

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productive

Présenté par :

AZZOUZ Saliha

Thème

Étude de la relation entre les écarts angulaires et les écarts de rectitudes d'un axe prismatique d'une machine-outil à commande numérique.

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Benkharbeche Houria	MCA	Président
Slamani Mohamed	Prof	Encadreur
Zemmamouche Radhouane	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2020

DEDICACE

*À mes parents pour leurs encouragements dans toutes
les étapes de ma vie,*

À mes frères,

REMERCIEMENTS

في البداية الشكر والحمد لله جل في علاه فاليه ينسب الفضل كله في اكمال هذا العمل.

وبعد الحمد لله فايته اتوجه بالشكر والتقدير اولا الى لبروفيسور والمشرف م. سلامي لما قدمه لنا من جهد و

نصح ومعرفة طيبة السنوات الدراسية و في انجاز هذا البحث كما اتقدم بشكري الخالص وامتناني للطالبة

الدكتورة مشطة احلام لمساعدتها لي .

كما اود ان اشكر والداي وجميع اخوتي.

والى جميع المعلمين في قسم الهندسة الميكانيكية جامعة المسيلة.

Résumé

Les erreurs géométriques sont les erreurs trouvées dans l'équipement en raison de sa conception de base et celles résultant d'imprécisions créées lors de l'assemblage et des composants utilisés dans l'équipement. Les erreurs géométriques permanentes et systématiques sont le type le plus courant trouvé dans les machines-outils CNC. En usinage de précision, les erreurs géométriques des machines-outils ont un impact significatif sur la précision géométrique et dimensionnelle de la machine et constituent la partie principale de l'imprécision de la machine-outil.

Le principe d'Abbe et le principe de Bryan sont deux principes directeurs importants dans la conception de machines et la technologie de mesure. Les erreurs volumétriques des machines-outils sont largement affectées par ces deux principes. L'erreur volumétrique en tout point de l'espace d'une machine-outil contient trois composantes, erreur de positionnement linéaire dans la direction de déplacement et deux erreurs de rectitude perpendiculairement à la direction de déplacement. L'erreur de positionnement linéaire peut être dérivée avec le principe d'Abbe et les erreurs de rectitude peuvent être dérivées avec le principe de Bryan.

Ce travail met en évidence l'importance du principe d'Abbe et du principe de Bryan pour la précision volumétrique des machines-outils. Ces deux principes et leur effet sur les écarts cinématiques articulaires sont également abordés dans ce travail.

Ce travail donc propose une nouvelle méthode d'identification des erreurs angulaires telles que le tangage, le lacet et le roulis d'un axe prismatique d'une machine-outil en utilisant un comparateur à cadran. Un modèle mathématique basé sur le principe de Bryan et le principe d'Abbé est développé et un système d'identification matriciel est construit. Le système est résolu par la méthode de moindre carrée. Finalement, les erreurs de tangage, lacet et roulis sont identifiées et les résultats expérimentaux sont présentés.

Après l'identification, les données expérimentales prouvent la validité de cette méthode, offrant ainsi une nouvelle méthode d'analyse de l'erreur de mouvement des paires de guidages.

Les avantages de cette nouvelle méthode par rapport aux mesures optiques résident dans sa simplicité, sa rapidité de mesure et d'identification et son moindre coût. Il est important de noter ici que l'erreur de roulis ne peut pas être mesurée par l'interféromètre laser XL80 mais peut être identifié facilement par la méthode proposée.

Liste des figures

Figure I-1: Ecarts par rapport au mouvement en ligne droite.....	05
Figure I-2: Erreurs cinématiques pour une machine-outil 3 axes.....	06
Figure I-3: Erreurs cinématiques dans l'axe rotatif.....	07
Figure I-4. La configuration optique pour trouver linéaire les erreurs de positionnement.....	12
Figure I-5. Encodeur planaire KGM monté sur une machine-outil.....	13
Figure I-6.Barre à billes.....	14
Figure II.1.Système de coordonnées machine orthogonal main droite.....	16
Figure II.2. Erreurs des mouvements angulaires et linéaires d'un composant commandé pour se déplacer le long d'une trajectoire (nominale) en ligne droite parallèle à l'axe X.....	18
Figure II.3 .Représentation des écarts de rectitude d'axe des X dans les directions Y et Z.....	19
Figure III.1.: (a) Disposition ne respectant pas le principe d'Abbe, (b) Disposition respectant le principe d'Abbe.....	22
Figure III.2.Stage-rails configuration.....	23
Figure III.3. Axe linéaire avec erreur d'Abbé.....	24
Figure III.4. Rectitude mesuré d'une guide linéaire avec l'erreur de Bryan.....	24
Figure.III.5. Guidages parallèles idéaux d'un axe linéaire.....	25
Figure. III.6. Situation des guidages non parallèles.....	25
Figure III.7. Erreurs machine d'un étage linéaire.....	26
Figure.III.8.Erreur de lacet due à des guidages horizontalement non parallèles.....	26
Figure III.9. Erreur de roulis due à des guidages verticalement non parallèles.....	27
Figure III.10. Mesure du parallélisme de deux rails de guidage avec un bloc parallèle standard.....	27
Figure.IV.1. Fraiseuse universelle.....	30
Figure.IV.2.Composants de fraiseuse universelle.....	30
Figure.IV.3. Comparateur digital.....	31
Figure.IV.4. Installation du comparateur digital sur la machine.....	32

FigureV.1: Erreur de rectitude suivant l'axe X dans la position -100mm.....	34
Figure V. 2. Erreur rectitude suivant l'axe X dans la position -40mm.....	35
Figure V.3. Erreur rectitude suivant l'axe X dans la position 100mm.....	35
Figure V.4 : Erreur de rectitude suivant l'axe Y dans la position -15mm.....	36
Figure V.5. Erreur rectitude suivant l'axe Y dans la position -10mm.....	36
Figure V.6. Erreur rectitude suivant l'axe Y dans la position 10mm.....	37
Figure V.7. Erreur de rectitude verticale estimée suivant l'axe X (E_{ZX}).....	38
Figure V.8. Erreur de lacet estimée suivant l'axe X (E_{BX}).....	38
Figure V.9. Erreur de roulis estimée suivant l'axe X (E_{AX}).....	39
Figure V.10. Erreur rectitude verticale estimée suivant l'axe Y (E_{ZY}).....	40
Figure V.11. Erreur de lacet estimée suivant l'axe Y (E_{AY}).....	40
Figure V.12. Erreur de roulis estimée suivant l'axe Y (E_{BY}).....	40

Plan de travail

Introduction.....	01
Revue de la littérature	04
I.1.Sources d'erreur des machines-outils.....	04
I.1.1.Erreurs quasi-statiques.....	04
a) Erreurs cinématiques	04
b) Erreurs thermomécaniques	07
c) Erreurs géométriques.....	08
d) Charges et forces dynamiques.....	09
I.1.2.Erreurs dynamiques.....	10
a) Contrôle de mouvement et erreurs logicielles	10
b) Vibrations.....	10
c) Erreurs de broche et d'outil.....	11
I.2.Instruments de mesure des erreurs.....	11
a) L'interféromètre laser	11
b) Encodeur planaire KGM.....	12
c) Système de mesure barre à billes.....	13
II.1.Système de coordonnées de la machine.....	16
II.2.Terms relatifs à la conformité statique et à l'hystérésis.....	16
II.2.1. Souplesse statique.....	16
II.2.2. Jeu.....	17
II.2.3. Hystérésis.....	17
II.2.4. Hystérésis de montage.....	17
II.2.5. Hystérésis de la machine.....	17
II.3.Terms relatifs aux axes de mouvement linéaire.....	17
II.3.1. Erreur de mouvements d'un axe linéaire.....	17
II.3.2. Erreur de mouvements linéaires d'un axe linéaire.....	17
II.3.3. Erreur de positionnement linéaire du mouvement.....	18

II.3.4. Écart de positionnement linéaire.....	19
II.3.5. Exactitude de positionnement linéaire.....	19
II.3.6. Erreur de rectitude de mouvement.....	19
II.3.7. Écart de rectitude.....	19
II.3.8. Erreur de rectitude d'un axe linéaire.....	20
II.3.9. Erreur angulaire du mouvement d'un axe linéaire.....	20
II.3.10. Écart angulaire.....	20
II.3.11. Erreur angulaire d'un axe linéaire.....	20
III.1.Principe d'Abbe.....	22
III.2.Principe Bryan.....	22
III.3.Différence entre principe d'Abbe et principe de Bryan.....	23
III.4.Mesure d'erreur de parallélisme d'une paire de guidages.....	25
IV.1.Matériels utilisée.....	29
IV.1.1.Fraiseuse universelle.....	29
IV.1.2.Comparateur FY1001A.....	30
IV.2.Procédure expérimentale	30
V.1.Analyse de la répétabilité des résultats.....	33
a) Résultat de L'axe X.....	33
b) Résultat de L'axe Y.....	35
V.2.Estimation de l'erreur de rectitude et les erreurs angulaire selon le principe de Bryan.....	36
V.3.Estimation de l'erreur de positionnement linéaire au niveau de l'encodeur linéaire et les erreurs angulaires (lacet et tangage).....	40
VI. Conclusion.....	42
VII. références.....	44

INTRODUCTION

Introduction

Introduction

La société industrielle a un intérêt fondamental pour le marché de la machine-outil qui est fortement lié à l'industrie manufacturière. Au cours des 20 dernières années, la production et la consommation mondiales de machines-outils ont montré une tendance croissante.

