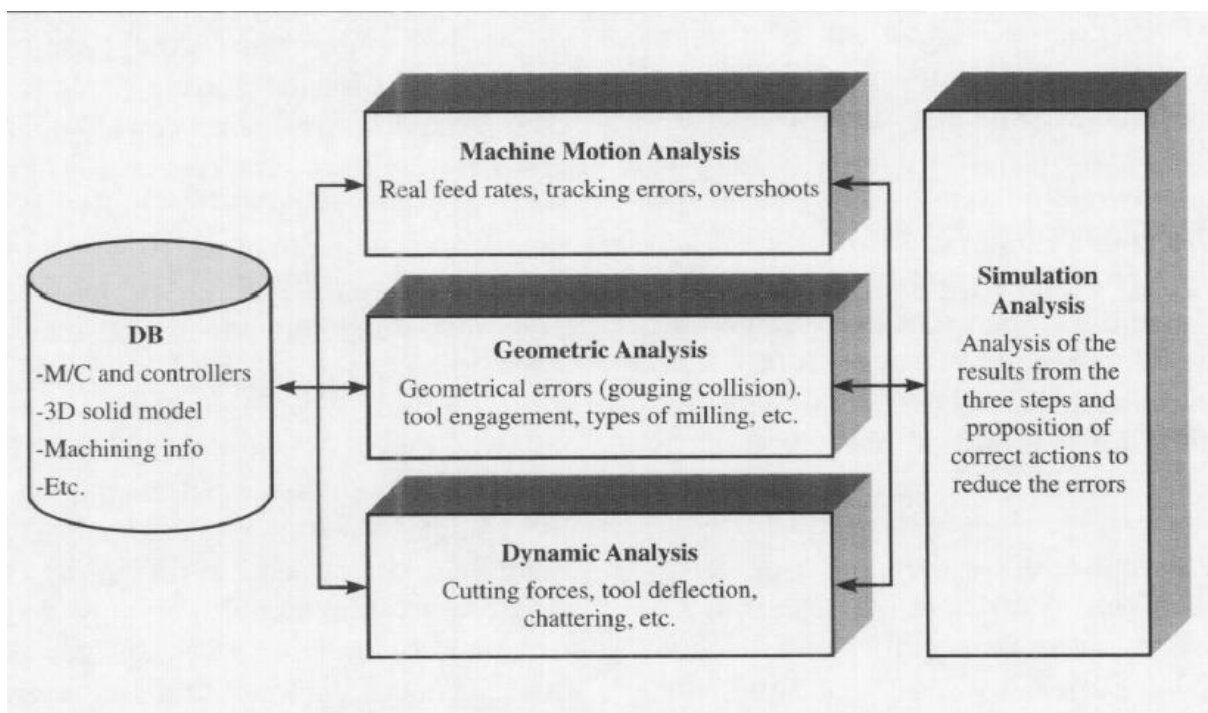


Figure 06. Structure globale du simulateur d'usinage [35]

2-4/Compensation des erreurs

Les techniques de compensation sont de plus en plus utilisées dans les machines-outils de précision et les machines de mesure de coordonnées. La tâche majeure dans la compensation est de recueillir les informations nécessaires pour la compensation de l'inexactitude de la machine.

Pour la correction d'erreur, l'identification de l'erreur et sa compensation sont exécutées simultanément en ligne. Dans la plupart des méthodes de compensation courante, on utilise des cartes erreur collectées hors ligne avant que la machine ne commence à usiner ou à inspecter une pièce lorsque la machine est considérée comme hautement Non répétables ou les perturbations engendrées lors de l'usinage ainsi que les effets des caractéristiques de temps de la machine, sont significatives, alors la cartographie d'erreur pendant le traitement devient très souhaitable[36]

La Figure 07 montre que l'erreur déterministe peut être éliminée si on peut prédire cette erreur et la compenser et si l'erreur stochastique est à l'intérieur de la zone de tolérance.

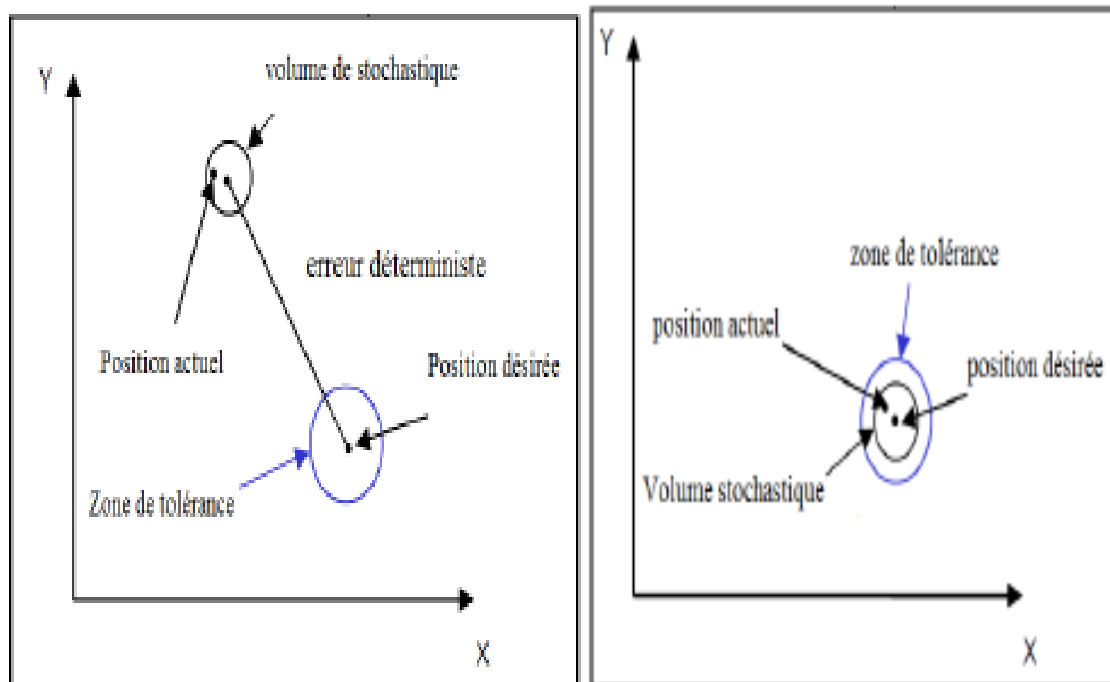


Figure 7-A Avant la compensation. Figure 7-B Après la compensation [37].

2-5/Mesure des erreurs

2-5-1/Systèmes de mesure

Dans le cadre de l'usinage de précision, il est important d'identifier les erreurs de déplacements pour chaque axe de la machine, de les mesurer, les modéliser et de les compenser par la suite. Selon la norme ISO, il existe différents types d'appareils pour mesurer les erreurs dynamiques et statiques des machines-outils (ISO 230-2, ISO 230-3 et ISO 230-4). Les plus fréquents sont:

a) Système de mesure barre à billes

La barre à billes (figure 08) est un dispositif permettant de mesurer les erreurs volumétriques des machines-outils à commande numérique. Il se compose de deux billes de haute précision et de deux bases magnétiques.

Les erreurs sont mesurées en donnant l'ordre à la machine-outil d'effectuer un test Ball bar qui lui fera tracer un arc de cercle ou un cercle. Les petits écarts dans le rayon de ce tracé sont mesurés par un capteur et saisis par le logiciel.

Si la machine ne comporte pas d'erreurs, le tracé des données aura la forme d'un cercle parfait. La présence d'erreurs déformera le cercle, par exemple en ajoutant des crêtes sur sa circonférence et en lui donnant éventuellement une forme plus elliptique.

Ces écarts par rapport à un cercle parfait révèlent des problèmes et imprécisions au niveau de la structure mécanique de la machine et système de commande.



Figure 08. Barre à billes [38].

b) L'interférométrie laser

L'interférométrie laser (figure 09) a été choisie comme méthode de mesure commune pour mesurer les erreurs individuelles d'une MOCN. En raison du principe de fonctionnement de l'interféromètre laser, on effectue une mesure directe de chaque erreur géométrique, en minimisant l'influence des autres mouvements d'erreur des composants de la machine.

Un grand soin doit être pris lors de la mesure et l'enregistrement des conditions environnementales. Les dérives thermiques, les variations de pression et d'humidité relative peuvent modifier l'indice de réfraction de l'air et affectant la longueur d'onde du faisceau laser, ainsi que l'expansion des composants structurels de la machine en raison des changements thermiques. De plus, un alignement correct à l'installation entre le faisceau laser, l'axe mesuré et les optiques (réflecteurs, interféromètre, etc.) est essentiel pour minimiser l'incertitude et éviter toute erreur de cosinus.

Comme les erreurs de mouvement des axes sont fonctions de la position, cinq erreurs paramétriques (3 déplacements linéaires et 2 erreurs angulaires) pour chaque axe doivent être mesurées indépendamment. Pour les erreurs de rectitude et les erreurs angulaires, différentes optiques interférométriques sont requises. Les erreurs de roulis ne peuvent pas être mesurées avec un interféromètre laser standard, ces erreurs peuvent être mesurées avec des niveaux de précision [39].

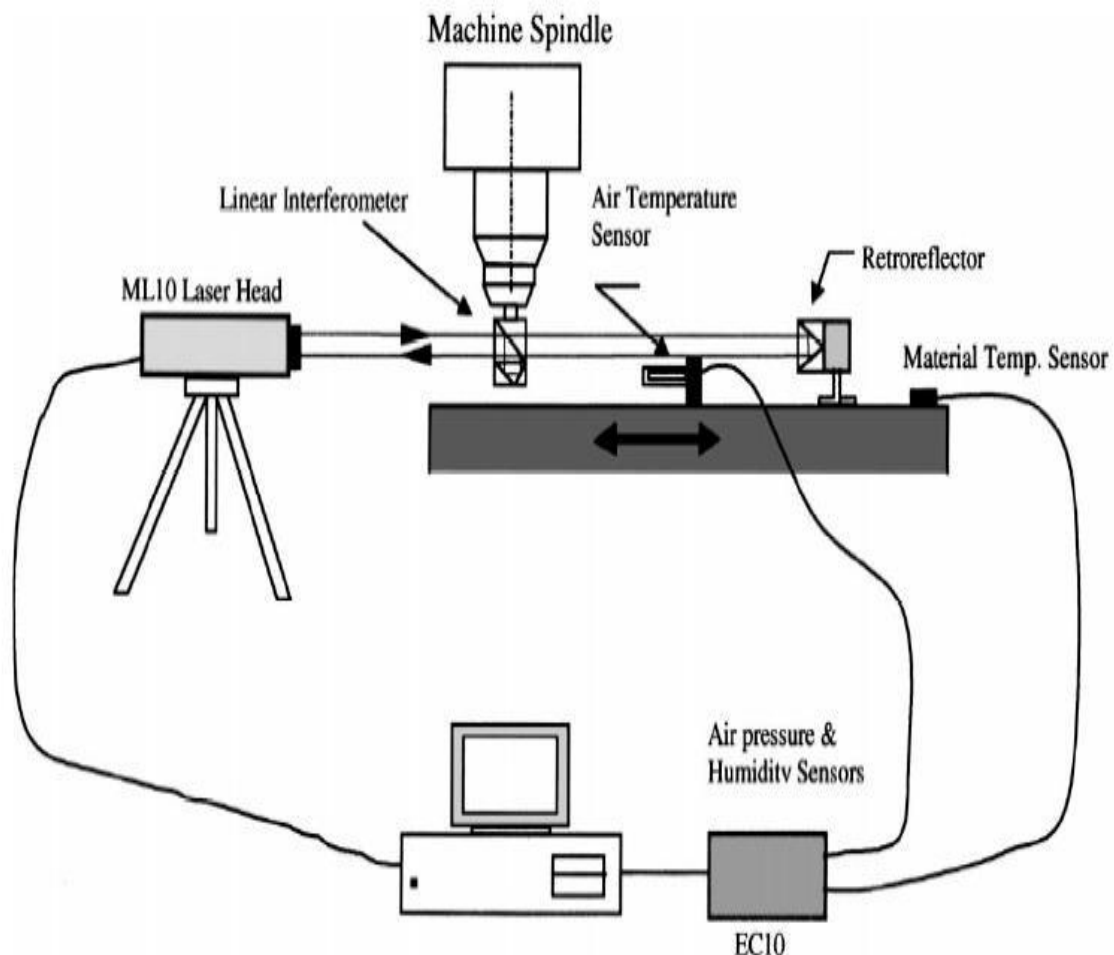


Figure 09. Interféromètre laser pour la mesure des erreurs de déplacement linéaire [10].

c)Encodeur planaire KGM

L'encodeur planaire KGM fournit une grande rapidité et efficacité pour mesurer dynamiquement la performance des machines-outils à commande numérique. Il peut détecter la déviation dans le plan du trajet faite par la machine par rapport à un trajet nominal 2D incluant l'effet des erreurs géométriques et des erreurs induites par son contrôleur et son système d'entraînement. Avec les mesures de l'encodeur planaire KGM, le comportement de la machine sur des trajectoires linéaires et des trajectoires 2D quelconques de forme libre peut être détecté. En plus, le KGM est capable de mesurer des trajectoires circulaires avec des petits rayons et des grandes vitesses d'avance avec une grande précision, des possibilités qui ne sont pas offertes par les tests de la barre à billes. Avec ces tests de petits rayons, les erreurs dynamiques peuvent être identifiées facilement, cars, les erreurs géométriques de la machine sont minimales et leur effet est négligeable sur ce type de trajet.

Le KGM (figure 10) comporte une plaque de mesure avec réseau croisé encastré dans une plaque de montage. Lors de la mesure, la tête captrice est déplacée sans contact au-dessus du réseau croisé de la plaque de mesure. Pour chacune des 2 directions d'axes perpendiculaires, le KGM délivre simultanément 2 signaux sinusoïdaux déphasés de 90° (période du signal de $4 \mu\text{m}$). Le traitement des signaux de mesure est effectué dans le PC. La programmation de tests de formes circulaires et de formes libres est très simple pour le KGM. Le logiciel d'exploitation ACCOM demande tous les paramètres requis pour la mesure et crée le programme CN nécessaire. Celui-ci peut être transmis immédiatement dans la commande CNC via les interfaces (série ou Ethernet TCP/IP)[40].



Figure 10.Schéma d'essai de KGM sur une machine-outil [37]

CHAPITRE 02

Cadre théorique

3/Cadre théorique :

3-1/Développement des techniques pour des performances des machines-outils

La barre à billes est un instrument de mesure largement utilisé pour évaluer la précision et la performance des machines-outils à commande numérique. Il a été développé la première fois par Bryan [41] en 1982 pour mesurer les erreurs des machines-outils. Il est constitué de deux billes de précision et un transformateur différentiel linéaire variable LVDT (linear variable differential transformer). Actuellement, la barre à bille est devenue l'instrument le plus réputé dans les milieux industriels grâce à son coût abordable, sa précision et son utilisation facile en comparaison avec autres instruments de mesure tel que l'interféromètre laser. Par la suite, Knapp [42] a proposé une méthode similaire en utilisant un palpeur bidimensionnelle et un disque maître. Après son innovation, la barre à billes de Bryan a été utilisée largement par plusieurs chercheurs, Kunzmann et al. [43] l'a utilisé pour étalonner les erreurs paramétriques des machines-outils, et Kakino et al. [44] pour démontrer la relation entre les mesures barre à billes et les différentes erreurs paramétriques pour les machines-outils. Burdekin et Park [45] ont proposé un type similaire de barre à billes en utilisant deux LVDT.

3-2/Modèle de prédiction des tests barre à billes

La Figure.11 montre une configuration typique d'une barre à billes disponible dans le marché, où une bille est fixée sur la table et l'autre est fixée sur la broche de la machine-outil.

Soit O (0,0,0) le point central de la bille sur la table, et P (X, Y, Z) soient les coordonnées nominales du centre de la bille attaché à la broche. Lorsque la machine est commandée pour passer à la position P (X, Y, Z), on suppose que la position actuelle de la machine est P '(X', Y ', Z'). Ainsi, l'erreur géométrique de la machine peut être définie comme la différence entre les deux coordonnées comme suite :

$$\Delta X = X' - X$$

$$\Delta Y = Y' - Y$$

$$\Delta Z = Z' - Z \dots\dots\dots(1)$$

Où, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ sont les composants d'erreur à la position nominale P (X, Y, Z) par rapport au point O (0,0,0). Lorsque les composants d'erreur $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ sont présents, l'erreur dans la distance entre les deux points, ΔR , peut être évalué comme :

$$(R + \Delta R)^2 = X'^2 + Y'^2 + Z'^2 = (X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2 \dots \dots \dots (2)$$

Où, **R** est la distance nominale entre les deux points **O** et **P** (rayon).

En ignorant les termes du second ordre des composants d'erreur et en rappelant que

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2, \text{ l'équation(2) donne}$$

$$\Delta R = (X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z)/R \dots \dots \dots (3)$$

Equation (3) donne l'erreur dans le sens de la longueur de la barre à billes lorsque les composants d'erreur $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ sont présents pendant le mouvement circulaire de la machine. Cette équation peut être utilisée pour prédire les erreurs des machines-outils durant un trajet circulaire.