Depuis que les humains ont développé la capacité de fabriquer et d'utiliser des outils, une relation particulière avec l'ingénierie de précision a commencé à se développer. L'étendue de la technologie a donné à cette relation une importance plus élevée. Depuis la fin du XVIIIe siècle, les scientifiques s'intéressent de plus en plus à la précision. La précision technique fait généralement référence à l'augmentation de la précision et à la diminution des tolérances des pièces produites. La philosophie de l'ingénierie de précision remonte au début des années 1930 lorsque ce domaine a été abordé pour la première fois dans un large contexte. Plusieurs principes d'ingénierie de précision et un large éventail d'améliorations et de connaissances technologiques font désormais partie de notre héritage.

De l'industrie d'automobiles et aéronautique, de circuits intégrés à l'industrie du jouet, de nombreux domaines peuvent être différenciés. Cependant, la fabrication des articles peut varier sur une large gamme de tailles, et la précision relative doit être comparée. La fabrication de précision se concentre sur la création d'artefacts plutôt que sur la pièce, mais naturellement, les machines de précision produiront des pièces de précision. L'un des éléments les plus critiques de cette approche est de réduire l'incertitude aux interfaces entre les processus et les produits. Une meilleure compréhension du fonctionnement des machines permet un meilleur contrôle des erreurs affectant leurs performances. Cette connaissance peut révéler comment la conception peut affecter la précision globale, la résolution ou la répétabilité des machines et a une énorme valeur supplémentaire dans les performances et la capacité des systèmes d'usinage. D'un point de vue économique, la réduction du temps non productif, les efforts de maintenance inférieurs de la machine et la qualité supérieure de la pièce ont un effet de coût significatif.

Une production précise peut être réalisée grâce à un processus de fabrication contrôlé et déterministe et à une compréhension approfondie de la structure et du comportement de la machine de fabrication. Les machines de précision de fabrication modernes peuvent être étudiées en tant que système intégré avec ses composants structurels, ses capteurs et ses systèmes de contrôle. Des effets importants peuvent être décrits à travers les interactions de la machine-outil et du processus d'usinage. Plusieurs méthodes d'essai et normes internationales

Introduction

ont été introduites pour renforcer la prise de conscience dans l'évaluation de la capacité de la machine-outil. En ce qui concerne cette complexité, pour augmenter la précision des dimensions des pièces usinées, une meilleure compréhension des sources des erreurs est requise. Avec cette compréhension, les erreurs peuvent être compensées ou évitées en révisant la machine-outil et en éliminant les sources d'erreur. Ces erreurs peuvent être décrites en développant des modèles informatiques qui sont utilisés pour calculer et prédire la précision de position de l'outil de coupe par rapport à la pièce en cours d'usinage.

La combinaison de modèles informatiques avec des méthodes de test robustes permet d'obtenir une méthodologie pour une évaluation plus précise de la capacité de la machine-outil. Cette capacité peut être utilisée pour trouver le système d'usinage préféré par rapport à une spécification donnée ou elle devrait mettre en œuvre une aide à l'évaluation par l'analyse et le contrôle de la perte de précision et agir. Une telle méthodologie empirique doit répondre à des exigences de base en ce qui concerne les aspects économiques, de fiabilité et de complexité pour être applicable dans un environnement industriel.

La précision des machines multi-axes est principalement affectée par les erreurs géométriques du système de direction, la rigidité de la structure, le comportement thermique et la réponse dynamique, etc... Les erreurs cinématiques dans un système de mouvement comprennent l'erreur de positionnement, l'erreur de rectitude et l'erreur angulaire (tangage, lacet et roulis). Les chercheurs majoritaires se sont concentrés sur l'erreur de positionnement linéaire. Cependant, la rectitude et les erreurs angulaires jouent également un rôle essentiel dans la précision des systèmes de guidage. Dans la plupart des domaines d'ingénierie, l'influence de la rectitude et des erreurs angulaires est importante surtout dans les systèmes compliqués, tel que les centres d'usinage et les plates-formes de mouvement multi-axes. En conséquence, une approche d'analyse et d'identification des erreurs de rectitude et des erreurs angulaires est nécessaire.

Chapitre I

Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

En raison des cycles de vie des produits plus courts et de la production en série plus petite, la précision absolue des machines-outils devient de plus en plus importante. La précision des machines-outils est l'une des exigences de base de l'ingénierie de haute précision. En règle générale, ce sont les processus de fraisage et de tournage qui produisent les propriétés les plus durables dans les machines et installations de grande valeur. Comprendre les sources des défauts des machines-outils est la première étape pour réduire et compenser ces défauts et ainsi obtenir des pièces d'usinage de haute précision. Les sources d'erreurs dans les machines-outils comprennent les défauts de mouvement intégrés à la machine, les défauts thermomécaniques qui provoquent des déformations avec des changements de température, de charge et des forces dynamiques qui provoquent des déformations supplémentaires, des erreurs de broche, des erreurs d'outils, de contrôle de mouvement et des erreurs logiciel.

I.1 Sources d'erreur des machines-outils

I.1.1 Erreurs quasi-statiques

Les erreurs quasi-statiques constituent 70 % des erreurs attribuables aux machines-outils [1] et sont définies comme les erreurs sur la position relative entre l'outil et la pièce à usiner et varient lentement en fonction du temps [2]. 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.

a) Erreurs cinématiques

Les erreurs cinématiques sont celles intégrées à la machine en raison des inexactitudes de fabrication et des jeux dans ses composants qui définissent la géométrie tels que les glissières linéaires et les roulements rotatifs [3]. Ils sont toujours présents quels que soient les facteurs externes tels que la température et les forces. De nombreuses erreurs cinématiques ne dépendent que de la position, comme la rectitude d'un axe ou l'alignement entre les axes. Le jeu dans les entraînements, les glissières et les roulements rotatifs entraîne des effets d'hystérésis, qui provoquent des erreurs différentes selon le sens de la marche.

Les erreurs cinématiques étant répétables, elles sont relativement faciles à compenser à l'aide de l'étalonnage [4]. Traditionnellement, l'accent était mis sur les ajustements mécaniques des machines pour éliminer ces erreurs, par exemple en rectifiant un axe à plat. Bien qu'un bon niveau d'alignement mécanique soit toujours le fondement de la précision des machines-outils, l'utilisation de la commande numérique par ordinateur (CNC) permet désormais une

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

utilisation beaucoup plus grande de la correction numérique. Cela signifie que s'il y a un point haut mesuré sur l'axe X, cela produit une erreur dans la direction Z. Plutôt que de tenter de supprimer le point haut sur l'axe X, il est plus facile d'introduire un décalage correctif dans le contrôleur CNC. Ainsi, lorsque l'axe X s'approche du point haut, l'axe Z se déplacera automatiquement dans la direction opposée pour maintenir le mouvement en ligne droite de l'outil le long de l'axe X nominal [5].

Les erreurs de machine-outil sont la différence entre la trajectoire d'outils réels et la trajectoire souhaitée. Un objet physique à 6 degrés de liberté en ce qui concerne son mouvement; 3 translations et 3 rotations. Il en découle que la déviation du mouvement le long d'une ligne droite comporte également six composantes: Une déviation de position, dans le sens du mouvement. Deux écarts linéaires orthogonaux à la direction du mouvement, que l'on peut appeler rectitude de l'axe. Trois écarts angulaires, qui peuvent être identifiés comme tangage, roulis et lacet, bien que la distinction entre tangage et lacet dépende d'un cadre de référence arbitraire (Fig. I-1).

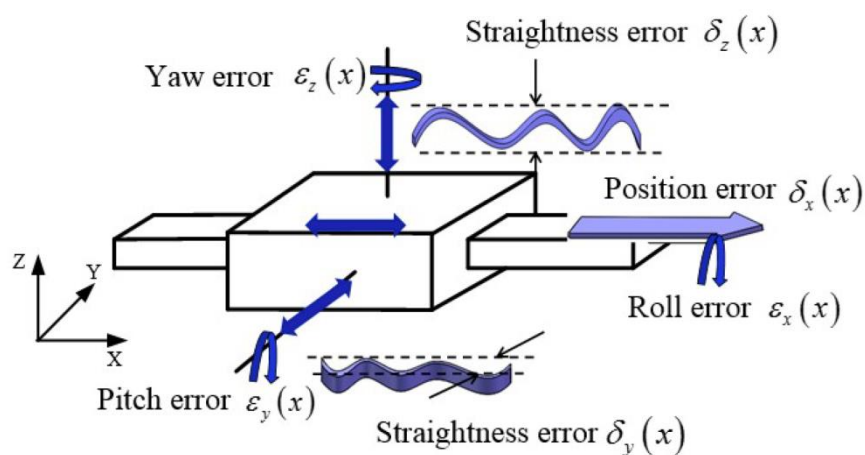


Figure I-1: Ecarts par rapport au mouvement en ligne droite [6].

Compte tenu des 6 degrés de liberté, chaque axe de machine linéaire a 6 composantes d'erreur à n'importe quelle position donnée. La norme ISO 230 les sépare en erreurs de composants, qui sont fonction de la position, et en erreurs de localisation, qui ont une valeur constante. Dans la terminologie couramment utilisée des machines-outils, les erreurs de rotation des composants (qui varient selon l'emplacement le long de l'axe) sont appelées tangage et roulis, tandis que les erreurs d'emplacement (qui ont des valeurs constantes pour l'ensemble de la machine) sont appelées l'équerrage de l'axe. Bien que chaque axe ait deux angles d'équerrage par rapport aux autres axes, le premier axe définit les deux premiers angles du système de coordonnées de la machine et le second axe définit ensuite la rotation restante autour du

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

premier axe. Les erreurs de localisation associées aux degrés de liberté de translation sont normalement ignorées car elles sont effectivement éliminées chaque fois que la machine fait référence à la pièce. Il n'y a donc que 3 erreurs de localisation pour une machine 3 axes, soit un total de 21 erreurs. Cependant, étant donné que les erreurs des composants dépendent de la position, elles seraient normalement mesurées chacune dans au moins 10 positions différentes, ce qui signifie qu'une carte d'erreur complète pour une machine aura environ 180 valeurs individuelles. Les 21 erreurs cinématiques pour une machine-outil 3 axes sont illustrées à la figure I-2.

Error type	Degree of Freedom	ISO 230 Codes	Errors	Measurements per Error	Data points
Component	Linear Position	EXX, EYY, EZZ	3	10	30
Component	Linear Deviation (Straightness)	EYX, EZX EXY, EZY EXZ, EYZ	6	10	60
Component	Angular Deviation (Pitch, roll and yaw)	EAX, EBX, ECX EAY, EBY, ECY EAZ, EBZ, ECZ	9	10	90
Location	Squareness	ECY, EAZ, EBZ	3	1	3

Figure I-2: Erreurs cinématiques pour une machine-outil 3 axes. [7]

Les erreurs radiales ont deux degrés de liberté par axe, impliquant des erreurs de translation perpendiculaires à l'axe de rotation. Les erreurs axiales ont un seul degré de liberté par axe, une translation le long de l'axe de rotation. Les erreurs d'inclinaison ont deux degrés de liberté par axe, impliquant des erreurs de rotation d'alignement entre l'axe de rotation réel et théorique. Le positionnement angulaire est une erreur de rotation unique correspondant à la différence entre la lecture du codeur pour la position angulaire et la position angulaire réelle. Il convient de noter que chacune de ces erreurs aura une composante constante représentant l'alignement avec l'axe parent et une composante dépendante de la position qui varie lorsque l'axe se déplace dans sa plage de mouvement

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

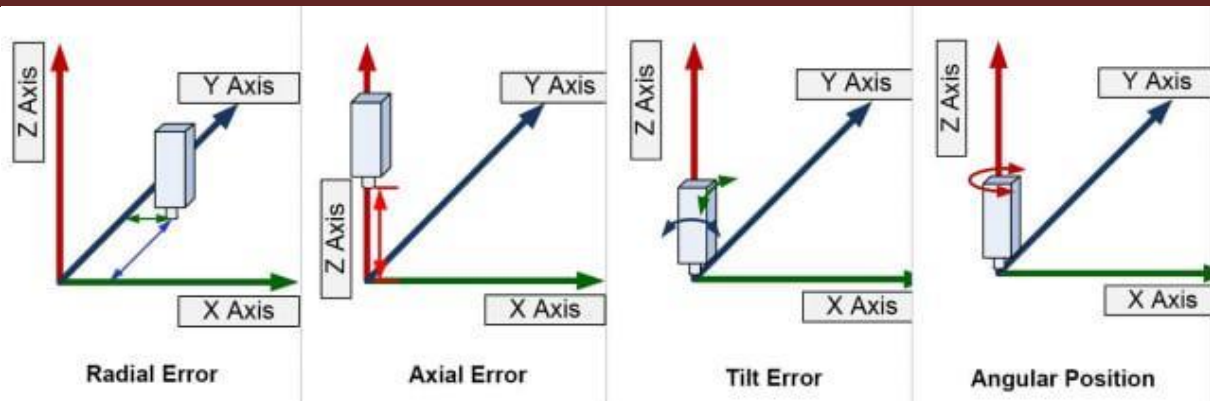


Figure I-3: Erreurs cinématiques dans l'axe rotatif [8].

b) Erreurs thermomécaniques

La dilatation thermique des composants de la machine-outil due aux changements de température de fonctionnement entraînera une distorsion de la géométrie de la machine. Ces effets sont principalement causés par des sources de chaleur liées au fonctionnement de la machine, telles que les moteurs et les glissières [9]. Pour cette raison, il est de pratique courante de chauffer une machine en utilisant une séquence de préchauffage prédéfinie qui exerce pleinement les moteurs et les axes. La machine ne doit être étalonnée et utilisée que dans cet état de préchauffage. Cependant, des erreurs thermomécaniques persistent pour un certain nombre de raisons. Premièrement, la machine peut être utilisée de manière plus intensive ou moins intensive que la séquence de préchauffage. Pour cette raison, dans certains cas où les machines reçoivent une utilisation intermittente légère, une précision améliorée peut être obtenue lorsque le cycle de préchauffage n'est pas utilisé. La température varie également dans le temps en raison de l'utilisation de la machine et de l'environnement ambiant. Les machines peuvent utiliser des capteurs de température situés sur les axes pour appliquer des corrections pour les erreurs de mise à l'échelle linéaire. Cependant, cela suppose que la dilatation thermique entraîne une erreur d'échelle homogène, ce qui n'est pas le cas. La température varie à différentes positions sur la machine en raison de changements dans les sources de chaleur localisées, à la fois internes (comme les moteurs) et externes (comme la lumière directe du soleil depuis une fenêtre alignée avec une machine). Des gradients de température sont également observés dans les environnements intérieurs, en raison de l'air plus chaud montant vers le haut d'une pièce et de l'air plus froid se déposant vers le bas, généralement d'un degré C par m. Ces effets peuvent être très difficiles à prévoir et à compenser.

Chapitre I : ——— *Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer*

Un travail considérable a été effectué pour comprendre comment modéliser et compenser au mieux la déformation thermique des machines-outils [10]. Les méthodes impliquent généralement de placer des capteurs de température sur les principaux éléments structurels d'une machine, puis de prédire la déformation à l'aide de l'analyse par éléments finis (FEA) ou d'un modèle empirique tel que l'apprentissage en profondeur [11]. La réalisation de prévisions précises reste difficile en raison du nombre limité de capteurs de température donnant une image incomplète des gradients de température, des incertitudes dans les capteurs de température eux-mêmes, des incertitudes sur le coefficient de dilatation thermique de la structure de la machine-outil et des incertitudes dans les modèles. Ce sont tous des domaines qui nécessitent des développements supplémentaires afin de faire progresser la fabrication de haute précision

c) Erreurs géométriques

Les erreurs importantes d'une machine-outil sont des mouvements d'erreur relatifs entre l'outil et la pièce à usiner [12]. Sous l'hypothèse d'un comportement de corps rigide [13-14], ces erreurs sont uniquement fonction du mouvement nominal et ne dépendent pas de l'emplacement des autres axes. Conformément à la norme ISO 230-1: 2012 [15], les erreurs géométriques comprennent trois erreurs de mouvement angulaire (ECX, EBX et EAX) et deux erreurs de mouvement de rectitude, EYX et EZX comme illustrée dans la figure 1. Cependant, dans de nombreuses études, ces erreurs sont traduites en «erreur de mouvement de guidage». L'expression n'est pas exacte; bien que ce soit lié à l'erreur de fabrication de rectitude du rail lui-même, le rail de guidage lui-même est statique, et cette erreur est générée sur la scène lors de son déplacement. Par conséquent, cette erreur devrait être appelée l'erreur de mouvement de la paire de guides [16,17]. L'erreur de mouvement de rectitude de la scène est étroitement liée à l'erreur de rectitude du rail de guidage lui-même. Par conséquent, une certaine confusion surgit entre ces deux concepts. L'erreur de rectitude du rail de guidage lui-même est une erreur de forme, qui doit être calculée et évalué après mesure. Il a une forme définie de zone de tolérance, tandis que le l'erreur de mouvement de rectitude reflète la déviation de la scène par rapport à l'axe idéal dans son mouvement, qui n'est pas une erreur de formulaire et n'a pas besoin d'être évaluée.

L'erreur de mouvement de rectitude du chariot linéaire est étroitement liée à la rectitude du guidage (erreur du rail de guidage lui-même), mais ces erreurs sont différentes car la rectitude du rail est une cause, alors que l'erreur de mouvement est un effet. De plus, les erreurs

Chapitre I : ——— *Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer*

d'assemblage, la rigidité de la base, la déformation et la charge sur le chariot également influencé l'effet. Cette question a attiré l'attention de nombreux chercheurs autour du monde, qui ont mené des recherches approfondies et obtenu de nombreux résultats précieux [18,21].

d) Charges et forces dynamiques

Le poids des pièces mobiles de la machine et de la pièce à usiner entraînera un déplacement répétable de la structure de la machine, qui dépend de la combinaison des positions des axes [22]. L'approche standard de l'étalonnage cinématique suppose que les erreurs dans chaque axe dépendent uniquement de la position le long de cet axe. Cela signifie que chaque axe peut être étalonné isolément et que les erreurs résultantes pour toute position donnée peuvent être calculées par superposition. Cependant, lorsque l'on considère les charges agissant sur les axes, cette hypothèse n'est pas valable car lorsqu'un axe comme l'extrémité de la chaîne cinématique est complètement déployé, il exercera un moment plus important sur l'axe auquel il est attaché. Pour cette raison, pour la plus grande précision, une compensation dite volumétrique doit être effectuée [23]. Cela signifie qu'au lieu de prendre des mesures à un certain nombre de positions discrètes le long de chaque axe indépendant, des mesures sont prises à des positions de grille dans le volume de la machine. Le résultat est un processus d'étalonnage beaucoup plus long. Le logiciel de contrôleur supplémentaire requis pour mettre en œuvre la compensation volumétrique peut également être très coûteux, ce qui signifie que cela n'est appliqué que pour les applications les plus exigeantes. Heureusement, la rigidité inhérente aux machines-outils signifie que ces erreurs sont généralement très faibles, probablement inférieures au micron pour les machines-outils CNC typiques. Cependant, pour les grandes machines à portique, fonctionnant à des échelles de plusieurs mètres, la compensation volumétrique peut éliminer des erreurs beaucoup plus importantes.