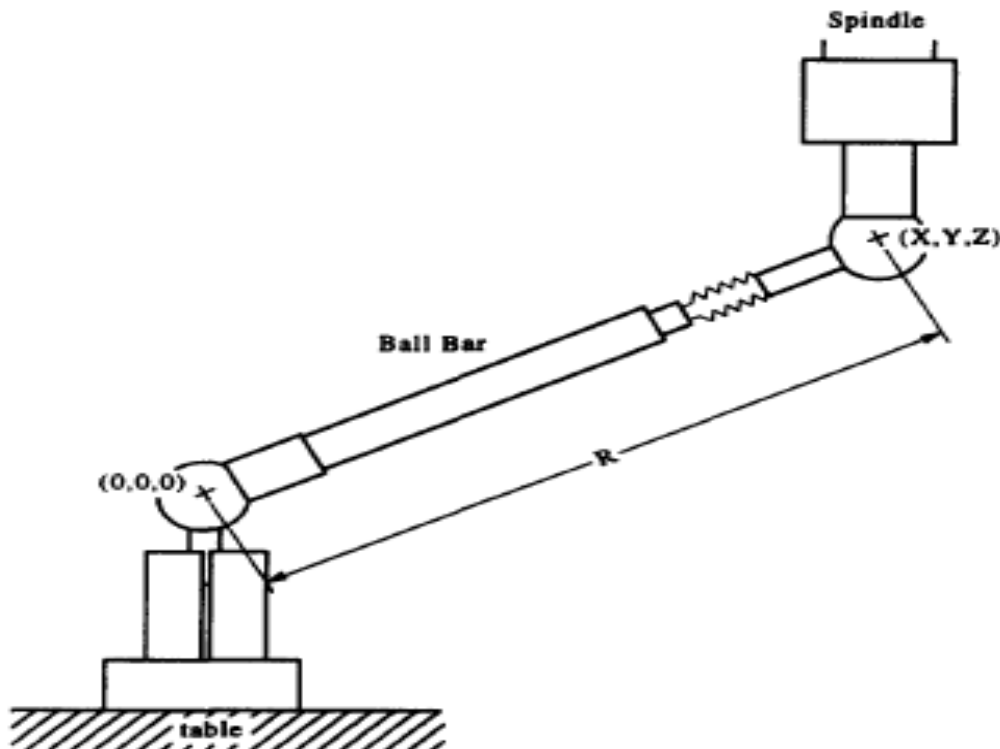


Figure. 11. Mesure des erreurs à l'aide de la barre à billes [46]

3-3/Modélisation des erreurs paramétriques pour les machines-outils

Il est largement reconnu qu'il existe six composants d'erreurs géométriques lorsqu'un élément de machine se déplace le long d'une voie de guidage (Fig.12). Il s'agit de trois erreurs de translation (erreur de position et erreurs de rectitude horizontale et verticale) et trois erreurs de rotation (tangage, lacet et roulis). Pour une machine à trois axes linéaires, et lorsque le mouvement multiaxes est considéré, 21 composantes d'erreurs sont généralement identifiées dont six composantes d'erreurs le long de chaque axe et trois erreurs de perpendicularité entre les axes X-Y, Y-Z et Z-X. Ces erreurs de mouvements peuvent être individuellement modélisées comme des fonctions polynomiales de chaque position articulaire de la machine.

A/Modélisation des erreurs géométriques

A-1/Erreur de position (erreur d'échelle)

Les composants d'erreur de position, $\delta_x(\mathbf{X}), \delta_y(\mathbf{Y}), \delta_z(\mathbf{Z})$, le long des axes X, Y, Z, sont généralement définis comme la différence entre les coordonnées réels et les coordonnées nominales le long de chaque axe.

Parce que les erreurs de mouvement des machines-outils sont dépendantes de la position, de nombreuses études ont utilisé les polynômes pour les représenter [47-50]. La représentativité de ces polynômes a été vérifiée et validée expérimentalement par la suite par Slamani et al [51].

Dans ce travail, des polynômes ordinaires sont employés pour modéliser les erreurs de mouvements et les erreurs de membrures. Chaque écart de translation et de rotation est représenté par un polynôme de degré n. Les erreurs de membrure sont unies avec les erreurs de mouvement.

La forme générale du modèle polynomiale utiliser pour représenter les écarts d'échelle est :

$$\delta_x(\mathbf{X}) = \beta_{xx_1}(\mathbf{X}/\mathbf{R}) + \beta_{xx_2}(\mathbf{X}/\mathbf{R})^2 + \dots = \sum_{i=1}^N \beta_{xx_i}(\mathbf{X}/\mathbf{R})^i \dots\dots\dots(4)$$

$$\delta_y(\mathbf{Y}) = \beta_{yy_1}(\mathbf{Y}/\mathbf{R}) + \beta_{yy_2}(\mathbf{Y}/\mathbf{R})^2 + \dots = \sum_{i=1}^N \beta_{yy_i}(\mathbf{Y}/\mathbf{R})^i \dots\dots\dots(5)$$

$$\delta_z(\mathbf{Z}) = \beta_{zz_1}(\mathbf{Z}/\mathbf{R}) + \beta_{zz_2}(\mathbf{Z}/\mathbf{R})^2 + \dots = \sum_{i=1}^N \beta_{zz_i}(\mathbf{Z}/\mathbf{R})^i \dots\dots\dots(6)$$

Où, $\mathbf{X}/\mathbf{R}, \mathbf{Y}/\mathbf{R}, \mathbf{Z}/\mathbf{R}$, sont les coordonnées sans dimension de la position le long de chaque axe, et $\beta_{xx_1}, \beta_{yy_1}, \beta_{zz_1}$ sont les coefficients du polynôme.

A-2/ Erreur de rectitude

L'erreur de rectitude est principalement due à la non-rectitude des voies de guidage des machines-outils. Étant donné que cette erreur est définie comme la déviation perpendiculaire le long de chaque axe, et puisque elle est fonction de la position, elle peut être modélisée par une fonction polynomiale de second ordre, tandis que la fonction polynomiale de premier ordre est considérée pour modéliser l'erreur d'équerrage entre les axes XY, XZ et YZ.

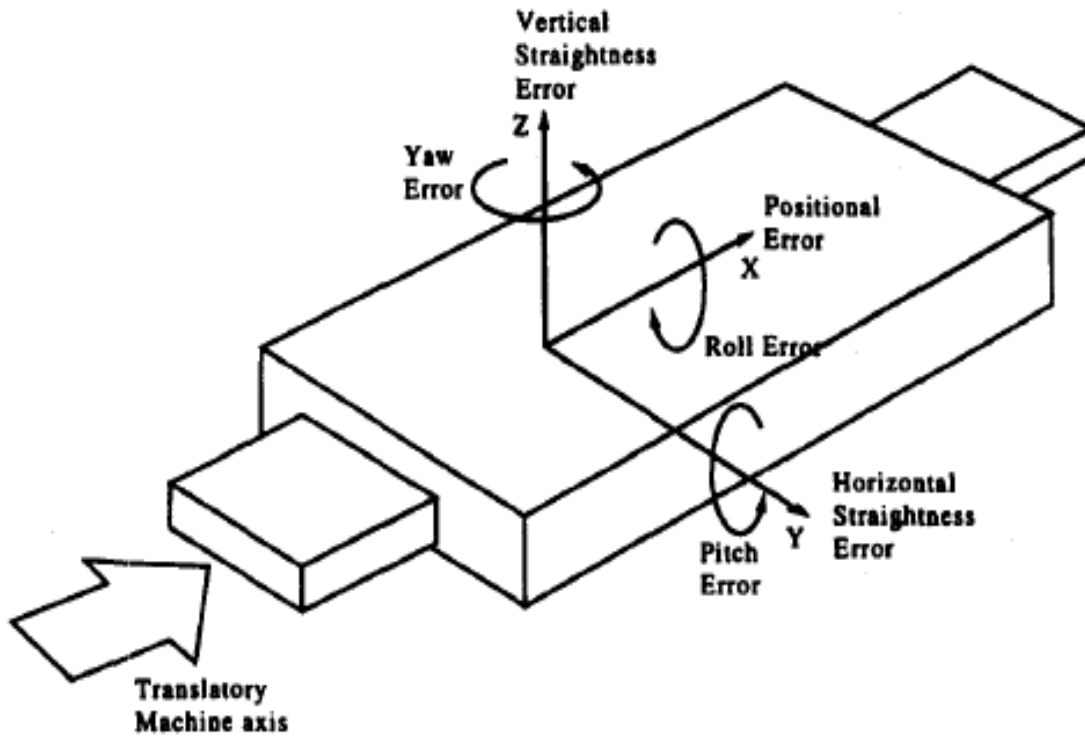


Figure. 12. Six erreurs paramétriques le long d'un axe de machine [46].

Comme mentionné précédemment, une machine-outil à trois axes linéaire possède en totalité six erreurs de rectitude (2 pour chaque axe). Le modèle polynomial générale de ces erreurs est :

$$\delta_y(X) = \beta_{yx_2}(X/R)^2 + \beta_{yx_3}(X/R)^3 + \dots = \sum_{i=2}^N \beta_{yx_i}(X/R)^i \dots\dots\dots(7)$$

$$\delta_z(X) = \beta_{zx_2}(X/R)^2 + \beta_{zx_3}(X/R)^3 + \dots = \sum_{i=2}^N \beta_{zx_i}(X/R)^i \dots\dots\dots(8)$$

$$\delta_x(Y) = \beta_{xy_2}(Y/R)^2 + \beta_{xy_3}(Y/R)^3 + \dots = \sum_{i=2}^N \beta_{xy_i}(Y/R)^i \dots\dots\dots(9)$$

$$\delta_z(Y) = \beta_{zy_2}(Y/R)^2 + \beta_{zy_3}(Y/R)^3 + \dots = \sum_{i=2}^N \beta_{zy_i}(Y/R)^i \dots\dots\dots(10)$$

$$\delta_x(Z) = \beta_{xz_2}(Z/R)^2 + \beta_{xz_3}(Z/R)^3 + \dots = \sum_{i=2}^N \beta_{xz_i}(Z/R)^i \dots\dots\dots(11)$$

$$\delta_y(Z) = \beta_{yz_2}(Z/R)^2 + \beta_{yz_3}(Z/R)^3 + \dots = \sum_{i=2}^N \beta_{yz_i}(Z/R)^i \dots\dots\dots(12)$$

Où, $\delta_y(X)$, $\delta_z(X)$, $\delta_x(Y)$, $\delta_z(Y)$, $\delta_x(Z)$, $\delta_y(Z)$ sont les composants d'erreur de rectitude le long des axes X, Y et Z, respectivement. Les constantes β_{yx_i} , β_{zx_i} , β_{xy_i} , β_{zy_i} , β_{zy_i} et β_{yz_i} , sont les coefficients de la fonction polynomiale qui doivent être déterminés.

A-3/ Composants d'erreur angulaire

A-3-1/ Erreur de tangage et de lacet

Les erreurs de tangage et de lacet sont les composantes d'erreur angulaire dans la direction perpendiculaire le long de chaque axe, elles sont influencées par la géométrie de système de guidage des machines-outils et peuvent donc être liées au profil de rectitude le long de chaque axe. Par exemple, l'erreur de lacet, $E_x(Y)$, le long de l'axe Y peut être définie comme la dérivée de l'erreur de rectitude verticale le long de l'axe des Y (Figure 13):

$$E_x(Y) = \partial (\delta_z(Y)) / \partial_y = \sum_{i=2}^N i \beta_{zy_i} (Y/R)^{i-1} / R \dots \dots \dots (13)$$

La composante de l'erreur de lacet, $E_z(Y)$, le long de l'axe Y peut être définie comme la dérivée de l'erreur de rectitude horizontale le long de l'axe Y, c'est-à-dire

$$E_z(Y) = -\partial (\delta_x(Y)) / \partial_y = -\sum_{i=2}^N i \beta_{xy_i} (Y/R)^{i-1} / R \dots \dots \dots (14)$$

Où le signe moins est considéré pour la convention de signe des composants d'erreur angulaire. De même, le reste des erreurs de tangage et de lacet sont modélisées en tant que dérivées des profils respectifs d'erreur de rectitude, c'est-à-dire :

$$E_y(X) = -\partial (\delta_z(X)) / \partial_x = -\sum_{i=2}^N i \beta_{zx_i} (X/R)^{i-1} / R \dots \dots \dots (15)$$

$$E_z(X) = \partial (\delta_y(X)) / \partial_x = \sum_{i=2}^N i \beta_{yx_i} (X/R)^{i-1} / R \dots \dots \dots (16)$$

$$E_x(Z) = -\partial (\delta_y(Z)) / \partial_z = -\sum_{i=2}^N i \beta_{yz_i} (Z/R)^{i-1} / R \dots \dots \dots (17)$$

$$E_y(Z) = \partial (\delta_x(Z)) / \partial_z = \sum_{i=2}^N i \beta_{xz_i} (Z/R)^{i-1} / R \dots \dots \dots (18)$$

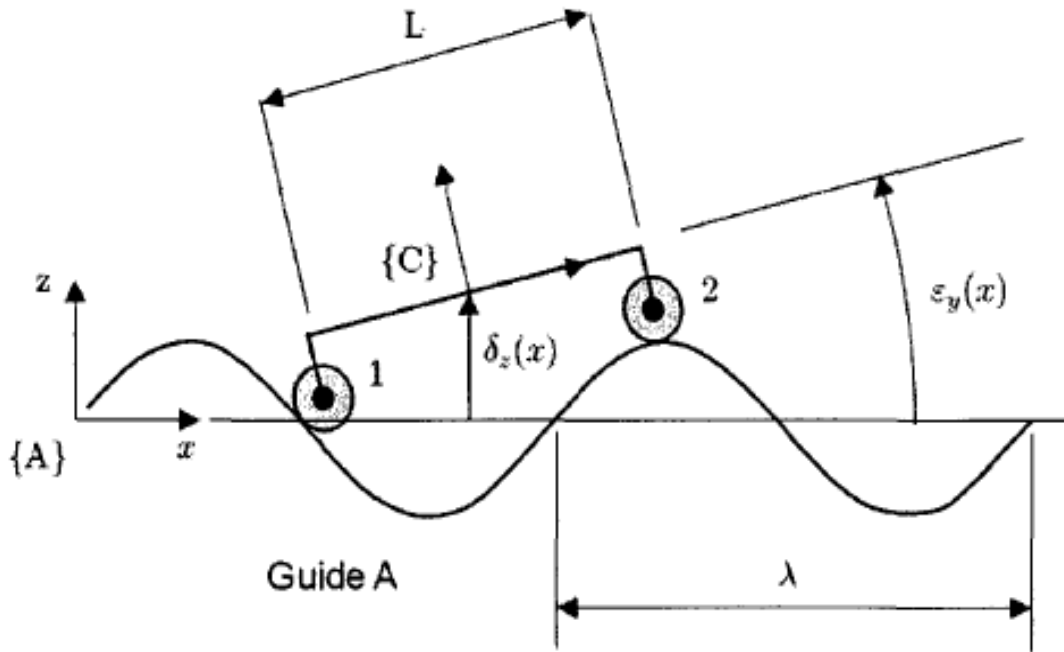


Figure 13 : Relation entre l’erreur de rectitude et l’erreur de tangage [52]

A-3-2/ Erreur de roulis

Les composants de l'erreur de roulis, $E_x(X)$, $E_y(Y)$, $E_z(Z)$, sont définis comme l'erreur angulaire dans la direction axiale. Ainsi, les composants d'erreur de roulis peuvent être modélisés en tant que fonction polynomiale de la position le long de chaque axe:

$$E_x(X) = \sum_{i=1}^N \epsilon_{xx_i} (X/R)^i \dots\dots\dots(19)$$

$$E_y(Y) = \sum_{i=1}^N \epsilon_{yy_i} (Y/R)^i \dots\dots\dots(20)$$

$$E_z(Z) = \sum_{i=1}^N \epsilon_{zz_i} (Z/R)^i \dots\dots\dots(21)$$

Où, $E_x(X)$, $E_y(Y)$, $E_z(Z)$ sont les composants d'erreur de roulis le long des axes X, Y et Z, et ϵ_{xx_i} , ϵ_{yy_i} , ϵ_{zz_i} sont les coefficients pour le modèle polynomial.

A-4/Erreur de jeu d'inversion (backlash)

L'erreur de jeu d’inversion est principalement causée par un jeu dans l'ensemble vis et écrou, vis à billes ou engrenages pendant l'inversion du mouvement (Figure 14-a).

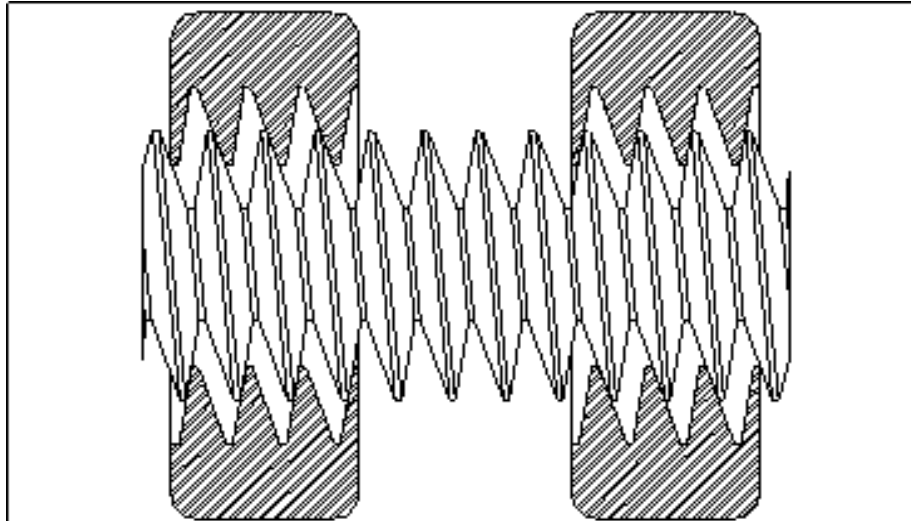


Figure 14-a. Jeu d'inversion dans le système vis-écrou

Supposons que la quantité de jeu d'inversion dans l'axe X est B_x (Figure14-b), l'erreur de jeu d'inversion ΔX_B pour cet axe peut être modélisée comme suit:

$$\Delta X_B = -(B_x/2)sign(dX/dt).....(22)$$

Où, dX/dt est la dérivée de la position en fonction du temps, qui est la vitesse et $sign()$ est le signe de l'expression entre parenthèses (vitesse). Le signe moins dans l'équation (22) est pour donner au jeu d'inversion une valeur positif lorsque le mouvement change de la direction aller vers la direction retour (sens inverse). De manière similaire, les erreurs de jeu d'inversion dans les axes Y et Z peuvent être modélisées comme :

$$\Delta Y = -(B_y/2)sign(dY/dt).....(23)$$

$$\Delta Z = -(B_z/2)sign(dZ/dt).....(24)$$

Où B_y et B_z sont la quantité du jeu d'inversion dans les axes Y et Z, respectivement.