Des déformations supplémentaires de la structure de la machine-outil et les erreurs qui en résultent sont causées par l'accélération de la masse de la machine et de la pièce, ainsi que par les forces du processus. Ceux-ci peuvent avoir un effet significatif sur les erreurs de la machine [24]. Les forces d'inertie sont prévisibles et pourraient, par conséquent, être compensées à l'aide d'une correction basée sur un modèle [25], bien que cela ne soit pas considéré comme étant effectué par les systèmes de contrôle industriels actuels. Les forces de processus sont plus difficiles à prévoir, bien que ces forces puissent être réduites pour avoir un impact négligeable sur la forme finale des composants en réduisant la profondeur et les

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

vitesse d'avance pour les coupes de finition. Cela implique un compromis entre le temps de processus et la précision.

I.1.2 Erreurs dynamiques

a) Contrôle de mouvement et erreurs logicielles

Les erreurs de contrôle de mouvement incluent à la fois des effets physiques, tels que le glissement des faisceaux de câbles, et des erreurs d'interpolation de contrôle, telles que la discordance d'asservissement et les pointes d'inversion [26]. Les erreurs dynamiques sont celles qui ne sont présentes que lorsque la machine est en mouvement. Ces erreurs incluent des erreurs de contrôleur telles que des pointes d'inversion, la discordance d'asservissement et les vibrations induites par les déformations.

b) Vibrations

La vibration est produite principalement par le processus de coupe. La précision d'usinage obtenue avec les machines-outils est fréquemment compromise par les 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 erreurs qui affectent principalement l'état de surface de la pièce finie [27]. La variation de la profondeur de passe provoque une variation des efforts de coupe ce qui génère une excitation de la structure de la machine-outil et de la pièce elle-même. Cette excitation forcée de la structure génère une déflexion de l'outil de coupe. La modélisation du processus de coupe devient nécessaire afin de prédire les effets de la vibration pour des outils de coupe bien spécifiques [28].

La vibration peut être générée par d'autres sources potentielles telles que la vibration transmise à travers le sol, les composantes tournantes de la machine, les roulements à rouleaux, la turbulence dans les liquides de lubrification ainsi que l'instabilité aérostatische dans les paliers pneumatiques. Elle peut être également générée par la combinaison de sources d'énergies variées à des fréquences variées.

La caractérisation de la réponse dynamique des machines-outils durant la phase de conception peut aider les ingénieurs à réaliser une diminution nette de la rigidité et du poids total de la machine-outil. Une machine-outil prototype est souvent utilisée afin d'étudier l'influence de plusieurs variables affectant les performances dynamiques. Les méthodes des éléments finis peuvent être utilisées afin de déterminer le facteur d'amortissement et la rigidité de la structure

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

[27]. Les performances de la machine peuvent être testées numériquement pour différentes configurations possibles afin d'optimiser la structure en fonction de la vibration induite dans la structure et apporter les corrections nécessaires au modèle général.

Pour atténuer l'effet des vibrations, il est impératif de balancer dynamiquement toutes les composantes tournantes et d'isoler complètement la machine de la structure du local où elle est installée en utilisant des composantes mécaniques (ressort, masses et amortisseurs).

c) Erreurs de broche et d'outil

Une broche est en fait un axe rotatif supplémentaire avec la différence importante que le positionnement en rotation autour de l'axe de broche n'a pas besoin d'être contrôlé avec précision. En fait, la broche peut être appelée axe d'entraînement rotatif, cependant, en raison de la vitesse de fonctionnement élevée, des techniques de mesure entièrement différentes sont nécessaires pour mesurer les erreurs de broche. Les erreurs associées à cet axe sont parfois appelées faux-rond, de sorte que les erreurs radiales sont appelées faux-rond radial et les erreurs axiales comme faux-rond axial. Le positionnement angulaire n'est généralement pas une considération puisque l'outil tourne en continu dans l'axe plutôt que d'être tourné avec précision. Bien que cinématiquement identiques à tout autre axe rotatif, en pratique les sources d'erreur et la détection sont très différentes en raison de la vitesse de rotation beaucoup plus élevée. Des capteurs sans contact qui fournissent des mesures à très haute fréquence sont donc nécessaires, tels que des capteurs de proximité qui utilisent des effets de courants de Foucault [29]. Des erreurs supplémentaires sont associées à la répétabilité de l'opération de changement d'outil et à l'usure de l'outil qui affecte la longueur de l'outil, le diamètre de l'outil et la géométrie de l'outil. Ceux-ci peuvent être étalonnés à l'aide de calibreurs d'outils laser capables de calibrer rapidement la position et la taille de l'outil pendant le fonctionnement de la machine.

I.2 Instruments de mesure des erreurs

Parmi les instruments de mesure des erreurs de la machine-outil on peut citer :

a) L'interféromètre laser

L'interféromètre laser est le moyen le plus précis pour analyser et corriger les axes des machines-outils à commandes numériques. Il permet de réaliser des mesures de justesse d'axe linéaire, circulaire, angulaire (lacet, tangage) de rectitude, d'équerrage et dynamique (Fig. I-4). Grâce à ces mesures on peut insérer des nouvelles corrections dans le système de commande (contrôleur) pour obtenir une machine plus précise.

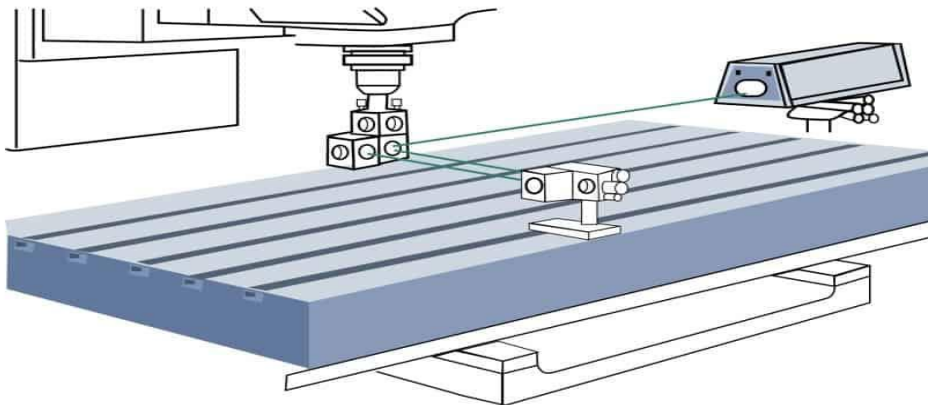


Figure I-4. La configuration optique pour trouver linéaire les erreurs de positionnement [30]

b) Encodeur planaire KGM

L'encodeur planaire KGM fournit une grande rapidité et efficacité pour mesurer la performance des machines-outils à commande numérique (Fig. I-5). 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 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 double bille. Comme la montre la Figure 1-5, la base de l'encodeur planaire KGM est montée sur un support fixé sur la table de la machine à tester, la tête de lecteur est fixée sur la broche. La tête du KGM se déplace au-dessus de la surface du miroir à quelques millimètres d'altitude, suivant la trajectoire programmée.

Dans le test de forme libre, la commande CNC déplace les axes de la machine dans un plan sur n'importe quelle trajectoire programmée. Le test d'angle, par exemple, fournit des informations sur la dynamique des boucles de contrôle de position par rapport au dépassement et à l'erreur d'arrondi qui en résulte. Les tests de forme libre ne peuvent être effectués qu'avec l'encodeur de grille KGM. Les contours spéciaux de forme libre peuvent être évalués conformément à la norme ISO 10791-6 K2 — Feeds et K3 — Interpolation [31].

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

Dans le test d'interpolation circulaire, la commande CNC effectue une interpolation circulaire dans le plan d'usinage. Le KGM Grid Encoder mesure la trajectoire réelle du cheminement. À partir de ces informations, le logiciel d'évaluation ACCOM détermine les écarts par rapport à une trajectoire circulaire idéale et les affiche sous forme de trace d'erreur de mouvement à l'écran. Il calcule également les valeurs numériques telles que l'erreur circulaire, l'hystérésis et l'erreur radiale selon ISO 230-4 [32]. Les tests d'interpolation circulaire avec de petits rayons (par exemple avec le KGM) fournissent des informations sur la précision de la commande en accélération. L'influence de la géométrie de la machine sur le résultat de la mesure avec des petits rayons est insignifiante. Le contrôle et les entraînements ont cependant un effet important.