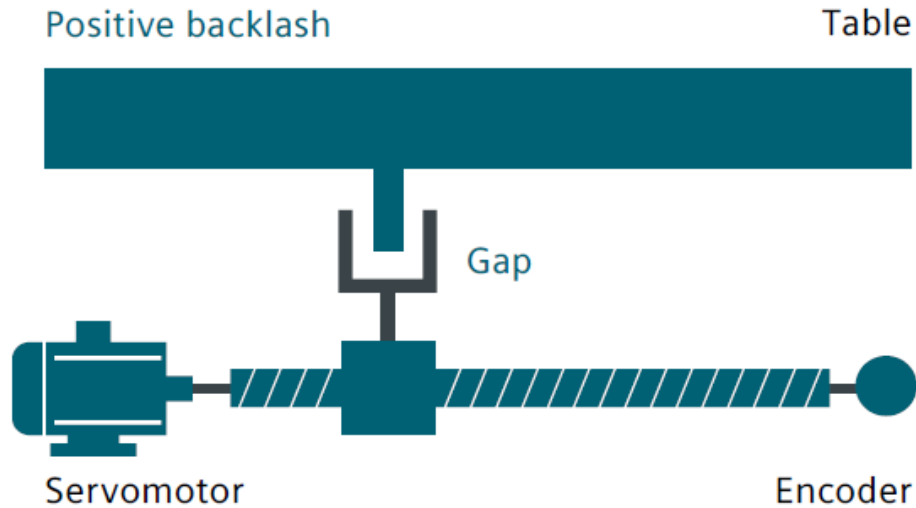


Figure.14- b. Jeu d’inversion dans un axe d’une machine-outil

A-5/Erreur de perpendicularité

L'erreur de perpendicularité est définie comme l'écart entre deux axes nominalement orthogonaux et est principalement due à un désalignement ou à un mauvais assemblage, dans les axes orthogonaux. Soit α la quantité de la non-perpendicularité de l'axe X par rapport à une valeur nominal (dans le plan XY) et à une position correspondant à une distance R du point d'origine, comme montré à la Figure 13. Par conséquent, l'erreur de position(ΔY), sur Y à la position X, due à la non-perpendicularité de l'axe X est:

$$\Delta Y = -\alpha(X/R).....(25)$$

Similairement, lorsque β_1 et β_2 sont les quantités d'erreurs de non- perpendicularité de l'axe Z dans les plans XZ et YZ respectivement (Fig.15) les erreurs ΔX et ΔY peuvent être modélisées comme suite:

$$\Delta X = -\beta_1(Z/R).....(26)$$

$$\Delta Y = -\beta_2(Z/R).....(27)$$

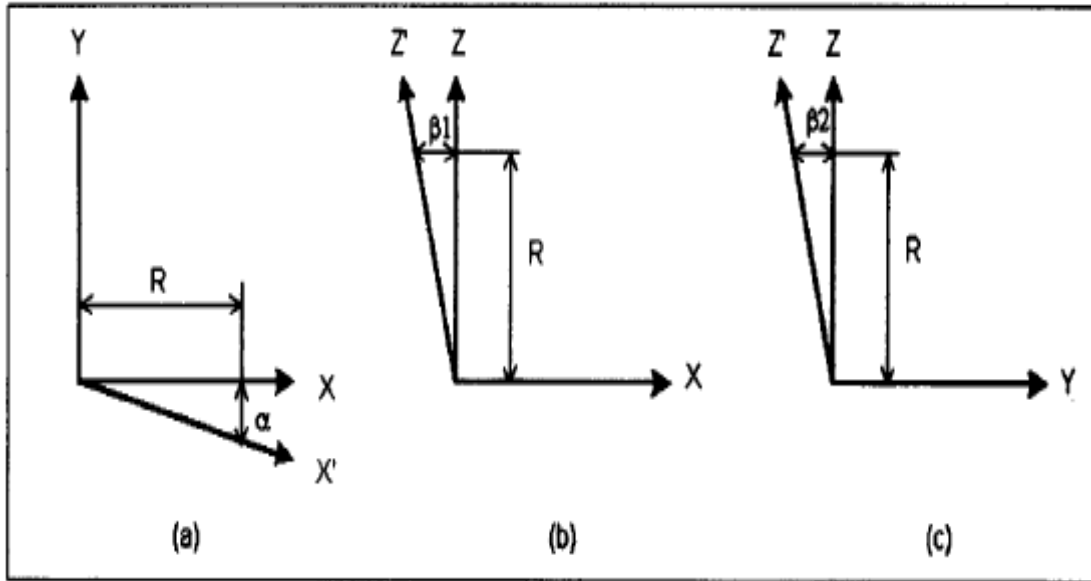


Figure. 15. Écartez les erreurs dans trois plans orthogonaux [46].

B/Modélisation des erreurs dynamiques

B-1/ Erreurs dues à l'incompatibilité des gains de système servo

Lorsque les gains de l'amplificateur des servomoteurs pour l'axe en mouvement ne sont pas bien ajustés (désadaptation entre les caractéristiques d'axe), une erreur de poursuite en régime permanent apparaît (Figure 16). Si K_{sx} et V_x sont le gain d'asservissement et la vitesse de l'axe X respectivement, l'erreur en régime permanent (ΔX_s), entre la position réelle et la position commandée l'axe X peut être dérivée de la théorie du contrôle [53] :

$$\Delta X_s = -V_x / K_{sx} \dots \dots \dots (28)$$

Similairement, l'erreur en régime permanent ΔY et ΔZ , dans les axes Y et Z peut être obtenue comme :

$$\Delta Y_s = -V_y / K_{sy} \dots \dots \dots (29)$$

$$\Delta Z_s = -V_z / K_{sz} \dots \dots \dots (30)$$

Où, V_y , K_{sy} , V_z , K_{sz} sont les vitesses et les gains d'asservissement pour les axes Y et Z, respectivement. Ainsi, lorsque F est la vitesse d'alimentation circonférentielle, V_x et V_y peuvent être obtenus comme :

$$V_x = -F \sin \theta \text{ et } V_y = F \cos \theta \dots\dots\dots(31)$$

Pour la rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre

$$V_x = F \sin \theta \text{ et } V_y = -F \cos \theta \dots\dots\dots(32)$$

Pour la rotation dans le sens des aiguilles d'une montre

Où θ est la position angulaire le long du mouvement circulaire.

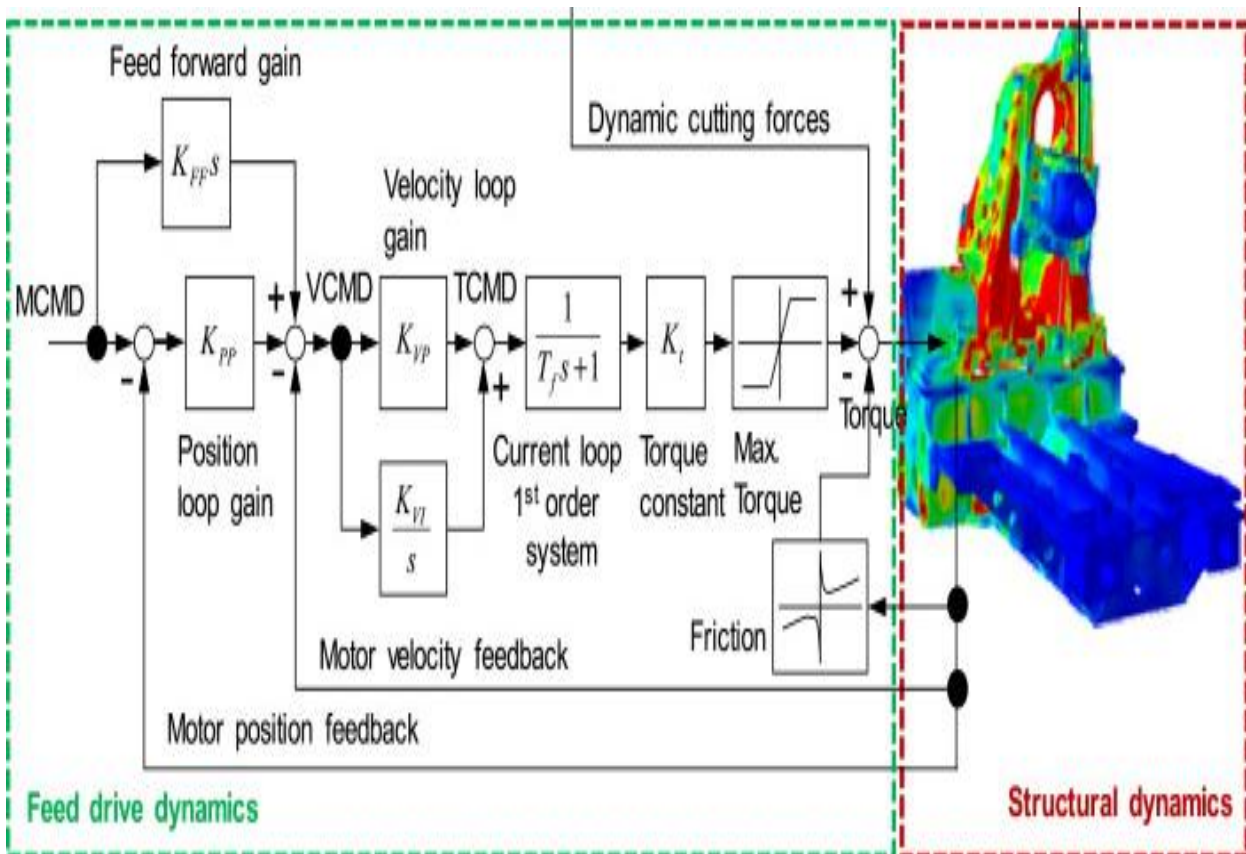


Figure 16. Boucle d’asservissement pour une machine-outil à commande numérique

C/Intégration des erreurs géométrique et dynamique

Le diagramme d’intégration des erreurs géométriques et dynamiques pour simuler les erreurs d’une machine-outil durant un mouvement circulaire est présenté à la Figure 17.

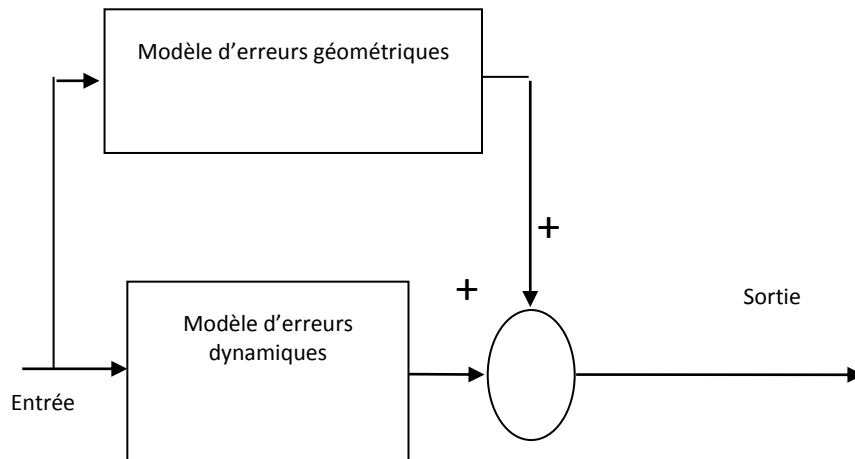


Figure. 17: schéma d'intégration des erreurs

Pour simuler les erreurs dynamiques (ΔR_d) dans un test barre à billes, on remplace premièrement les équations (31) et (32) aux équations (29) et (30) puis substituer dans l'équation (3), on obtient l'équation globale suivante :

$$\Delta R_d = -F \sin \theta (X/R)/Ksx + F \cos \theta (Y/R)/Ksy$$

$$= -F \sin \theta \cos \theta /Ksx + F \cos \theta \sin \theta /Ksy$$

$$= (-FKsy + FKsx)/(KsxKsy) \cos \theta \sin \theta$$

$$= eF/K \cos \theta \sin \theta$$

$$= eF/K(X/R)(Y/R)$$

$$= Mxy(X/R)(Y/R) \text{ Pour le sens antihoraire.....(33)}$$

Où $K = \sqrt{KsxKsy}$, $e = (Ksx - Ksy)/K$, avec $Mxy(= eF/K)$ est le coefficient pour le désadaptation (décalage) de gain entre l'axe X-Y.

Une équation similaire peut être dérivée pour la rotation dans le sens horaire:

$$\Delta R_d = -Mxy(X/R)(Y/R) \text{ Pour la rotation sens horaire.....(34)}$$

Les équations (33) et (34) représentent l'erreur circulaire qui influencée par le décalage de gain entre les axes X-Y. De même, les erreurs circulaires dues à l'incompatibilité de gain entre les axes Y-Z et Z-X respectivement sont :

$$\begin{aligned} \Delta R_d &= Myz(Y/R)(Z/R) \text{ Pour la rotation sens antihoraire} \\ &= -Myz(Y/R)(Z/R) \text{ Pour la rotation sens horaire(35)} \end{aligned}$$

Et

$$\begin{aligned} \Delta R_d &= Mzx(Z/R)(X/R) \text{ Pour la rotation sens antihoraire} \\ &= -Mzx(Z/R)(X/R) \text{ Pour la rotation sens horaire(36)} \end{aligned}$$

Où, Myz , Mzx sont les coefficients de l'incompatibilité de gain entre les axes Y-Z et Z-X, respectivement.

Pour simuler les erreurs volumétriques dans un test barre à billes, les erreurs dynamiques et géométriques sont intégrées selon le diagramme présenté à la Figure 17.

L'erreur totale dans ce cas est :

$$\begin{aligned} \Delta R_d &= (X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z)/R \\ &= \Delta X(X/R) + \Delta Y(Y/R) + \Delta Z(Z/R) \\ &= \beta_{xx_1}(X/R)^2 + \beta_{yy_1}(Y/R)^2 + \beta_{zz_1}(Z/R)^2 \\ &\quad - 3\beta_{xy_1}(X/R)(Y/R)^2 + \beta_{xz_2}(X/R)(Z/R)^2 \\ &\quad - \beta_{yx_2}(Y/R)(X/R)^2 + \beta_{yz_2}(Y/R)(Z/R)^2 \\ &\quad + \beta_{zx_2}(Z/R)(X/R)^2 + \beta_{zy_2}(Z/R)(Y/R)^2 \\ &\quad - Bx/2(X/R)sign(dX/dt) - By/2(Y/R)sign(dY/dt) \end{aligned} \tag{37}$$

$$-Bz/2(Z/R)\text{sign}(dZ/dt) - \beta_1(Z/R)(X/R) + \alpha(X/R)(Y/R)$$

$$-\beta_2(Y/R)(Z/R)$$

$$\pm M_{xy}(X/R)(Y/R) \pm M_{yz}(Y/R)(Z/R) \pm M_{zx}(Z/R)(X/R)$$

Pour faciliter la modélisation est la simulation, seulement les premiers termes des fonctions polynomiales sont pris en compte pour chaque composant d'erreur paramétrique. Les composants d'erreur de roulis et l'effet des décalages d'outils ne sont pas considérés ici pour simplifier la modélisation.

CHAPITRE 03

Développement de l'interface graphique

4/Développement de l'interface graphique

4-1/Les interfaces graphiques

GUI est un sigle, en informatique, pour **G**raphical **U**ser **I**nterface. Sa traduction française en « Interface graphique pour l'utilisateur » ou « Interface graphique utilisateur », qui donnerait le signe IGU, n'est pas utilisée. Par contre « Interface graphique » est une expression courante.

Les interfaces graphiques permettent de contrôler des applications logicielles avec des commandes de type pointer-cliquer. Avec une interface de ce type, l'utilisateur n'a pas besoin de connaître un langage ni de saisir des commandes pour se servir de l'application.

Une interface graphique utilisateur est un ensemble d'éléments graphiques permettant d'interagir entre des (parties de) programmes et l'utilisateur en affichant des informations (textes, graphiques, images, ...) et en déclenchant des actions (callbacks) à la suite d'événements : clic de souris, déplacement de souris, entrée au clavier, ...). Un exemple d'interface utilisateur est la fenêtre liée à une figure et les objets qu'elle peut contenir (menus, boutons, axes, ...).

La version 6 et 7 de MATLAB possède un outil nommé GUIDE (Graphical User Interface Développement Environnement) facilitant la génération des scripts MATLAB nécessaires à la création d'une interface utilisateur [54].

Un GUI se présente comme une structure arborescente (ci-dessous) composée d'objets d'interface (fig18)

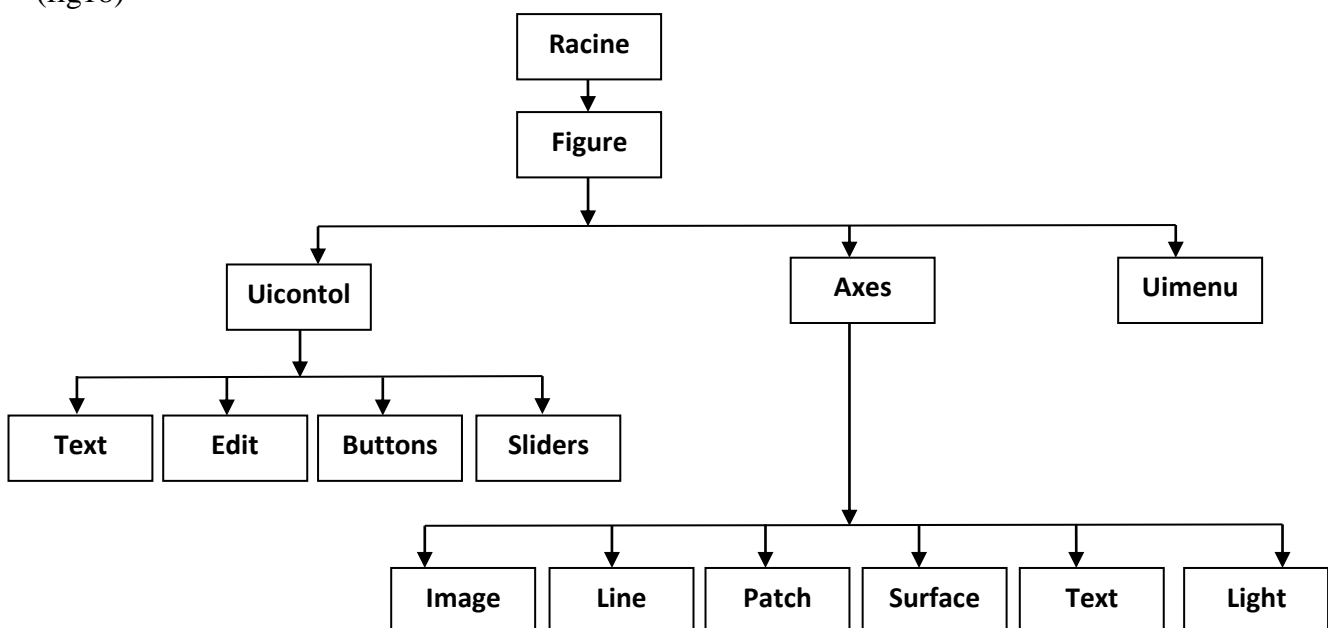


Figure.18 structure arborescente composée d'objets d'interface.