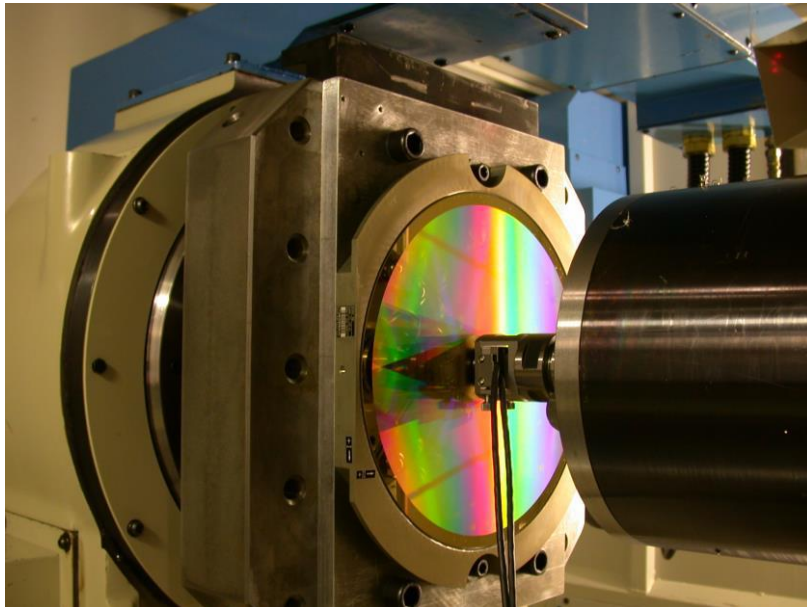


Figure I-5. Encodeur planaire KGM monté sur une machine-outil.

c) Système de mesure barre à billes

La barre à billes est une jauge de calibrage pour machines-outils à commande numérique capable de mesurer les défauts géométriques présents dans la machine et de détecter les imprécisions produites par son contrôleur et ses servomécanismes (Fig. I-6).

Ce système fonctionne avec un capteur linéaire de précision, dont la compression et la détente peuvent être mesurées avec une précision de ± 0.5 microns, et avec un logiciel de traitement de données qui permet de visualiser graphiquement les mesures.

Chapitre I : — Erreurs des machines-outils et les instruments utilisés pour les mesurer

Grâce aux différents modes de fonctionnement, le système peut mesurer aussi bien les erreurs de positionnement statique que les erreurs dynamiques uniquement visibles lorsque la machine est en mouvement. Il détecte ainsi les défauts suivants : Différence d'asservissement, erreur cyclique, erreur d'échec, glissement intermittent, orthogonalité, inversion du jeu, jeu latéral, pic d'inversion, rectitude et défaut d'équerrage.



Figure I-6. Barre à billes [33].

CHAPITRE II

Évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO

Chapitre II : ————— *Évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO*

Dans ce chapitre on explique l'évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO (230-1:2012) qui est spécifique des méthodes d'essai de l'exactitude géométrique des machines-outils fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques, à l'aide d'essais géométriques et d'usinage. Les méthodes peuvent également être appliquées à d'autres types de machines industrielles.

L'ISO 230-1:2012 couvre les machines à entraînement mécanique qui peuvent être utilisées pour l'usinage du métal, du bois, etc. par enlèvement de copeaux ou par déformation plastique. Elle ne couvre pas les machines portatives motorisées.

L'ISO 230-1:2012 concerne uniquement les essais d'exactitude géométrique. Elle ne traite ni des essais de fonctionnement de la machine-outil (vibrations, broutage des composants, etc.), ni de la vérification des caractéristiques (vitesses, avances).

L'ISO 230-1:2012 ne couvre pas l'exactitude géométrique des mouvements des machines-outils à grande vitesse pour lesquelles les forces d'usinage sont notoirement plus faibles que les forces dues aux accélérations.

II.1 Système de coordonnées de la machine

Système orthogonal main droite avec les trois principaux axes appelés X, Y et Z, et des axes de rotation autour de ces axes marqués A, B et C, respectivement

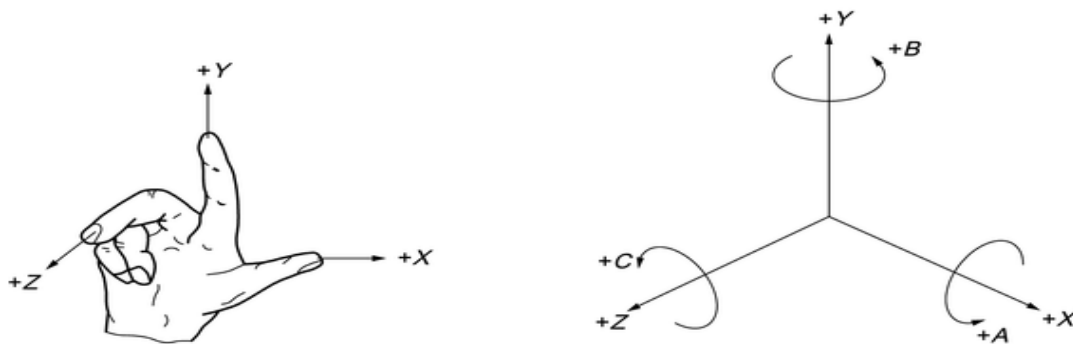


Figure II.1. Système de coordonnées machine orthogonal main droite

II.2. Termes relatifs à la conformité statique et à l'hystérésis

II.2.1. Souplesse statique

Déplacement linéaire (ou angulaire) par unité de force (ou de mouvement) statique entre deux objets, spécifié par rapport à la boucle structurelle, à l'emplacement aux directions des forces appliquées, ainsi que par rapport à l'emplacement et à la direction du déplacement considéré. La souplesse statique est l'inverse de la rigidité statique. La souplesse statique est recommandée en raison de ses propriétés additives.

Chapitre II : ————— Évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO

II.2.2. Jeu

Condition de rigidité nulle sur une étendue de déplacement limitée due au jeu entre les éléments de la boucle structurelle [34]

II.2.3. Hystérésis

Déplacement linéaire (ou angulaire) entre deux objets résultant de l'application et du retrait séquentiels des forces égales (ou moments) dans des directions opposées [34]

II.2.4. Hystérésis de montage

Hystérésis de différents composants dans un montage d'essai, normalement due à des jeux mécaniques [34]

II.2.5. Hystérésis de la machine

Hystérésis de la structure de la machine lorsqu'elle est soumise à des charges spécifiques [34]

II.3. Termes relatifs aux axes de mouvement linéaire

De nombreux essais et définitions de la norme ISO 230 traitent des erreurs de mouvement relatif entre l'organe de la machine qui porte l'outil de coupe et celui qui porte la pièce à usiner. Ces erreurs sont définies et mesurées à la position ou à la trajectoire du point fonctionnel.

II.3.1. Erreur de mouvements d'un axe linéaire

Mouvements linéaires et angulaires non désirés d'un composant commandé pour se déplacer le long d'une trajectoire (nominale) en ligne droite (Figure II.2). Les erreurs de mouvements sont identifiées par la lettre *E* suivie d'un indice, où la première lettre est le nom de l'axe correspondant à la direction de l'erreur du mouvement et la deuxième lettre est le nom de l'axe du mouvement (Figure II.2).

II.3.2. Erreur de mouvements linéaires d'un axe linéaire

Trois erreurs de translation de mouvement du point fonctionnel d'un composant mobile commandé le long de la trajectoire (nominale) en ligne droite, le premier étant le long de la direction du mouvement (nominal) et les deux autres étant le long de deux directions orthogonales à cette direction. L'erreur de mouvement linéaire le long de la direction du mouvement s'appelle erreur de positionnement linéaire du mouvement. Les deux autres mouvements de translation des erreurs s'appellent erreurs de rectitude de mouvement.

Les erreurs de mouvements linéaires mesurées au point fonctionnel incluent les effets des erreurs de mouvements angulaires. Les effets de ces erreurs de mouvements angulaires sont différents quand la position du point de mesure sur le composant mobile est différente de celle

Chapitre II : ————— *Évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO*

du point fonctionnel. Dans ces cas-ci, les écarts de mouvements angulaires doivent être connus et pris en considération pour déterminer les déviations de la trajectoire du point fonctionnel.

Si le composant mobile ne peut pas être considéré comme un corps rigide, par exemple en cas de grande table mobile, les essais seront effectués sur plus d'un point sur le composant mobile.

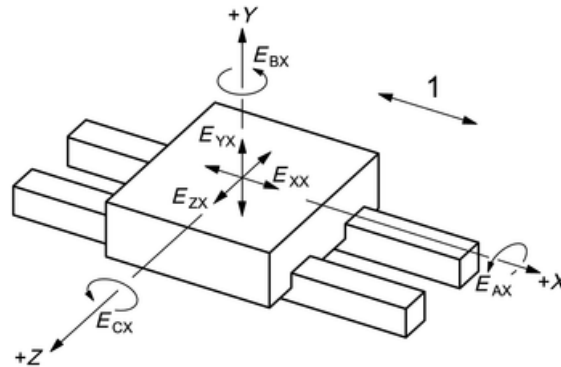


Figure II.2. Erreurs des mouvements angulaires et linéaires d'un composant commandé pour se déplacer le long d'une trajectoire (nominale) en ligne droite parallèle à l'axe X

1 mouvement linéaire commandé sur l'axe X

E_{AX} erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation A (roulis)

E_{BX} erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation B (lacet)

E_{CX} erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation C (tangage)

E_{XX} erreur de positionnement de mouvement linéaire de l'axe X; écart de positionnement de l'axe X

E_{YX} erreur de rectitude de mouvement en direction de l'axe Y

E_{ZX} erreur de rectitude de mouvement en direction de l'axe Z

II.3.3. Erreur de positionnement linéaire du mouvement

Mouvement non désiré le long de la direction du mouvement qui résulte en une position locale réelle atteinte par le composant mobile au point fonctionnel différant de la position commandée locale le long de la direction du mouvement. L'erreur de positionnement linéaire de mouvement est associée aux imperfections du composant mobile et de son système de

Chapitre II : ————— Évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO

guidage. Il n'est pas associé à la réponse dynamique du composant mobile et de son système de positionnement à servocommande.