4-2/Création d'une interface graphique

Une interface graphique permet de contrôler une application interactivement avec la souris, plutôt que par lancement des commandes au clavier.

Une interface graphique comprend des menus, des boutons, des "ascenseurs", des cases à cocher, des listes de choix, des zones de texte. Exemple d'interface (figure 19) :

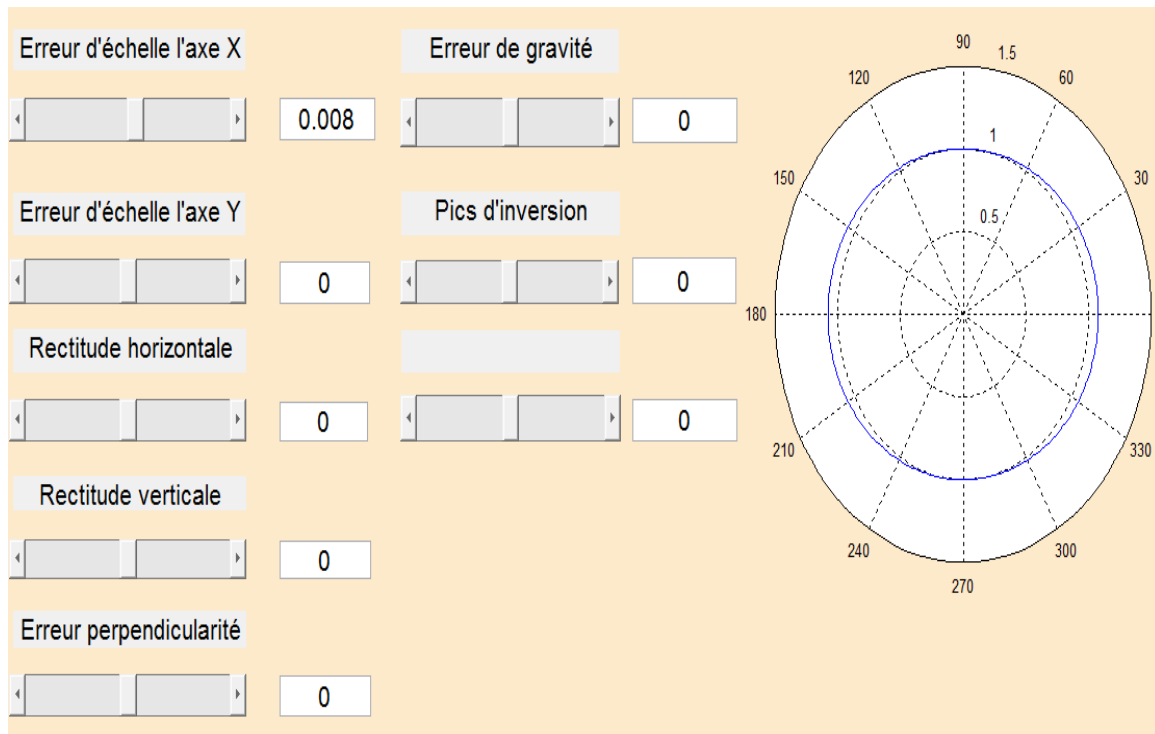


Figure.19 Exemple d'interface.

Elle permet de "cliquer" directement sur des images, des graphiques ou des objets pour modifier la valeur d'une variable, déclencher des fonctions ou simplement faire apparaître des informations lors d'un survol à la souris.

Matlab permet d'écrire assez simplement une interface graphique pour faire une application interactive utilisable par des utilisateurs non formés à Matlab.

Les notions principales d'une interface graphique sont :

- les divers objets graphiques, auxquels sont attribués des noms symboliques; ces "poignées De main" ou "*handles*" permettent de les repérer dans l'interface; pour envisager par exemple une modification dynamique (grisé d'un bouton provisoirement non utilisable, changement du texte d'un bouton, modification d'une liste de choix...)
- les *propriétés* des objets (couleur, disposition, taille, variable associée)
- les fonctions exécutées par le clic souris sur les éléments ou "*callbacks*" (décrites en ligne de commande Matlab).

Les versions actuelles de Matlab permettent de construire ces interfaces directement avec la souris grâce au GUIDE (Graphical User Interface Développement Environnement). Cet outil est capable de construire des applications de très haut niveau. Cependant, son approche est très délicate pour un utilisateur peu expérimenté. L'approche classique par description textuelle de l'interface, moins performante mais compréhensible, permet de se familiariser avec les principales notions [55].

4-3/Développement de l'Interfaces graphique :

Il est clair que l'interface graphique passe par un certain nombre d'étapes (figure 20) :

- Planification: délimitation du problème à résoudre,
- Analyse : Rassembler les équations mathématiques nécessaires
- Le Cahier de charges : définir les fonctions et tâches en détails : Énumérer les différentes tâches voulues et rassembler les données nécessaires,
- La Conception : compléter le cahier de charge avec les détails de conception,
- Développer le design,
- Exemples d'écran (taille des fenêtres...),
- Disposition des boutons,
- Les couleurs, la forme d'écriture.

Description Du Problème	Analyse Du Problème	Algorithme	Programme	Interface Graphique

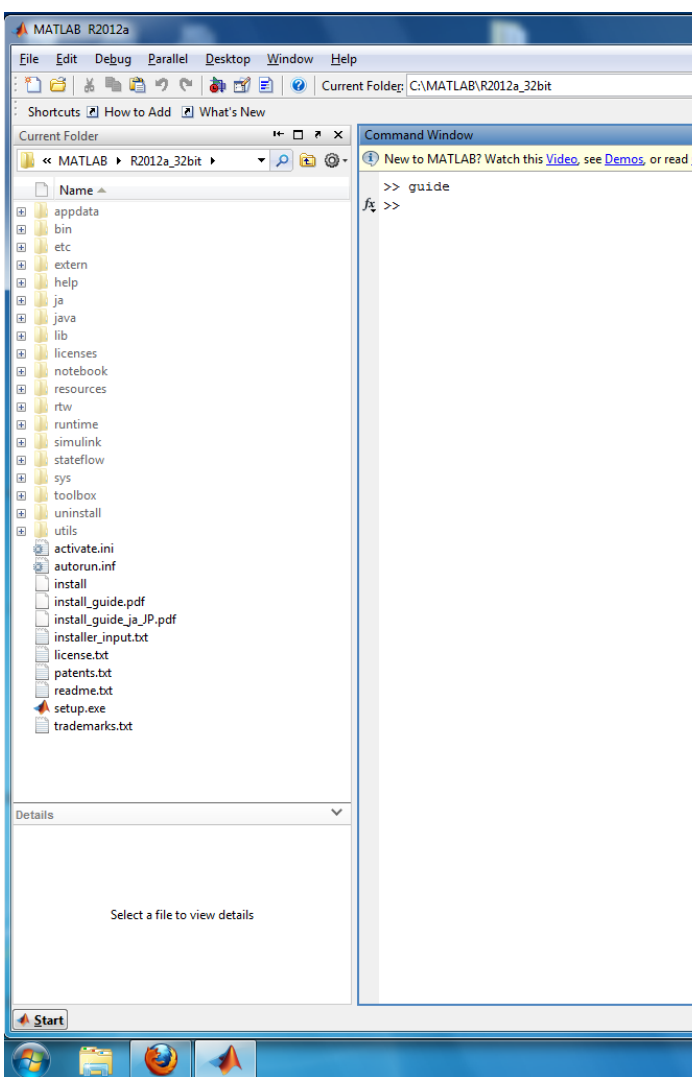
Figure20: étapes de réalisation de l'interface [56]

Pour créer notre interface graphique, on utilise l'outil GUIDE sur Matlab et on suit les étapes suivantes:

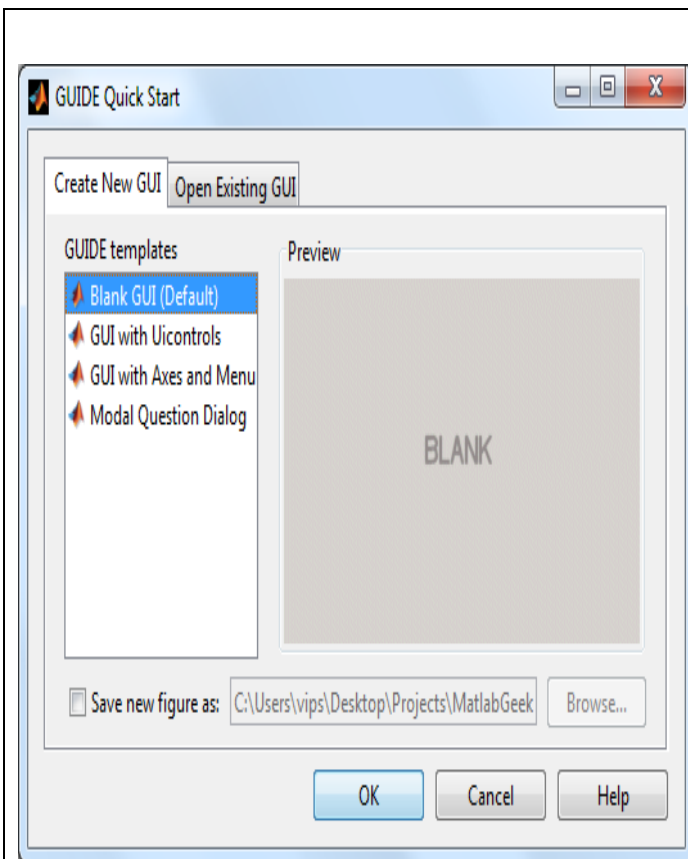
1) Création du fichier : .fig

MATLAB possède l'outil GUIDE, qui permet de créer facilement des interfaces graphiques. Il suffit pour cela de taper dans la ligne de commande de MATLAB `guide` et on a alors accès à ses différentes fonctions. On peut entrer autres créer une interface graphique à partir de modèles déjà existants, d'interfaces sauvegardées ou en créer depuis le début, ce que nous avons fait.

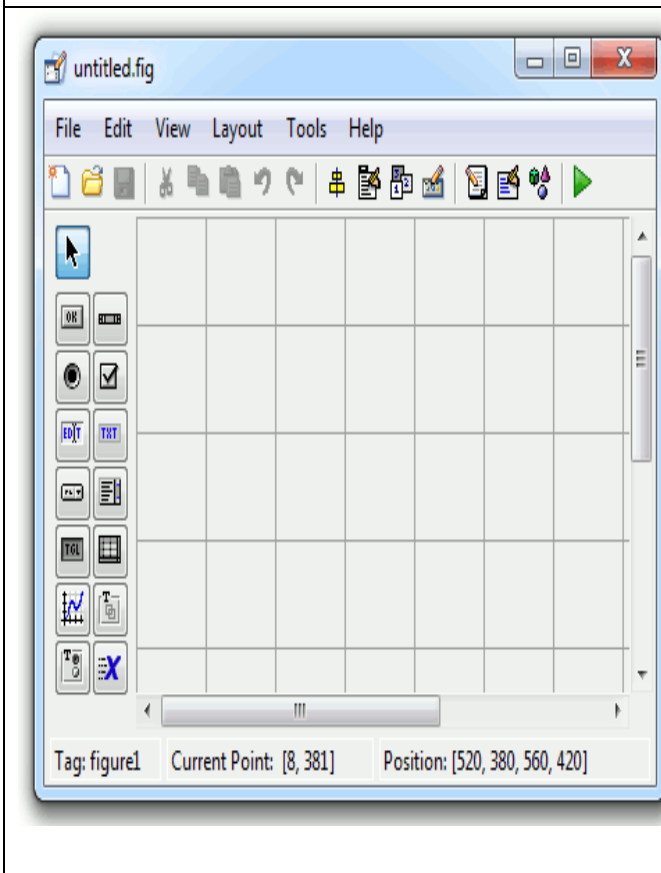
Pour chaque nouvelle interface créée, nous avons dû réfléchir aux différentes composantes dont nous avons besoin (champs d'affichage simples, champs ou l'utilisateur peut écrire, boutons, panneaux d'affichage, etc.) et les mettre en place en les sélectionnant dans la liste de composants située à gauche de la fenêtre et en déplaçant sur l'interface à créer et pour fait ça il suffit de suivre ces étapes.



1-Ecrire (`guide`) dans une nouvelle interface de command Windows après l'exécution de matlab



2-Puis après avoir la fenêtre de choix on appui sur le bouton (ok)



3-On obtient une interface graphique vide

	<p>4-Mis en place tous les composants essentiels dans l'interface (slider, axes, edit text...etc.) puis choisir les différentes propriétés de chaque composant (tail, couleur, position...etc.)</p>
	<p>5-Une fois tous les composants mis en place, il a fallu leur définir des valeurs par défaut. Par exemple, pour les champs ou l'utilisateur peut entrer des données, il a fallu indiquer ce qu'ils affichent au départ, lorsque l'utilisateur n'a encore rien entré.</p>

Enfin, et après tous les étapes précédents on sauvegarde le tout en un fichier nome avec l'extension : .fig

2) Création du fichier : .m correspondant

Une fois les différents composants de l'interface graphique mis en place, il faut les faire interagir, c'est-à-dire, programmer l'interface graphique (figure 21). GUIDE permet la génération automatique d'un fichier : .m correspondant à un fichier : .fig Celui-ci contient notamment une fonction s'exécutant au lancement du programme et les appels aux différents composants.

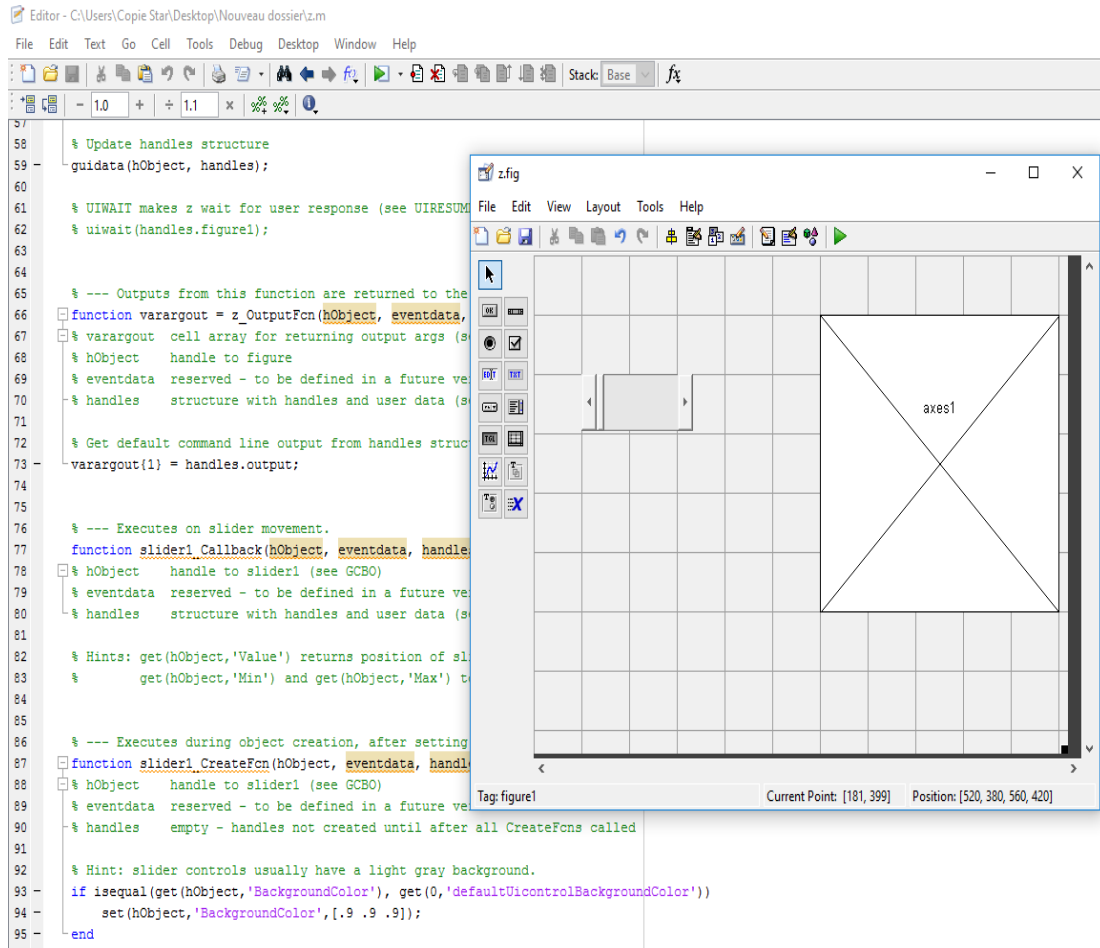


Figure 21. Programmation de l'interface graphique

3) Création d'algorithme (fonction) pour chaque composant slider :

Dans la création des fonctions, chaque slider doit être ayant un intervalle de variation et avec aussi le tag correspondant (par exemple slider1 comme la figure dessous) et le nom d'erreurs (dynamique ou géométrique) qui affiche sur le composant 'text'

Dans la suite on va présenter chaque erreur avec leur algorithme :