II.3.4. Écart de positionnement linéaire

Position atteinte par le point fonctionnel sur le composant mobile moins la position cible. Les écarts de positionnement sont mesurés à des intervalles discrets spécifiés conformément aux exigences de l'ISO 230-2 pour déterminer l'exactitude de positionnement et la répétabilité des axes numériquement contrôlés.

II.3.5. Exactitude de positionnement linéaire

Valeur du plus grand écart de positionnement linéaire positif ajouté à la plus grande valeur absolue de l'écart négatif de positionnement, évalué en conformité avec des conventions spécifiées. La présente définition s'applique seulement aux axes qui ne sont pas commandés numériquement de façon continue. L'exactitude d'un positionnement linéaire des axes commandés numériquement en continu est établie et déterminée en conformité avec les exigences de l'ISO 230-2.

II.3.6. Erreur de rectitude de mouvement

Mouvement involontaire dans l'une des deux directions orthogonales à la direction de l'axe linéaire commandé pour se déplacer le long d'un axe (nominal) de trajectoire en ligne droite.

II.3.7. Écart de rectitude

Distance du point fonctionnel à la ligne droite de référence ajustée à sa trajectoire, mesurée sur une des deux directions orthogonales à la direction de la trajectoire (nominale) en ligne droite commandée (Figure II.3).

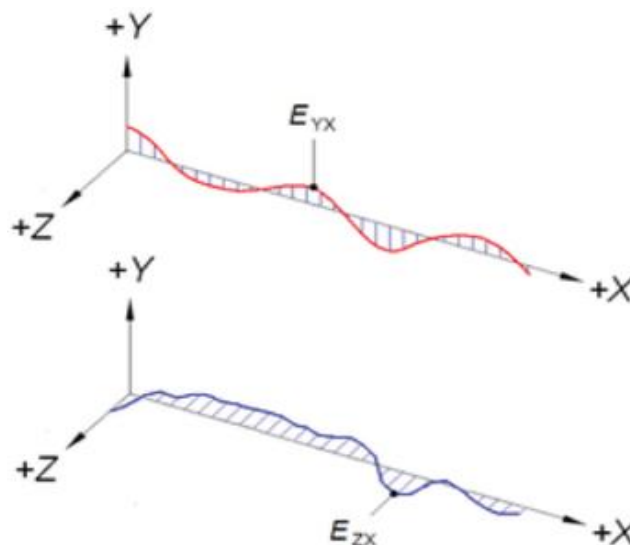


Figure II.3 .Représentation des écarts de rectitude d'axe des X dans les directions Y et Z

Chapitre II : ————— Évaluation de la performance des machines-outils selon la norme ISO

E_{YX} écarts de rectitude X en direction de l'axe Y

E_{ZX} écarts de rectitude X en direction de l'axe Z

Les écarts de rectitudes sont mesurés à faible vitesse (ou lorsque l'axe soumis à essai n'est pas en mouvement) afin d'éviter une interférence dynamique.

II.3.8. Erreur de rectitude d'un axe linéaire

Valeur du plus grand écart de rectitude positif ajoutée à la valeur absolue du plus grand écart négatif de rectitude (en conformité avec toute ligne droite de référence précédemment définie). L'erreur minimale de rectitude est obtenue en utilisant la ligne droite de référence minimale.

II.3.9. Erreur angulaire du mouvement d'un axe linéaire

Trois mouvements non intentionnels d'un composant mobile commandé se déplaçant le long d'une trajectoire (nominale) en ligne droite. Il y a trois rotations possibles autour des trois directions orthogonales. Une autour de l'axe du mouvement et une autour de chacun des deux axes perpendiculaires à l'axe du mouvement (Figure II.2). La rotation autour de la direction du mouvement peut être désignée comme roulis. Les rotations autour des axes qui sont perpendiculaires à la direction du mouvement sont appelées inclinaisons. Il y a deux inclinaisons: pour l'axe horizontal de mouvement, l'inclinaison autour de l'axe vertical peut être appelée lacet et l'inclinaison autour de l'axe horizontal peut être appelée tangage. Il convient de noter que les termes «tangage» et «lacet» sont uniquement utilisés pour les axes horizontaux. Les termes ne s'appliquent pas aux axes verticaux.

II.3.10. Écart angulaire

Lecture d'un instrument de mesure d'angle dans la direction autour de chacune des trois directions orthogonales, mesurée durant un déplacement complet du composant mobile

II.3.11. Erreur angulaire d'un axe linéaire

Valeur de l'écart angulaire le plus grand ajoutée à la valeur absolue du plus grand écart négatif mesuré durant un déplacement complet du composant mobile, évalué dans chacune des trois directions orthogonales.

CHAPITRE III

Principes d'Abbe et de Bryan

III.Principes d'Abbe et de Bryan

III.1.Principe d'Abbe

Pour éviter les erreurs de parallaxe, un système de mesure doit être placé coaxialement avec l'axe sur lequel les déplacements sont mesurés. Cela est connu sous le nom de principe d'Abbe. Le principe d'Abbe constitue un outil fondamental pour la conception de machines de mesure de très haute exactitude. Il stipule que : « Pour réaliser une bonne mesure, l'étalon de mesure doit être installé dans le prolongement de la côte à mesurer. » (Abbe, 1890). Sur la Figure 1, deux dispositifs sont représentés : le premier est un pied à coulisse ne respectant pas le principe d'Abbe, alors que le second est un palmer micrométrique respectant le principe d'Abbe [35].

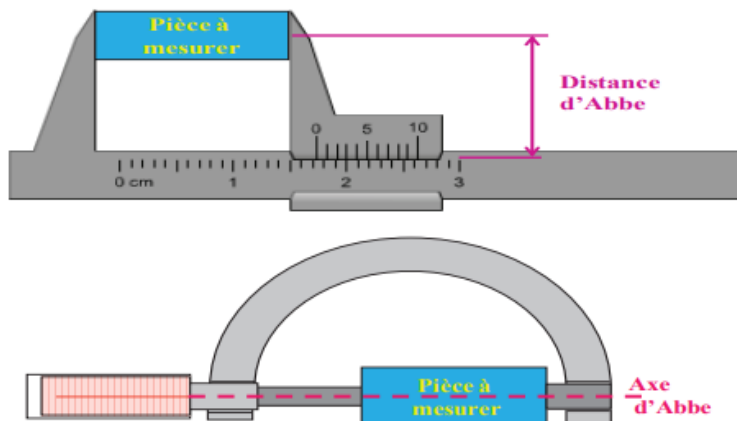


Figure III.1.: (a) Disposition ne respectant pas le principe d'Abbe, (b) Disposition respectant le principe d'Abbe

III.2.Principe Bryan

En 1979, Bryan a mis à jour la conception du principe d'Abbe. Il a élargi qualitativement la relation entre l'erreur de mouvement d'un axe, l'erreur mouvement angulaire et l'erreur de rectitude du rail de guidage lui-même. Il a étendu le concept de la mesure de déplacement à la mesure de rectitude et a proposé le principe de Bryan comme "Le système de mesure de rectitude doit être aligné avec le point fonctionnel dont la rectitude doit être mesurée".

Dans des nombreuses recherches, l'erreur de mouvement de rectitude de l'axe en mouvement est exprimée par l'intégration d'erreur de mouvement angulaire, ou les erreurs de rotation peuvent être obtenues inversement par différenciation des erreurs de rectitude [36–38]. Une

Chapitre III : ————— *Principes d'Abbe et de Bryan*

forte corrélation semble être soulignée entre l'erreur de mouvement de rectitude et l'erreur de mouvement angulaire. À l'inverse, certains chercheurs les traitent comme mutuellement indépendants [39,40]. Ekinici et al. [38] ont étudié la relation entre l'erreur de mouvement de rectitude, l'erreur de mouvement angulaire et l'erreur géométrique du guide lui-même, comme le montre la figure III.2. Dans ce concept, un seul rail de guidage existe et le chariot est soutenu par deux blocs linéaires, qui sont abstraits comme deux petites roues séparées par distance 'L'. Le chariot se déplace sur un rail de guidage avec une géométrie E_{zx} .

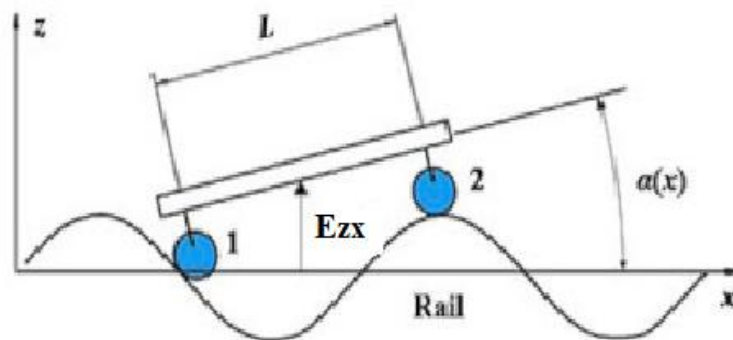


Figure III.2.Stage-rails configuration

Donc une erreur Abbe est introduite lorsqu'un point à mesurer est séparé latéralement de l'axe de mesure, et lorsque le système de positionnement est soumis à un mouvement angulaire. Dans ce cas, le déplacement mesuré semble plus court ou plus long que le déplacement réel. La séparation spatiale entre le point mesuré et l'axe de mesure est appelée le décalage Abbe.

Les deux principes (Abbe et Bryan) sont considérés comme des lignes directrices par les ingénieurs et les chercheurs du monde entier dans la conception de machines à mouvement linéaire, telles que les tables de positionnement linéaire, les machines-outils, et les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT).

III.3.Différence entre principe d'Abbe et principe de Bryan

On sait que l'erreur volumétrique en tout point de l'espace d'une machine-outil contient trois composants, à savoir une erreur de positionnement dans le sens de déplacement et deux erreurs de rectitude perpendiculaire à la direction de déplacement. L'erreur de positionnement peut être dérivée avec le principe d'Abbe et les erreurs de rectitude peuvent être dérivées avec le principe de Bryan. Afin de démontrer que les erreurs de mouvement linéaire d'un axe linéaire sont affectées par erreurs effectives de mouvement angulaire, deux exemples sont

Chapitre III : ————— Principes d'Abbe et de Bryan

données par Fan et al [14]. La figure III.3 montre le premier exemple de l'axe X d'une machine-outil.

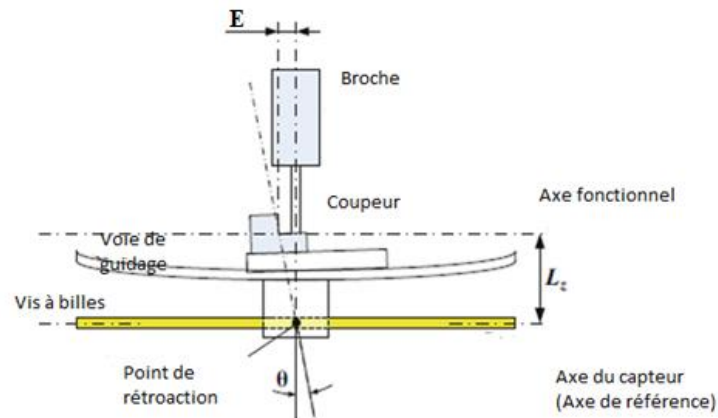


Figure III.3. Axe linéaire avec erreur d'Abbe [13]

L'axe de référence de positionnement est l'échelle linéaire optique et le point de détection (point de retour) est la tête de lecture. Le point fonctionnel est l'emplacement de la fraise et l'axe fonctionnel est la ligne le long de la direction de coupe, qui a un décalage d'Abbe (t_z) dans la direction Z de l'axe de référence. L'erreur angulaire (θ) de la table mobile au point de détection provoquera l'erreur de positionnement (E) du point fonctionnel le long de l'axe fonctionnel par le montant de $t_z \times \theta$. C'est une erreur typique d'Abbe.

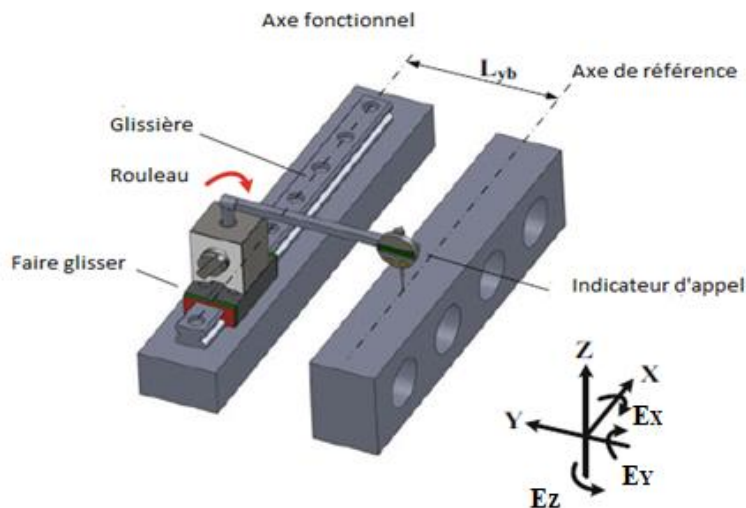


Figure III.4. Rectitude mesuré d'une guide linéaire avec l'erreur de Bryan [41]

Le deuxième exemple, comme le montre la figure III.4 représente la rectitude conventionnelle mesure d'une guide linéaire à l'aide d'une règle montée sur la glissière (axe fonctionnel). La distance entre l'axe fonctionnel et le l'axe de référence (ligne droite) peut être appelé le

décalage de Bryan (L_{yb}). L'angle de roulis de la glissière provoquera la mesure de rectitude verticale du comparateur à cadran par la quantité de $L_{yb} \times E_{BX}$, C'est une erreur typique de Bryan.

III.4. Mesure d'erreur de parallélisme d'une paire de guidages

Les erreurs géométriques d'un axe linéaire peuvent être causées par l'assemblage incorrect de deux rails de guidage qui doivent être idéalement parallèles et droits, comme illustré à la Figure. III.5 la glissière secondaire doit être parallèle à n'importe quelle position le long de la course. En fait, il n'est pas possible d'obtenir des conditions parallèles idéales dans l'assemblage de la machine.

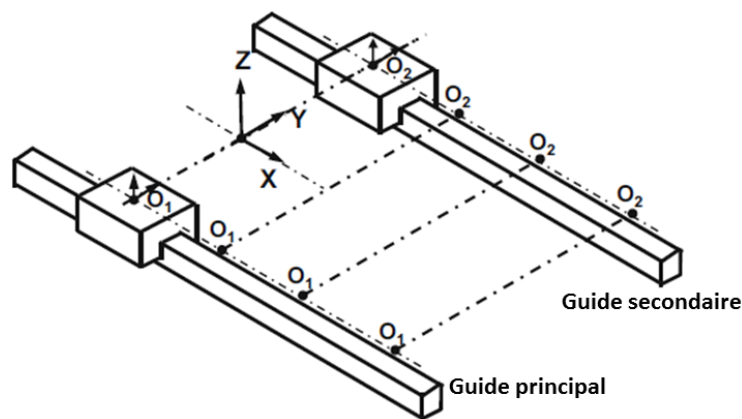


Figure.III.5. Guidages parallèles idéaux d'un axe linéaire [41]

Un cas d'un guide non parallèle peut être illustré à la figure III.6 dans laquelle la voie de guidage principale est prise comme référence et la voie de guidage secondaire n'est pas parallèle à la voie de guidage de référence dans le plan XY et le plan XZ séparément.

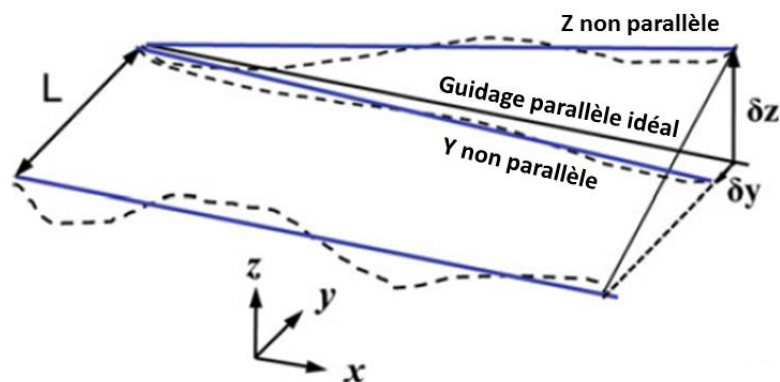


Figure. III.6. Situation des guidages non parallèles [41]

Le premier provoquerait une erreur de lacet et le dernier une erreur de roulis du chariot en mouvement.

Chapitre III : ————— *Principes d'Abbe et de Bryan*

La figure III.7, cependant, illustre uniquement la chaîne d'erreurs bidimensionnelle provenant d'un mauvais guidage. En pratique, tous les axes mobiles sont guidés par une paire de glissières. Il est évident que non seulement la rectitude de la voie de guidage créera une erreur de rectitude et une erreur de tangage, mais également le parallélisme de deux voies de guidage provoquera une erreur de lacet et de roulis de l'axe en mouvement.

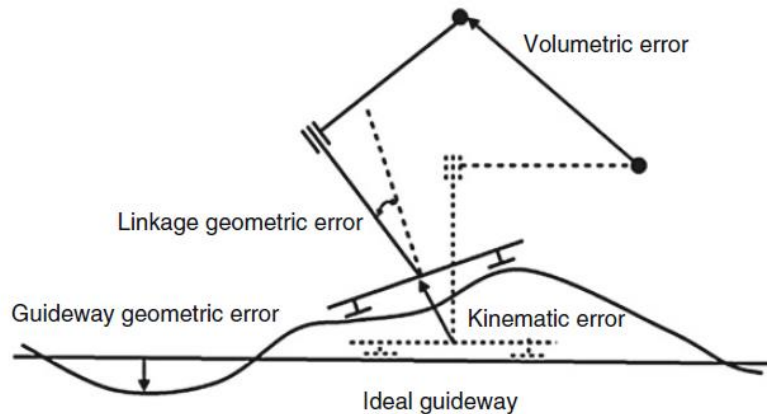


Figure III.7. Erreurs machine d'un étage linéaire [38]

La figure III.8 montre clairement que l'erreur de lacet de l'axe en mouvement est induite par une erreur non parallèle dans le plan horizontal de deux glissières de support. De même, l'erreur verticale de non parallélisme des rails de guidage entraînera l'erreur de roulis du chariot en mouvement comme le montre la figure III.9. On peut clairement le voir sur la figure III.7, l'erreur de tangage est due à l'erreur de rectitude du rail de guidage dans la direction verticale.