<p>pour l'erreur d'échelle suivent l'axe x :</p>	<pre> 77 function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles) 78 % hObject handle to slider1 (see GCBO) 79 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 80 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 81 82 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 83 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 84 - teta=linspace(-pi,pi,360); 85 - k1=get(handles.slider1,'value'); 86 - k2=0; 87 - set(handles.edit1,'string',k1); 88 - r=10; 89 - x=r*cos(teta); 90 - y=r*sin(teta); 91 - dx1=k1*x; 92 - dy2=k2*y; 93 - X=x.*(dx1); 94 - Y=y.*(dy2); 95 - dr=(X+Y)/r; 96 - rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 97 - M=max(dr)-min(dr); 98 - M=get(handles.slider10,'value'); 99 - set(handles.edit10,'string',M); 100 - ecart=dr-mean(dr); 101 - s=1./(M*rg); 102 - polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>
<p>pour l'erreur d'échelle suivent l'axe y :</p>	<pre> 117 function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles) 118 % hObject handle to slider2 (see GCBO) 119 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 120 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 121 122 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 123 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 124 - teta=linspace(-pi,pi,300); 125 - k1=0; 126 - k2=get(handles.slider2,'value'); 127 - set(handles.edit2,'string',k2); 128 - r=10; 129 - x=r*cos(teta); 130 - y=r*sin(teta); 131 - dx1=k1*x; 132 - dy2=k2*y; 133 - X=x.*(dx1); 134 - Y=y.*(dy2); 135 - dr=(X+Y)/r; 136 - rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 137 - M=max(dr)-min(dr); 138 - M=get(handles.slider10,'value'); 139 - set(handles.edit10,'string',M); 140 - ecart=dr-mean(dr); 141 - s=1./(M*rg); 142 - polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>

<p>pour l'erreur de perpendicularité à 45° :</p>	<pre> 237 function slider5_Callback(hObject, eventdata, handles) 238 % hObject handle to slider5 (see GCBO) 239 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 240 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 241 242 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 243 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 244 - teta=linspace(-pi,pi,360); 245 - k5=get(handles.slider5,'value'); 246 - set(handles.edit5,'string',k5); 247 - k=0; 248 - r=10; 249 - x=r*cos(teta); 250 - y=r*sin(teta); 251 - dy=k; 252 - dx5=k5*y; 253 - X=x.*(dx5); 254 - Y=y.*(dy); 255 - dr=(X+Y)/r; 256 - rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 257 - M=max(dr)-min(dr); 258 - M=get(handles.slider10,'value'); 259 - set(handles.edit10,'string',M); 260 - ecart=dr-mean(dr); 261 - s=1./(M*rg); 262 - polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>
<p>Rectitude horizontale :</p>	<pre> 157 function slider3_Callback(hObject, eventdata, handles) 158 % hObject handle to slider3 (see GCBO) 159 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 160 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 161 162 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 163 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 164 - teta=linspace(-pi,pi,360); 165 - k3=get(handles.slider3,'value'); 166 - k4=0; 167 - set(handles.edit3,'string',k3); 168 - r=10; 169 - x=r*cos(teta); 170 - y=r*sin(teta); 171 - dx3=k3.*y.^2; 172 - dx4=k4.*x.^2; 173 - X=x.*(dx3); 174 - Y=y.*(dx4); 175 - dr=(X+Y)/r; 176 - rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 177 - M=max(dr)-min(dr); 178 - M=get(handles.slider10,'value'); 179 - set(handles.edit10,'string',M); 180 - ecart=dr-mean(dr); 181 - s=1./(M*rg); 182 - polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>

Rectitude verticale :	<pre> 197 function slider4_Callback(hObject, eventdata, handles) 198 % hObject handle to slider4 (see GCBO) 199 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 200 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 201 202 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 203 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 204 teta=linspace(-pi,pi,360); 205 k3=0; 206 k4=get(handles.slider4,'value'); 207 set(handles.edit4,'string',k4); 208 r=10; 209 x=r*cos(teta); 210 y=r*sin(teta); 211 dx3=k3.*y.^2; 212 dx4=k4.*x.^2; 213 X=x.*(dx3); 214 Y=y.*(dx4); 215 dr=(X+Y)/r; 216 rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 217 M=max(dr)-min(dr); 218 M=get(handles.slider10,'value'); 219 set(handles.edit10,'string',M); 220 ecart=dr-mean(dr); 221 s=1./(M*rg); 222 polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>
contre-réaction (Backlash) sur l'axe X :	<pre> 454 function slider7_Callback(hObject, eventdata, handles) 455 % hObject handle to slider7 (see GCBO) 456 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 457 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 458 459 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 460 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 461 bx=get(handles.slider7,'value'); 462 set(handles.edit7,'string',bx); 463 by=0; 464 r=10; 465 v=1000; 466 w=v/(60*r); 467 t=2*pi*r*60/v; 468 T=linspace(0,t,360); 469 teta=w*T; 470 x=r*cos(w*T); 471 y=r*sin(w*T); 472 dx7=-bx/2*sign(diff(x)); 473 dx7=[dx7(1) dx7]; 474 dy8=-by/2*sign(diff(y)); 475 dy8=[dy8(1) dy8]; 476 X=x.*(dx7); 477 Y=y.*(dy8); 478 dr=(X+Y)/r; 479 rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 480 M=max(dr)-min(dr); 481 M=get(handles.slider10,'value'); 482 set(handles.edit10,'string',M); 483 ecart=dr-mean(dr); 484 s=1./(M*rg); 485 polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>

<p>contre-réaction (Backlash) sur l'axe Y :</p>	<pre> 500 function slider8_Callback(hObject, eventdata, handles) 501 % hObject handle to slider8 (see GCBO) 502 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 503 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 504 505 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 506 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 507 by=get(handles.slider8,'value'); 508 set(handles.edit8,'string',by); 509 bx=0; 510 r=10; 511 v=1000; 512 w=v/(60*r); 513 t=2*pi*r*60/v; 514 T=linspace(0,t,360); 515 teta=w*T; 516 x=r*cos(w*T); 517 y=r*sin(w*T); 518 dx7=-bx/2*sign(diff(x)); 519 dx7=[dx7(1) dx7]; 520 dy8=-by/2*sign(diff(y)); 521 dy8=[dy8(1) dy8]; 522 X=x.*(dx7); 523 Y=y.*(dy8); 524 dr=(X+Y)/r; 525 rg=1./(1000*(max(dr)-min(dr))); 526 M=max(dr)-min(dr); 527 M=get(handles.slider10,'value'); 528 set(handles.edit10,'string',M); 529 ecart=dr-mean(dr); 530 s=1./(M*rg); 531 polar(teta,s*rg*ecart+1) </pre>
<p>Erreur cyclique suivent X :</p>	<pre> 592 function slider9_Callback(hObject, eventdata, handles) 593 % hObject handle to slider9 (see GCBO) 594 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB 595 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA) 596 597 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider 598 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider 599 k9=get(handles.slider9,'value'); 600 set(handles.edit9,'string',k9); 601 R=10; 602 teta=linspace(0,359,360)*pi/180; 603 x=R*cos(teta); 604 y=R*sin(teta); 605 dy=y*0; 606 dr=[]; 607 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 608 for i=1:360 609 dx=[(k9*sin((2*pi*6*R/x(i))-0.008)]; 610 Dr=(x(i).*dx+y(i).*dy(i))/R; 611 dr=[dr;Dr]; 612 end 613 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 614 rg=1/(1000*(max(dr)-min(dr))); 615 M=max(dr)-min(dr); 616 M=get(handles.slider10,'value'); 617 set(handles.edit10,'string',M); 618 ecarts=dr-mean(dr); 619 S=1./(M*rg); 620 polar(teta',(S*rg*ecarts+1)) </pre>

Erreur
Cyclique
suivent Y :

```

786 function slider11_Callback(hObject, eventdata, handles)
787 % hObject handle to slider11 (see GCBO)
788 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
789 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
790
791 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
792 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider
793 k11=get(handles.slider11,'value');
794 set(handles.edit11,'string',k11);
795 R=10;
796 teta=linspace(0,359,360)*pi/180;
797 x=R*cos(teta);
798 y=R*sin(teta);
799 y=-y;
800 dx=x*0;
801 dr=[];
802 for i=1:360
803 dy=[(k11*cos((2*pi*i/360))-0.008)];
804 Dr=(x(i).*dx(i)+y(i).*dy(i))/R;
805 dr=[dr;Dr];
806 end
807 dr=[dr(2);dr(2:length(dr))];
808 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
809 rg=1/(1000*(max(dr)-min(dr)));
810 M=max(dr)-min(dr);
811 M=get(handles.slider10,'value');
812 set(handles.edit10,'string',M);
813 ecarts=dr-mean(dr);
814 S=1/(M*rg);
815 polar(teta',(S*rg*ecarts+1))

```

Erreur de
Servo-gain :

```

277 function slider6_Callback(hObject, eventdata, handles)
278 % hObject handle to slider6 (see GCBO)
279 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
280 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
281
282 % Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
283 % get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider
284 teta=linspace(-pi,pi,300);
285 f=get(handles.slider6,'value');
286 set(handles.edit6,'string',f);
287 ksx=10;
288 ksy=8;
289 r=10;
290 x=r*cos(teta);
291 y=r*sin(teta);
292 vx=-f*sin(teta);
293 vy=f*cos(teta);
294 dx6=-vx/ksx;
295 dy6=-vy/ksy;
296 X=x.*(dx6);
297 Y=y.*(dy6);
298 dr=(X+Y)/r;
299 polar(teta,dr+1)

```


CHAPITRE 04

Réalisation et validation du simulateur

5/Réalisation et validation du simulateur

Dans ce chapitre, notre simulateur (Fig. 22) sera utilisé pour confronter le simulateur commercial développé par l'entreprise Renishaw (Fig. 23) le leader mondial dans les domaines de la métrologie. Cette comparaison va nous permettre de valider notre simulateur et quantifier le taux de réussite.

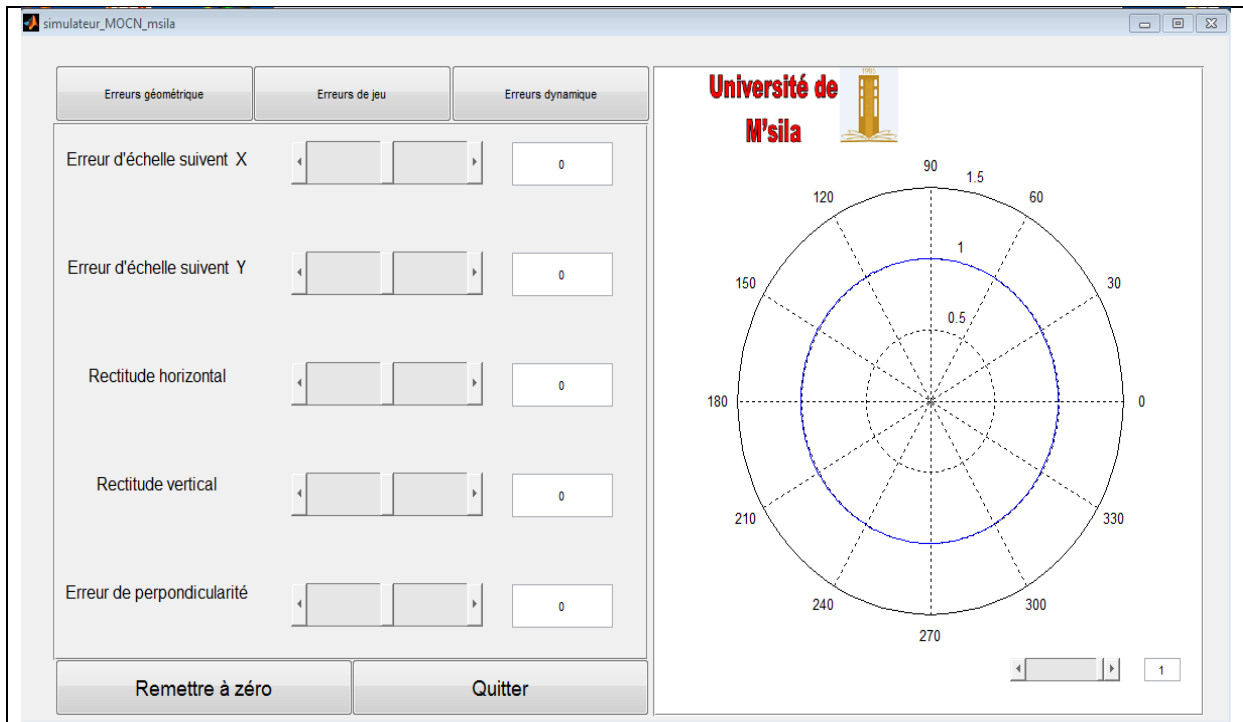


Figure 22. Notre simulateur

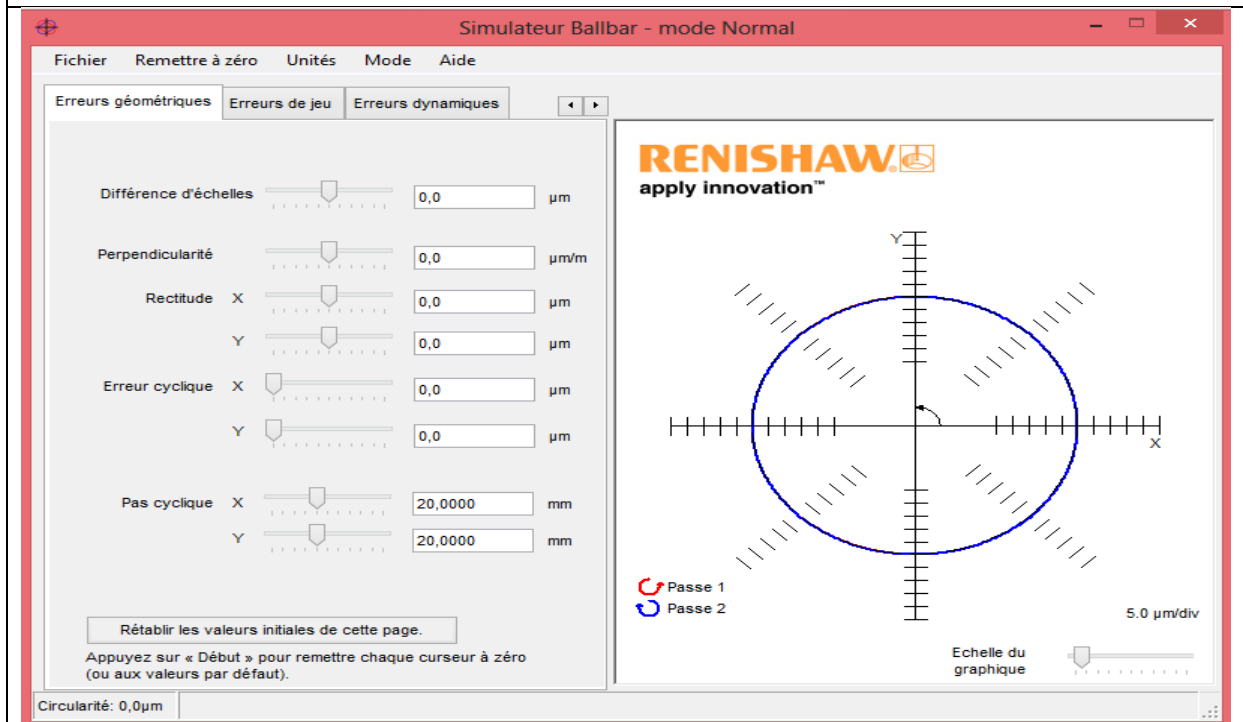


Figure 23. Simulateur Renishaw

Dans ce qui suit, nous présentons une comparaison entre les deux simulateurs pour chaque erreur de la machine-outil. Une similitude très forte entre les deux résultats de simulation a été observée.

1/Erreur d'échelle :

L'erreur d'échelle est la différence entre les déplacements des axes mesurés au cours du test. Par exemple, si la machine décrit un cercle dans le plan XY, les axes X et Y doivent se déplacer exactement sur la même distance. Dans le cas contraire, la différence entre leurs déplacements est l'erreur de correspondance d'échelle.

Il y a plusieurs causes possibles :

- Si des paramètres de compensation d'erreur linéaire sont utilisés, ils sont peut-être incorrectement définis.
- La tension de la règle de mesure de l'axe peut être excessive ou insuffisante.
- Il est possible que la vis à billes de l'axe soit défectueux ou qu'elle surchauffe, ce qui lui donne une erreur de pas.

La machine peut être sujette à une erreur angulaire faisant sortir l'axe X ou Y du plan du test quand il se déplace. Ceci est dû à un défaut de rectitude ou de rigidité des guides de l'axe.

Donc le tracé à une forme ovale ou en arachide, déformée sur la diagonale de 0° ou de 90°. L'axe de la déformation n'est pas affecté par le sens horaire ou anti-horaire ni par la vitesse d'avance de la machine.

L'erreur d'échelle entraîne des erreurs dimensionnelles dans les pièces usinées c'est pour ça il faut vérifier sur la machine-outil si :

- les valeurs de compensation d'erreur linéaire utilisées sont correctement réglées.
- la vis à billes est en bon état et ne surchauffe pas.
- les guides de la machine sont droits et en bon état.
- Les règles de mesure des axes sont correctement tendues.

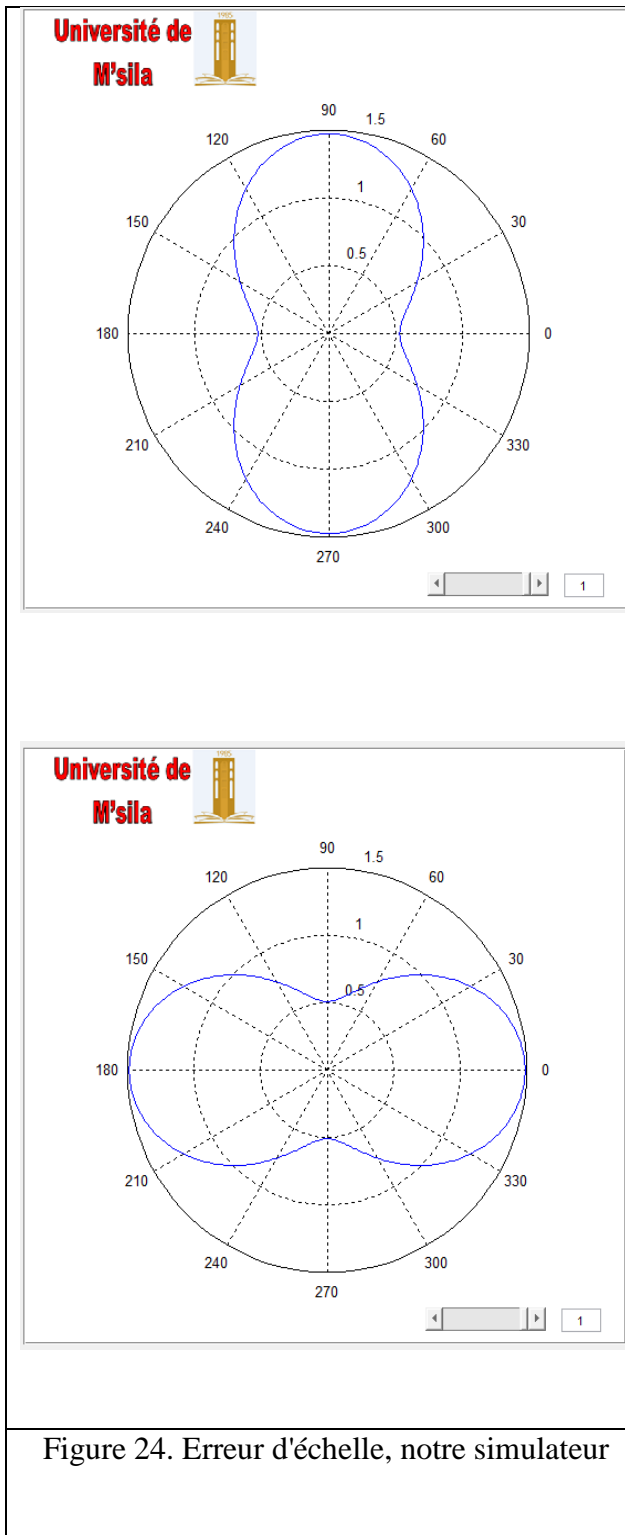


Figure 24. Erreur d'échelle, notre simulateur

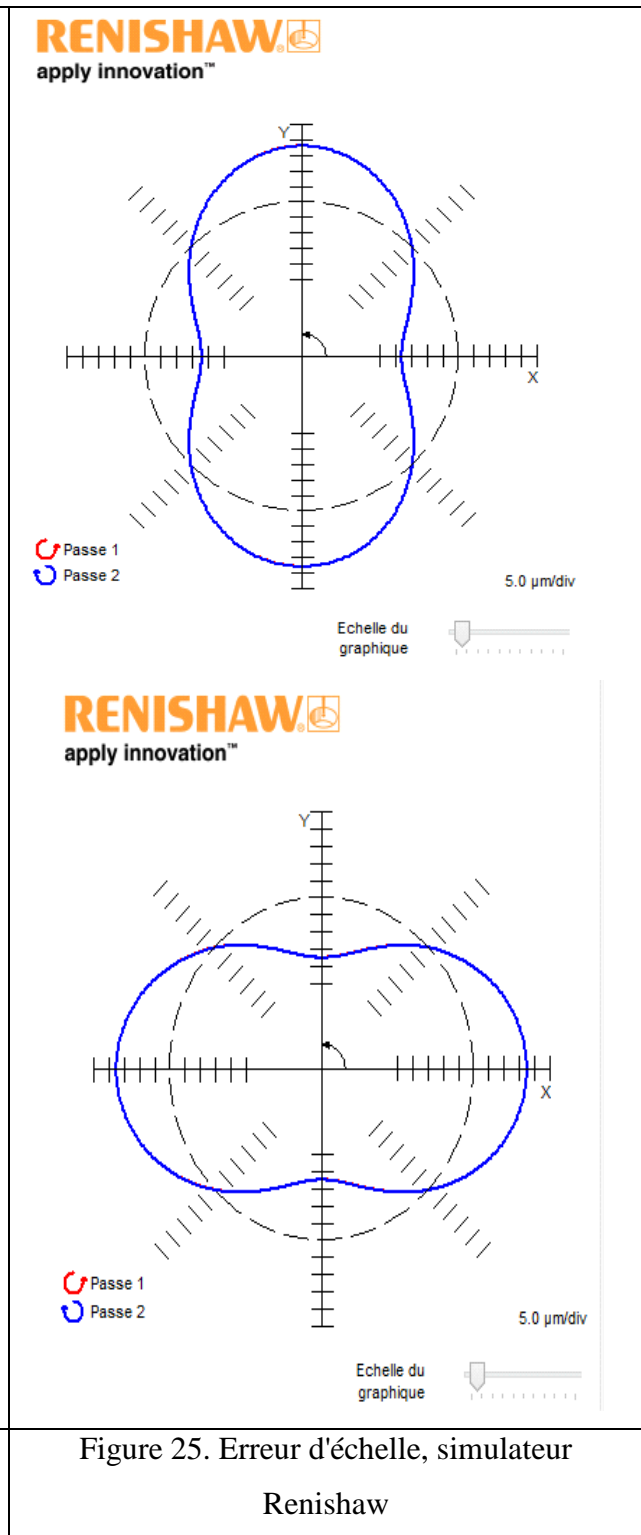


Figure 25. Erreur d'échelle, simulateur Renishaw

2/Erreur de perpendicularité :

Quand les axes XY, XZ ou YZ de la machine ne sont pas perpendiculaires entre eux à la position d'exécution du test sur la machine ça entraîne une erreur de perpendicularité. Les axes peuvent être courbés localement ou présente un désalignement général dans la machine.

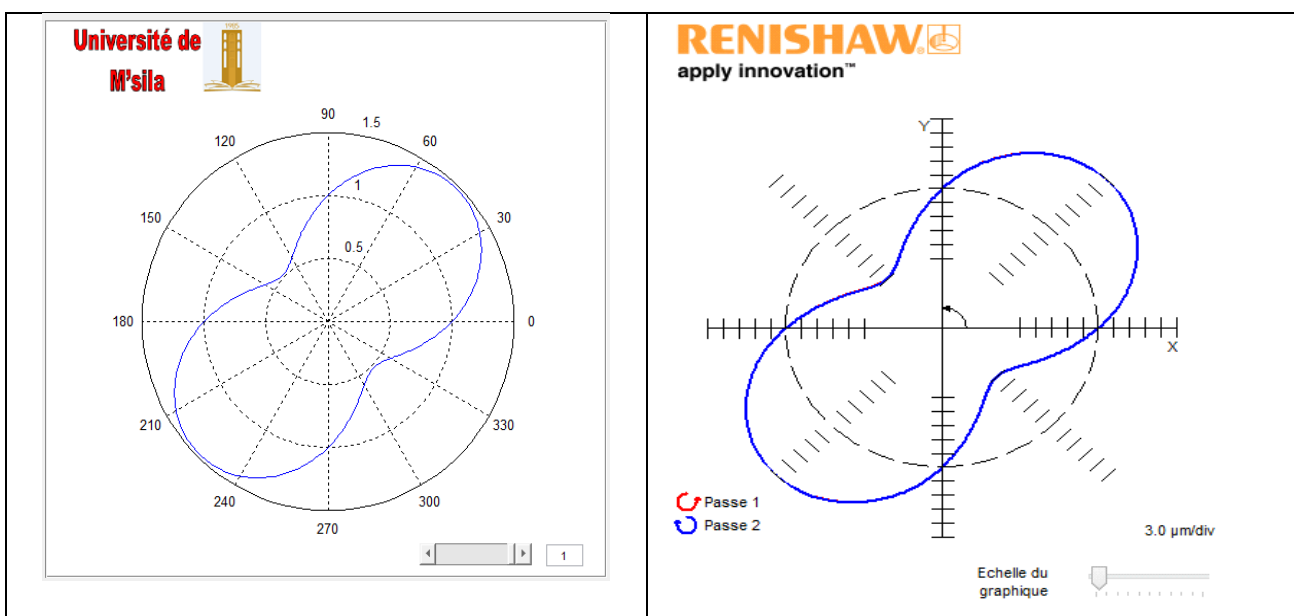
Il est possible qu'un affaissement des axes de la machine ait entraîné un défaut d'alignement en certains endroits.

Il est possible qu'un affaissement des axes de la machine ait entraîné un défaut d'alignement en certains endroits. Les guides de la machine peuvent avoir une usure excessive ce qui produit un peu de jeu dans les axes lorsqu'ils se déplacent.

Le tracé obtenu a donc une forme ovale ou en arachide, déformée sur la diagonale de 45° ou de 135°. L'axe de la déformation est identique dans les sens horaire et anti-horaire. L'ampleur de la déformation n'est pas affectée par la vitesse d'avance.

A cause de l'erreur de perpendicularité les faces usinées par la machine ne seront pas d'équerre.

Durant l'usinage et lorsque l'erreur est localisée il est conseillé d'utiliser une zone où la machine n'est pas affectée par l'erreur de perpendicularité. Mais si l'ensemble de la machine est affecté par cette erreur, refaites l'alignement des axes de la machine si c'est possible ou appliquer des techniques de compensation. Si les guides sont usés, il faudra peut-être les remplacer.



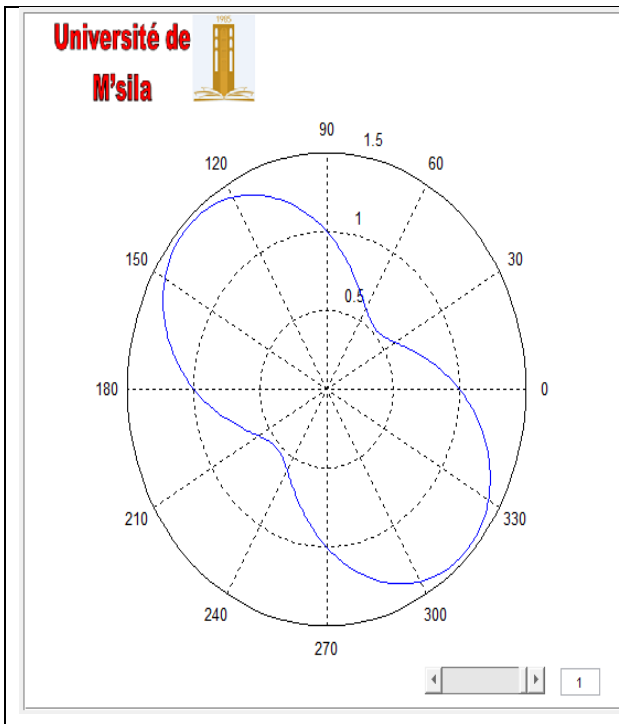


Figure 26. Erreur de perpendicularité, notre simulateur

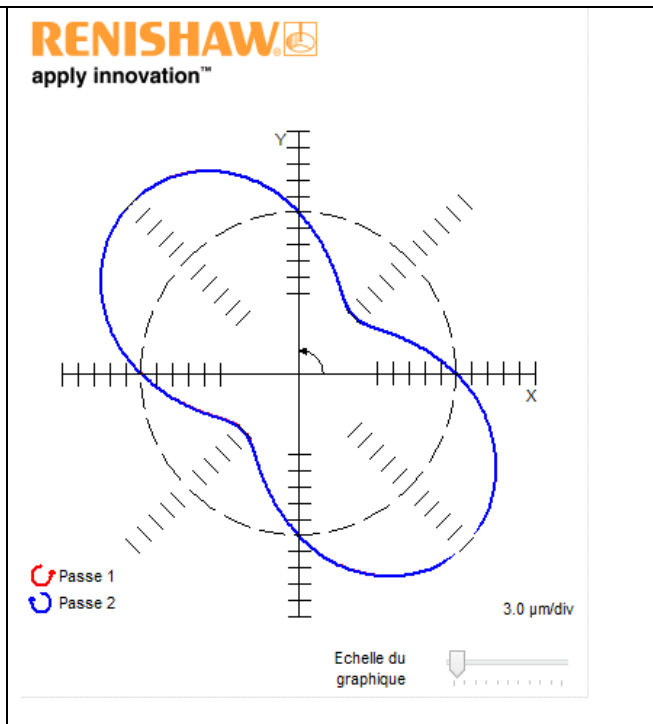


Figure 27. Erreur de perpendicularité, simulateur Renishaw

3/Erreur de rectitude :

Une erreur de rectitude est généralement causée par un défaut de rectitude dans les guides de la machine. Les guides de la machine peuvent être courbés localement ou présenter une perte générale d'alignement.

Ceci peut résulter de l'usure des guides, d'un accident ayant endommagé les guides ou leur ayant fait perdre l'alignement, ou bien encore de mauvaises fondations sous la machine pouvant entraîner un effet de courbure dans la machine toute entière.

La forme du tracé présente 3 lobes distincts. Ces lobes ne sont pas affectés par la vitesse d'avance ni par la direction du mouvement mais ils varient selon l'emplacement du test sur le banc de la machine. Ce tracé montre l'effet d'une erreur de "deuxième ordre" sur l'axe X.

Cette erreur de rectitude nuira à la précision de toutes les pièces usinées. Il faut donc :

-Vérifiez l'usure ou la propreté de la coupelle Outil et contrôlez le serrage des joints Ballbar.

- Si vous en trouvez, il est probable que la machine n'ait pas une erreur de rectitude mais qu'il s'agisse plutôt d'une erreur de type **Tri-lobe**.

- Si c'est le cas, prenez les mesures nécessaires décrites à la rubrique tri-lobé et refaites le test Ballbar.
- Si le test donne encore un tracé de type Rectitude, la machine présente une véritable erreur de rectitude.
- Si une erreur de test de type Tri-lobé a été éliminée comme étant la cause du tracé, réglez, réparez ou remplacez les guides de la machine selon besoin.

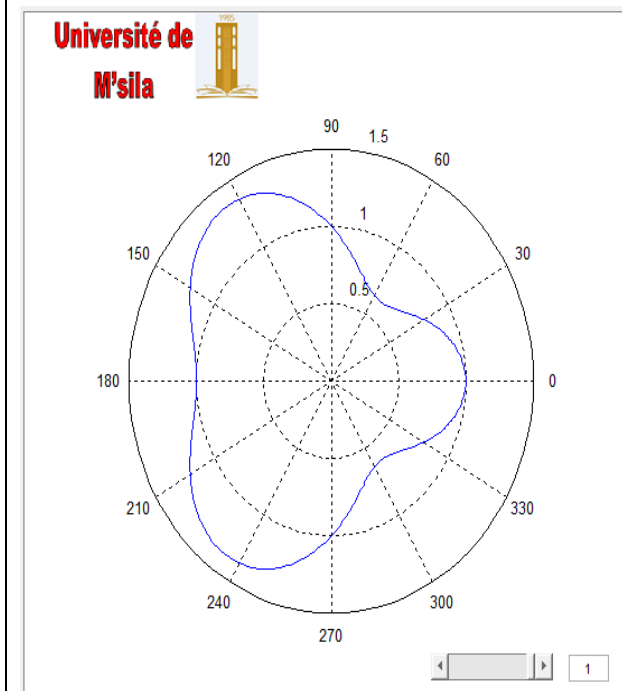
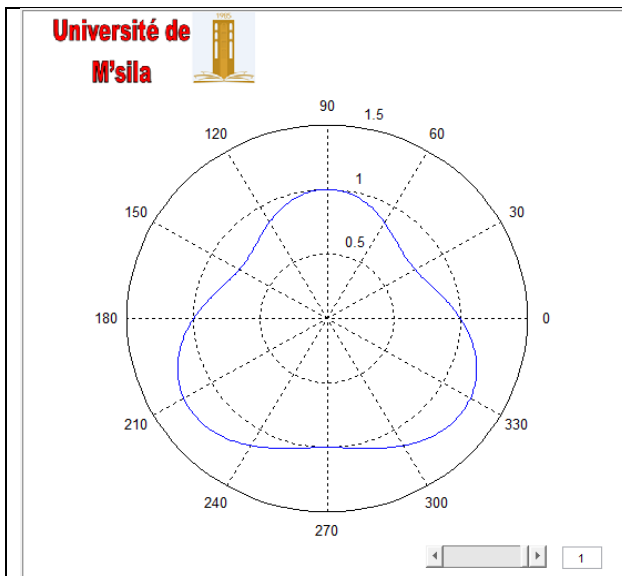


Figure 28.Erreur de rectitude, notre simulateur

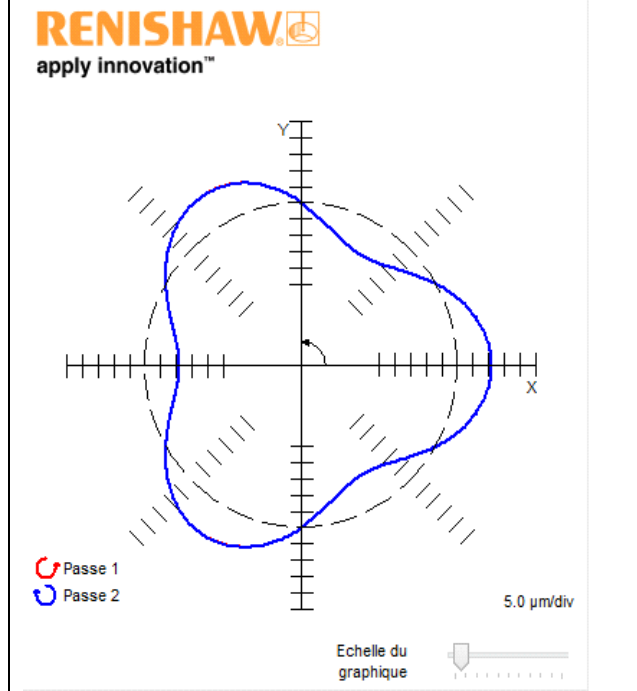
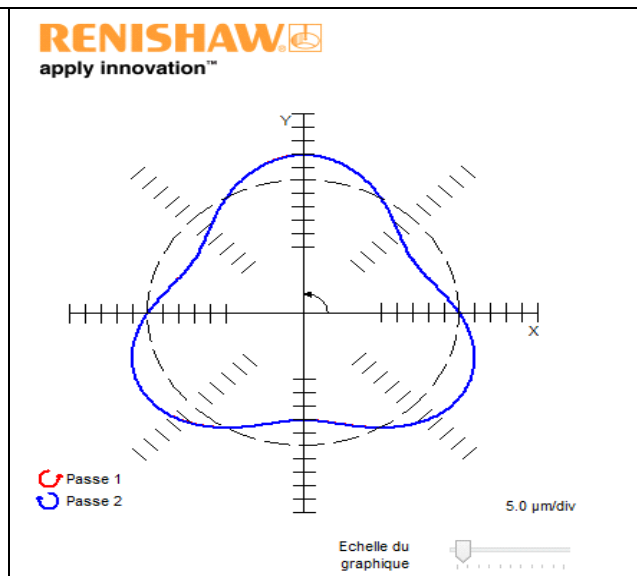


Figure 29.Erreur de rectitude, simulateur Renishaw

4/Jeu d'inversion Suivant x ou y :

Il Ya deux types (positive et négative) :

4-1/Jeu à l'inversion positive:

Il y a plusieurs des causes qui sont fait un jeu à l'inversion positive :

Peut-être du jeu dans le système de servomécanismes de la machine. Ce jeu est généralement causé par le jeu axial de la vis à billes ou par l'usure de l'écrou d'entraînement.

Il peut y avoir du jeu dans les guides de la machine, ce qui provoque une pause dans le déplacement lors du changement de sens d'entraînement de la machine.

Il peut y avoir une tension en rotation de la vis à Sur billes, causée par une contrainte excessive exercée sur elle.

Donc Le tracé présente un ou plusieurs décrochements dirigés vers l'extérieur et commençant sur un axe. La taille d'un décrochement est habituellement insensible à la vitesse d'avance de la machine. Dans ce tracé, le jeu à l'inversion positif est représenté sur l'axe Y seulement.

Une machine présentant un jeu à l'inversion positive, une trajectoire circulaire interpolée de l'outil présentera un court aplatissement. C'est pour ça il faut supprimer tout jeu dans le système d'entraînement et dans les guides de la machine. Ceci peut nécessiter le remplacement d'organes usés de la machine. Vous pouvez également utiliser la compensation de jeu à l'inversion du contrôleur pour la compenser sur la machine.

4-2/Jeu à l'inversion négative:

Une machine présentant un jeu à l'inversion négatif, une trajectoire circulaire interpolée de l'outil présentera un décrochement vers l'intérieur.

Le tracé présente un décrochement qui est dirigé vers le centre du tracé et qui commence sur un axe. L'importance d'un décrochement de jeu à l'inversion négatif est habituellement insensible à la vitesse d'avance de la machine. Sur ce tracé, le jeu à l'inversion négatif est représenté sur l'axe Y seulement.

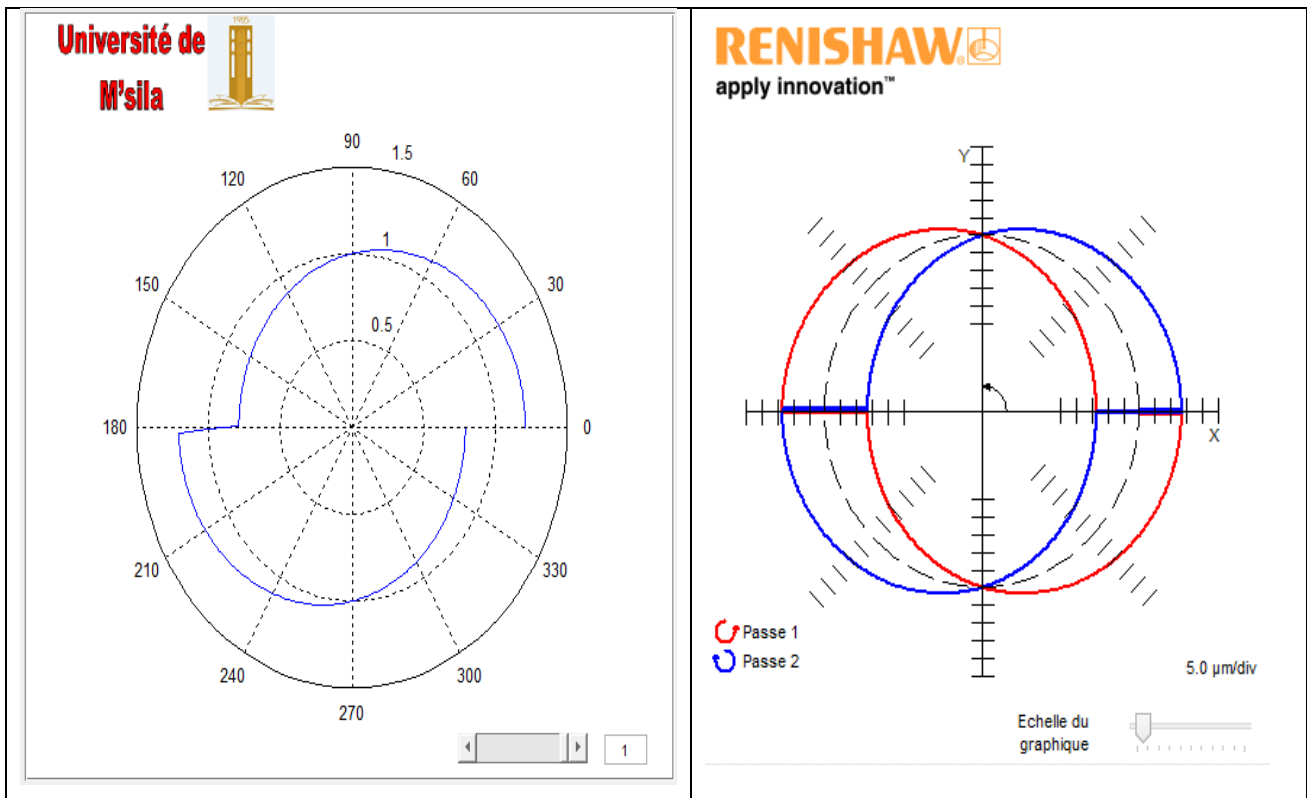
Il peut y avoir du jeu dans les guides de la machine, ce qui provoque un à-coup dans le déplacement lors du changement de sens d'entraînement de la machine.

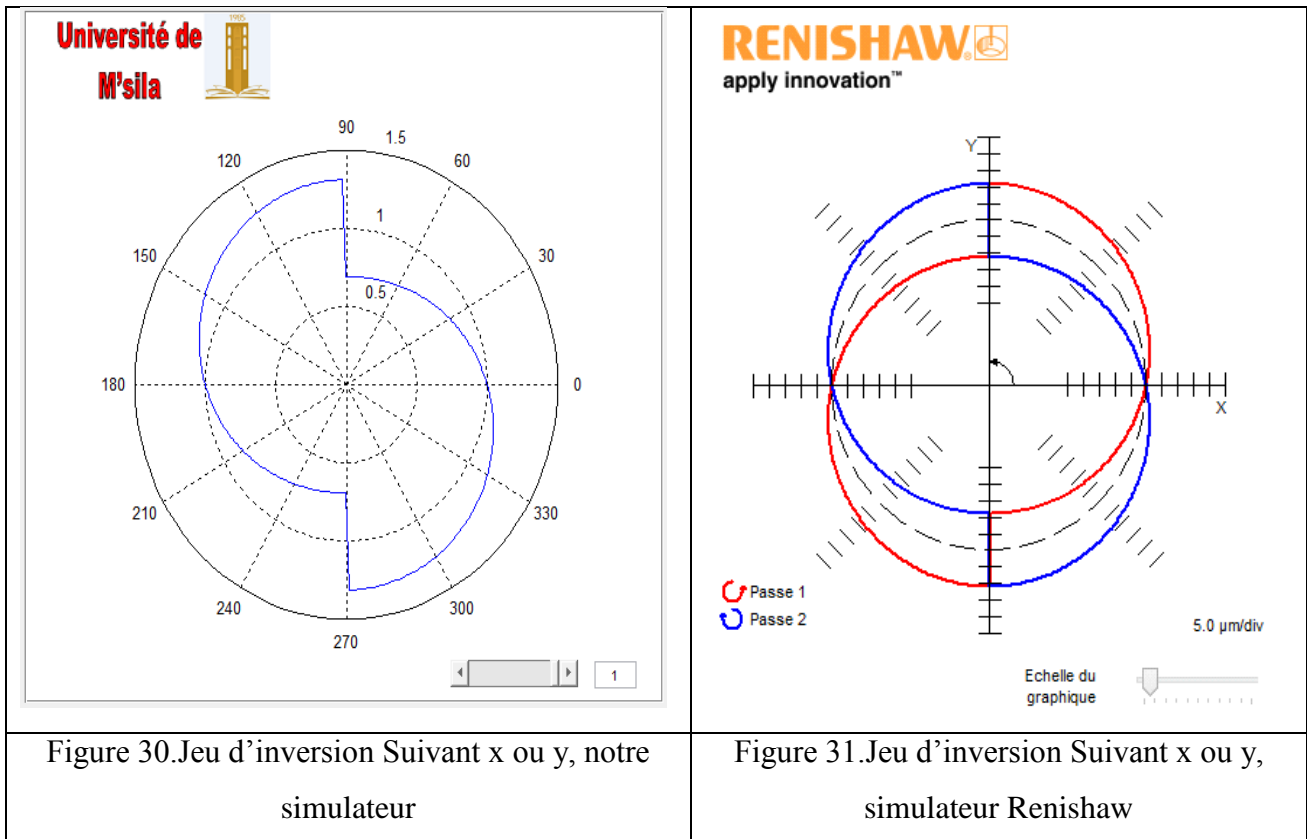
La compensation de jeu à l'inversion appliquée à la machine pour corriger un problème existant de ce type sur la machine est trop élevée. Ainsi, une machine qui présentait auparavant un problème de jeu à l'inversion positive présente maintenant un jeu à l'inversion négative. La machine peut être affectée par l'hystérésis du codeur.

Pour éviter le jeu d'inversion il faut vérifiez que les paramètres de compensation de jeu à l'inversion du contrôleur sont correctement réglés.

Vérifiez que la machine n'est pas affectée par l'hystérésis du codeur.

Supprimez le jeu dans les guides de la machine. Ceci peut nécessiter le remplacement d'organes usés de la machine.





5/Erreur cyclique

La présence d'une erreur cyclique dans une machine-outil entraîne des erreurs dimensionnelles dans les pièces usinées. Dans un test circulaire de barre à billes, le tracé présente une erreur sinusoïdale cyclique qui varie en fréquence et en amplitude autour du tracé. La cause de cette erreur est liée généralement à la vis à billes.

Si une vis à billes d'un axe de la machine-outil présente une erreur cyclique, il y a plusieurs causes possibles :

- Le filetage de la vis à billes est désaxé, ce qui fait déplacer l'axe de manière sinusoïdale, et non de façon uniforme.
- Les supports du codeur sont peut-être excentrés.
- Les supports de la vis à billes sont peut-être excentrés.
- Les résolveurs sont mal réglés.

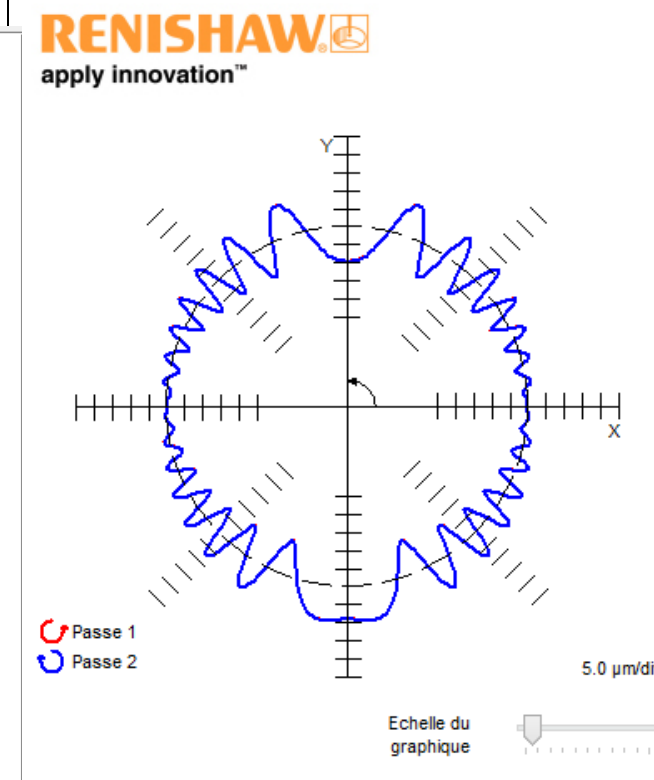
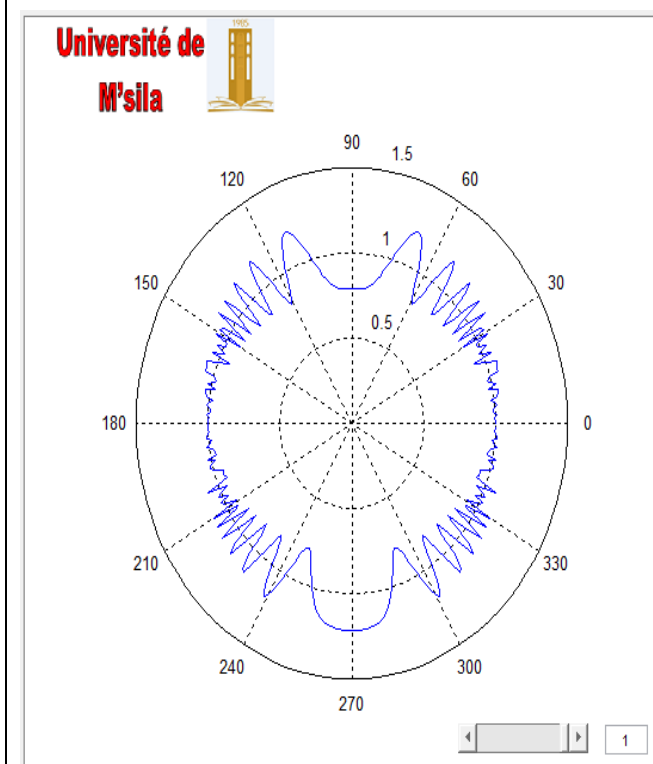
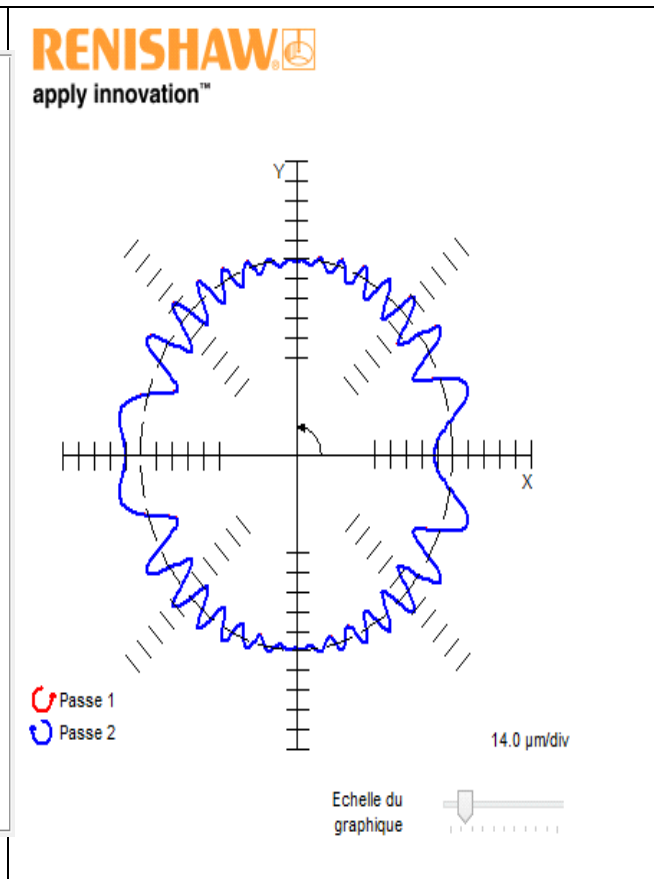
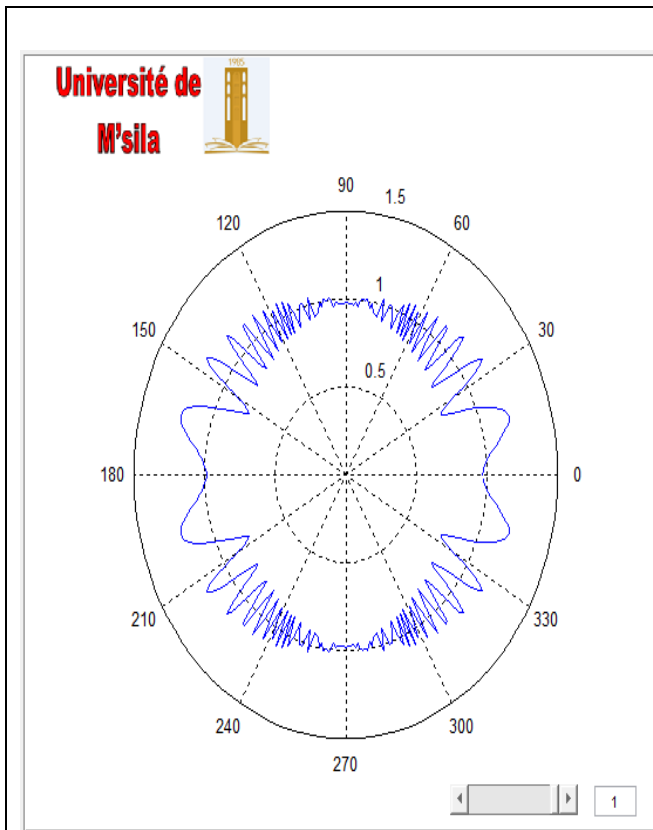


Figure 32.Erreur cyclique suivant x et y, notre simulateur

Figure 33.Erreur cyclique x et y, simulateur Renishaw

Si c'est la vis à billes qui est en cause, le tracé n'est pas affecté par le sens. Les tracés dans les sens horaire et anti-horaire paraîtront similaires, sinon identiques.

Si l'erreur cyclique se produit sur un axe vertical dans une seule direction lorsque l'axe se déplace vers le haut ou le bas, le mécanisme d'équilibrage de la machine est probablement fautif.

Si la cause est un mauvais équilibrage, le tracé est affecté par la direction, si bien que les tracés dans les sens horaire et anti-horaire sont différents. En général, l'équilibrage entraîne une erreur cyclique quand la machine se déplace verticalement vers le haut.

Si vous soupçonnez la vis à billes d'être à l'origine de l'erreur cyclique, réglez les supports de la vis à billes ou du codeur pour éliminer l'erreur cyclique.

Si vous soupçonnez le mécanisme d'équilibrage de la machine d'être à l'origine de l'erreur cyclique, réglez les supports du mécanisme d'équilibrage pour éliminer l'erreur cyclique.

6/Erreur d'asservissement :

Quand les gains de boucle d'asservissement des axes ne correspondent pas, l'un des axes est alors en avance sur l'autre, ce qui produit un tracé de forme ovale. L'axe en avance est celui qui a le gain de boucle d'asservissement le plus élevé.

Le tracé à une forme ovale ou en arachide, déformée sur la diagonale de 45° ou de 135° . L'axe sur lequel le tracé est déformé change si l'avance passe du sens horaire au sens anti-horaire. L'importance de la déformation augmente en même temps que la vitesse d'avance. Généralement, plus la vitesse d'avance est élevée, plus le cercle interpolé est ovale.

Ça nécessite un ajustement des gains de boucle d'asservissements des axes au niveau du contrôleur. Il faut soit augmenter le gain de l'axe qui est en retard, soit diminuer le gain de l'axe qui est en avance.

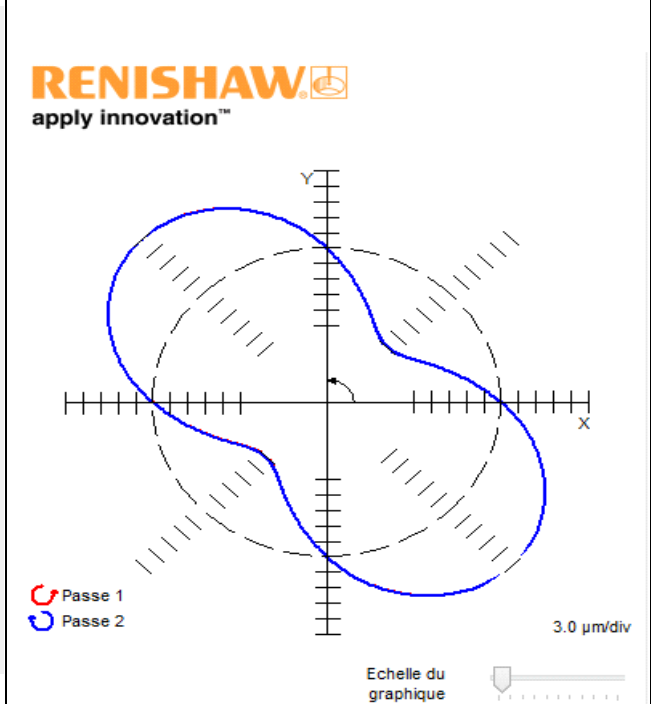
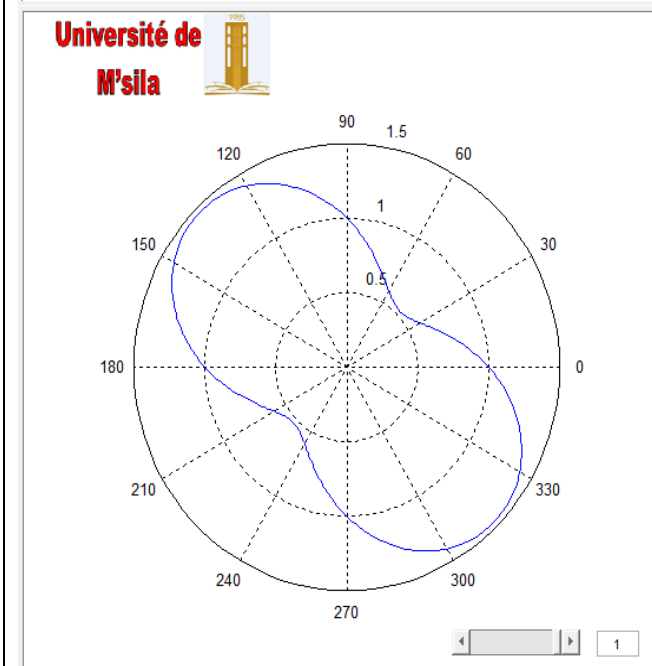
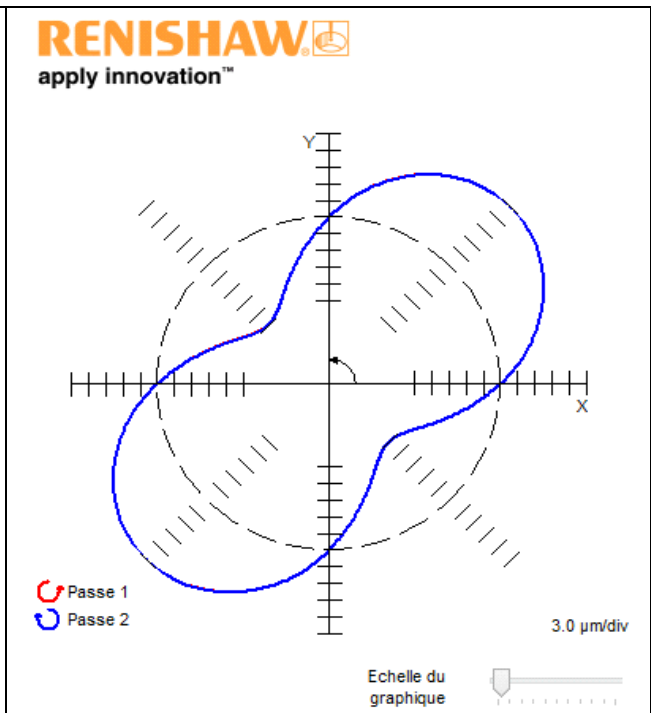
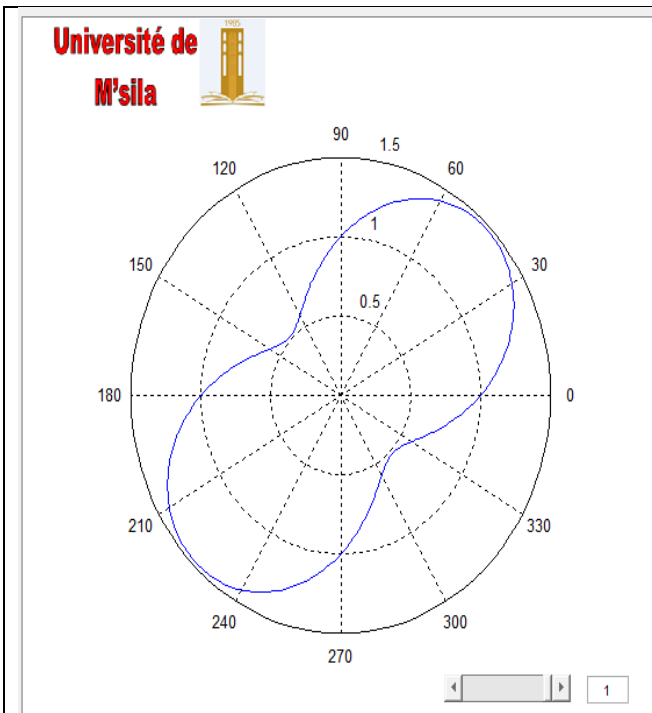


Figure 34.Erreur de Servo-gain, notre simulateur

Figure 35.Erreur de Servo-gain, simulateur Renishaw

CONCLUSION

Conclusion

Les machines-outils sont des moyens de production très utile dans le domaine industriel, elles sont utilisé généralement dans l'usinage des pièces avec des surfaces simple ou complexes. Cependant, des effets indésirables dus à l'imperfection de construction et de système de commande de la machine-outil peuvent affecter la qualité des pièces usinées.

Dans ce travail, les catégories des erreurs des MOCN et leur modélisation ont été étudiées en détails afin de faciliter le développement d'un simulateur pour simuler la trajectoire d'outil durant un mouvement circulaire.

Les sources d'erreurs prises en comptes dans ce simulateur sont les erreurs géométriques et dynamiques. Les erreurs géométriques d'une machine-outil sont dues en partie à l'erreur de forme des éléments mécaniques qui sont liés cinématiquement, ainsi que le désalignement de ces éléments. Deux familles de paramètres d'erreurs géométriques ont été identifiées :

- paramètres d'erreurs géométriques dépendant de la position (écarts cinématiques articulaires);
- paramètres d'erreurs géométriques indépendants de la position et donc qui ne varient pas pendant le mouvement de la machine (ex. : perpendicularité).

Parce que les écarts cinématiques articulaires des machines-outils sont dépendants de la position, des polynômes ont été utilisés dans ce travail pour les représenter et modéliser.

Les erreurs dynamiques en régime permanent dues à l'incompatibilité des gains de système servo sont définit ici comme l'erreur entre la position réelle et la position commandée d'un axe. La modélisation de cette erreur fait appel à la théorie du contrôle.

Par la suite, ces modèles ont été intégrés à un simulateur pour prédire les erreurs sur le trajet d'outil.

RÉFÉRENCE

-
- [1] M.A. Donmez, A general methodology for machine tool accuracy enhancement: theory, application and implementation, PhD dissertation, Purdue University, 1985.
- [2] J. Ni, CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation, ASME Trans Journal of Manufacturing Science and Engineering 119 (1997) 717–724.
- [3] A.H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice Hall, 1992.
- [4] Analysis and modeling of angular errors in precision sliding motion with application to machine tools. Cecil M Daniel. 1998.
- [5] Hocken, R. J., Automated Production Technology, Annals of CIRP, 1990.
- [6] R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo, "Error compensation in machine tools - a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, pp. 1235-1256, 2000.
- [7] T.O. Ekinici, J.R.R. Mayer, Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issues 12-13, pp. 1997-2004, 2007.
- [8] S.H.H. Zargarbashi, J.R.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, Vol. 49, Issue 10, pp. 759-766, 2009.
- [9] métrologie des machines-outils cinq axes par barre-a-billes et par fermeture de chaîne cinématique. © seyedhossein hajzargarbashi, 2008.
- [10] A. C. Okafor and Y. M. Ertekin, "Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 1. Linear positional errors," Journal of Materials Processing Technology, vol. 105, pp. 394-406, 2000.
- [11] S. H. H. Zargarbashi and J. R. R. Mayer, "Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, pp. 1823-1834, 2006.
- [12] Y. Lin, Y. Shen, Modeling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, No. 4, 2002, pp. 1153-1162
- [13] Slocum, A.H., Precision machine design, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
- [14] Développement d'un système de mesure en temps réel des erreurs dans les machines-outils à axes multiples pour une compensation active. Nouredine Barka. Janvier 2005

-
- [15] Error compensation in machine tools à review. R. Ramesh, M.A. Mannan A.N. Poo. Received 7 July 1999; received in revised form 22 December 1999; accepted 14 January 2000.
- [16] Y. Abbaszadeh-Mir, J.R.R. Mayer, G. Clottier et C. Fortin, Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, Issue 18, pp. 4781-4797, 2002.
- [17] S.H.H. Zargarbashi, J.R.R. Mayer, Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, Issue 14, pp. 1823-1834, 2006.
- [18] G.P. Zhang, Y.M. Huang, W.H. Shi, W.P. Fu, Predicting dynamic behaviors of a whole machine tool structure based on computer-aided engineering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, Issue 7, pp. 699-706, 2003.
- [19] Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, S. Witt, Virtual Machine Tool, *CIRP annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54, Issue 2, pp. 115-138, 2005.
- [20] M. Zaeh, D. Sied, A New Method for Simulation of Machining Performance by Integrating Finite Element and Multi-body Simulation for Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, Issue 1, pp. 383-386, 2007.
- [21] M.F. Zaeh, Th. Oertli, J. Milberg, Finite Element Modeling of Ball Screw Feed Drive Systems, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, Issue 1, pp. 289-292, 2004.
- [22] A. Dugas, Simulation d'usinages de formes complexes, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, Université de Nantes, 2002.
- [23] M. Susanu, Commande prédictive hiérarchisée pour le positionnement des axes de machine-outil à architecture ouverte, Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay, 2005.
- [24] D. Prévost, Modélisation d'axe de machine-outil pour la simulation du suivi de trajectoires, Mémoire de Master, École Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [25] R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo, Tracking and contour error control in CNC servo systems, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 301-326, 2005.
- [26] P.-J. Barre, E. Dumetz, Modélisation du comportement dynamique et commande d'une machine-outil agile, *Mécanique & Industries*, Vol. 3, 2002.
- [27] G. Remy, J. Gomand, P.J. Barre, J.P. Hautier, New Current Control Loop with Resonant Controllers by using the Causal Ordering Graph, *Application to Machine Tools*, *WSEAS Transactions on SYSTEMS*, Issue 1, Vol. 5, pp. 233-239, 2006.

- [28] H. Groß, J. Hamann, G. Wiegärtner, *Electrical Feed Drives in Automation: Basics, Computation, Dimensioning*, ISBN: 3895781487, SIEMENS©, 2001.
- [29] C.-H. Yeung, Y. Altintas, K. Erkorkmaz, *Virtual CNC system – Part I. System architecture*, International
- [30] hascoet.j.Y ;Dugas.A ;and Lee.j.j.(2000).high speed milling-simulation considering machine and controller's limits CD-ROM.proc.of
- [31] Ehmann.K.F ;kapoor,S.G ;Devor.R.E ;Lazoglu.L.(1997).Machining process modeling :a review.journal of MFG science and engg (v 119).pp655-663.
- [32] Smith .S.and Tlusty.j.(1991).an overview of modeling simulation of the milling process ''journal of Engg for industry(v 113) .pp169-175.
- [33] Imani.B.M.and Elbestawi.M.A.(1996).model based feed scheduling in die semi finishing operation .proc of 13 th symp.on Engg.application of mechanics(Mfg. science and Egg).May 1996.Hamilton.ontario.canada.
- [34] Mounayri.H.Spence.A.d.and Elbestawi.M.A(1998).milling process simulation à generic solid modeler based paradigm. Journal of Mfg. science and Engg.(v120).pp213-221.
- [35] Dugas.A.Lee. jjand Hascoet.J.y(2001).feed rate and tracking errors simulation in high speed milling .ESA.FORM Conf. april 2001.Belgium.pp667-670 Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, Issue 10, pp. 1107-1123, 2006.
- [36] Ramesh R, mannam M.S.poo AN,2000 (error compensation in machine tools-a review part1 :geometric ,cutting force induced and fixture-dependent errors) international journal of machine tools and manufacture,vol.40,pp.1235-1256.
- [37] Méthodes de suivi l'état des machines –outils par barre à billes. Mr. Dougha Oussama. année universitaire : 2014 / 2015
- [38] S. H. Yang, K. H. Kim, Y. K. Park, and S. G. Lee, "Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, pp. 495-500, 2004.
- [39] Mahbubur Rahman. modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy Linnanmaa, on June 4th, 2004, at 12 noon.
- [40] Modeling and measurement of geometric error of machine tools Methodology and implementation. Theodoros Laspas Master Thesis. Stockholm, Sweden 2014.
- [41] Bryan, J. A., A simple method for testing measuring machines and machine tools. *Precision Engineering*, 1982, 4(2), 61-69.

- [42] Knapp, W., Test of three dimensional uncertainties of machine tools and measuring machines and its relation to machine errors. *Annals of the CIRP*, 1983, 32(1), 459-464.
- [43] Kunzmann, H., on testing coordinate measuring machines with kinematic reference standards. *Annals of the CIRP*, 1983, 32(1), 465-468.
- [44] Kakino, Y., The measurement of motion errors of NC machine tools and diagnosis of their origins by using telescoping magnetic ball bar method. *Annals of the CIRP*, 1987, 36(1), 377-380.
- [45] Burdekin, M. and Park, J., A computer aided system for assessing the contouring accuracy of NC machine tools. *Proc. 28th MATADOR Conf.*, Manchester, 1988.
- [46] a new technique for volumetric error assessment of cnc machine tools incorporating ball bar measurement and 3d volumetric error model heui jae pahk, young sam kimt and joon hee moon'i" (received 9 September 1996; in final form 13 march 1997)
- [47] V. S. B. Kiridena and P. M. Ferreira, "Kinematic modeling of quasi static errors of three-axis machining centers, «*International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 34, pp. 85-100, 1994.
- [48] Y. Abbaszadeh-Mir, J. R. R. Mayer, and C. Fortin, "Methodology and simulation of the calibration of a five-axis machine tool link geometry and motion errors using polynomial modeling and a telescoping magnetic ball-bar," Southampton, United Kingdom, 2003, pp. 527-543.
- [49] H. J. Pahk, Y. S. Kim, and J. H. Moon, "New technique for volumetric error assessment of CNC machine tools incorporating ball bar measurement and 3D volumetric error model, «*International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 37, pp. 1583-1596, 1997.
- [50] Y. Abbaszadeh-Mir, "Étalonnage géométrique des machines-outils par barre à billes en vue de prédire leur performance," PhDThesis Ecole Polytechnique de Montréal (Canada), 2002.
- [51] M. Slamani., R. Mayer., G. M Cloutier, « Modeling and experimental validation of machine tool motion errors using degree optimized polynomial including motion hysteresis », *Experimental Techniques Journal*, January, 35(1) (2011) 37-44, Publisher : Wiley.
- [52] modélisation des erreurs machines selon le principe de causalité. tevfik onat ekinci département de génie mécanique école polytechnique de Montréal. juin 2009.
- [53] koren, y., computer control of manufacturing systems. mcgraw-hill, new york, 1983.
- [54] <http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0405/optmfn/mci/reports/2004/b/vpwm/Interfgraphique/interface.htm>

- [55] Introduction Matlab - Compléments GUI Création d'une interface graphique
- [56] <http://briot-jerome.developpez.com/matlab/tutoriels/developpement-efficace-interfaces-graphiques>.