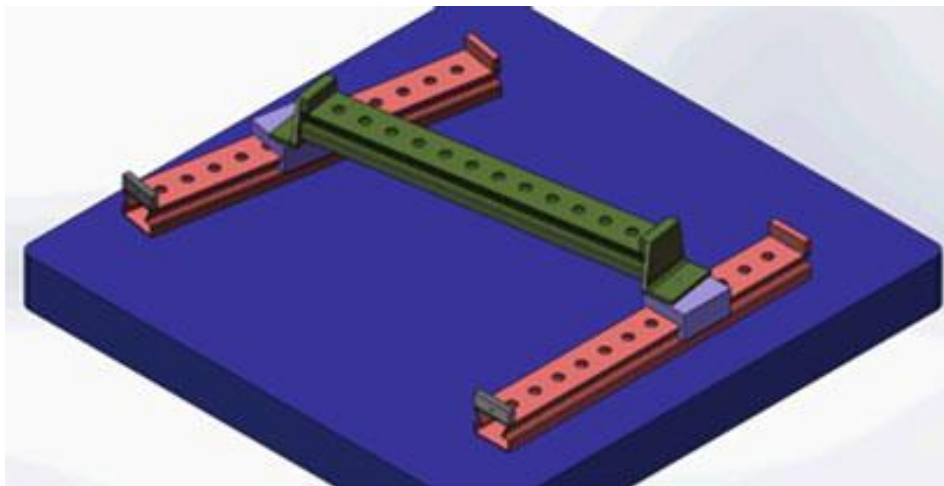


Figure.III.8.Erreur de lacet due à des guidages horizontalement non parallèles [41]



Figure III.9. Erreur de roulis due à des guidages verticalement non parallèles [41]

Étant donné que l'erreur de rectitude et l'erreur angulaire correspondante ont la même tendance, une curiosité se poserait : l'erreur angulaire peut-elle se convertir en erreur de rectitude et vice versa ? Jusqu'à présent, il n'y a pas de réponse positive dans la mesure d'erreur de rectitude de machine-outil [38-40]. Par conséquent, afin de réduire toutes les erreurs angulaires d'un axe linéaire, la rectitude et le parallélisme des glissières doivent être correctement ajustés dans les meilleures conditions.

Par conséquent, la mesure du parallélisme de deux rails de guidage est essentielle au contrôle qualité. La technique d'assemblage conventionnelle pour le parallélisme des rails de guidage est mesurée par un bloc parallèle standard et deux comparateurs à cadran, comme illustré à la Figure.III.10. Ceci est principalement utilisé par les constructeurs de machines-outils et presque partout dans le monde, également spécifié dans ISO230-1 comme une méthode d'essai pour erreur de parallélisme de la machine-outil. Cependant, cette méthode amplifiée en fait le principe de Bryan deux fois car la référence n'est pas alignée avec l'axe mesuré pour les deux guidages [41].

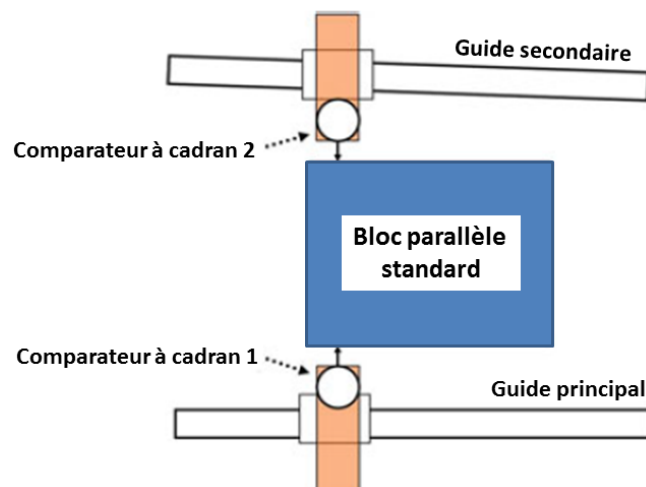


Figure III.10. Mesure du parallélisme de deux rails de guidage avec un bloc parallèle standard [41]

Chapitre III : ————— *Principes d'Abbe et de Bryan*

À partir de l'explication précédente, il est essentiel de comprendre les effets des erreurs géométriques sur la précision de la machine-outil. Plus important encore, il est nécessaire de connaître la signification du principe d'Abbe et du principe de Bryan, et de déduire leur influence sur les erreurs volumétriques des machines-outils.

CHAPITRE IV
Procédure expérimentale

Chapitre IV : – Procédure expérimentale

Ce chapitre décrit les procédures et les équipements expérimentaux utilisés pour l'acquisition des données afin d'établir la relation entre les erreurs de rectitude et les erreurs angulaires d'une machine-outil. Des détails sur l'installation des équipements utilisés pendant les divers essais sont également fournis.

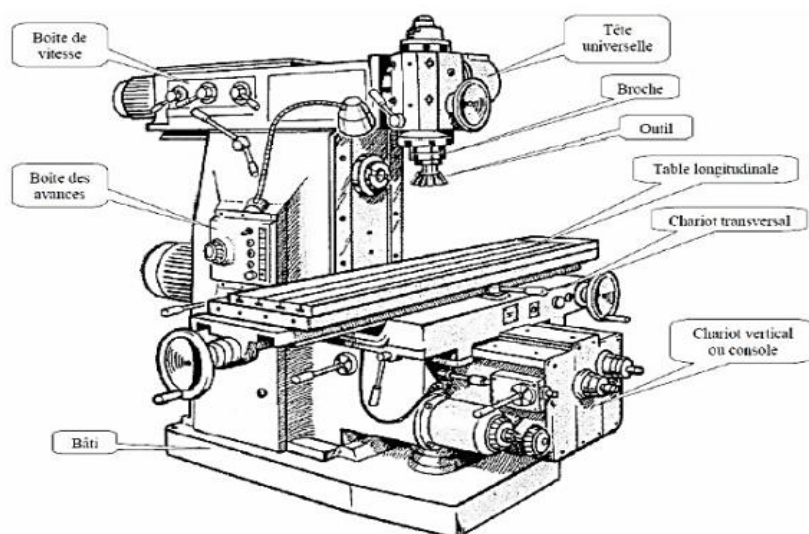
IV.1. Matériels utilisés:

IV.1.1. Fraiseuse universelle

Une fraiseuse universelle à trois axes linéaires a été utilisée dans ce travail (Figures Figure.IV.1 et Figure.IV.2)



Figure.IV.1. Fraiseuse universelle



Chapitre IV : – Procédure expérimentale

Figure.IV.2.Composants de fraiseuse universelle

IV.1.2.Comparateur FY1001A:

Une liste complète d'instruments de mesure pour la métrologie des machines-outils a été recommandée par ISO 230-11, parmi lesquels les instruments optiques les plus fréquemment utilisés sont l'interféromètre laser pour la mesure d'erreur géométrique individuelle et l'auto collimateur pour mesurer l'erreur angulaire de lacet. Ces instruments optiques commerciaux sont très coûteux.

Dans ce travail, les mesures en été effectuées en utilisant un comparateur digital avec une course de 12 mm et une résolution 0,001 mm (Figure.IV.3).

La précision du comparateur électronique est de $\pm 6 \mu\text{m}$. Bénéficiant d'une sortie de données, il dispose d'un cadran de 60 mm de diamètre et d'un canon 8 mm pour l'accroche à un bras magnétique. Le grand afficheur du comparateur digital est de taille 35x15 mm avec un auteur des chiffres 8 mm.



Figure.IV.3. Comparateur digital

IV.2.Procédure expérimentale

Pour mesurer les erreurs de rectitudes (Figure.IV.4), trois positions de mesure suivant l'axe X ($t_y=-100\text{mm}$, $t_y=-40\text{mm}$, $t_y=100\text{mm}$) ont été choisis. Au début de chaque cycle de mesure, le comparateur à cadran est remis à zéro. La table de la machine a été déplacée suivant l'axe X avec un incrément de 46 mm jusqu'à la fin de la course (460mm) en cumulant un totale de 10 mesures par position.

Chapitre IV : – Procédure expérimentale



Figure.IV.4. Installation du comparateur digital sur la machine.

La même procédure a été effectuée sur l'axe Y mais avec différentes positions ($t_x = -15\text{mm}$, $t_x = -10\text{mm}$, $t_x = 10\text{mm}$). La table de la machine a été déplacée avec un incrément de 50 mm sur une course de 250mm avec un totale de 5 cibles pour chaque position.

CHAPITRE V

Analyse et discussion des résultats

Chapitre V : ————— Analyse et discussion des résultats

Dans cette partie on présente les graphes des résultats expérimentaux unidirectionnelles des écarts rectitudes de la machine-outil fraiseuse suivant les deux axes X et Y avec leur moyennes, les répétabilités de positionnement et les reproductibilités des données.

Dans ce chapitre, on présente les résultats expérimentaux des écarts de rectitudes pour les deux axes (X et Y) de la machine. Des exemples de la répétabilité de positionnement ont été présentés au début de ce chapitre.

V.1. Analyse de la répétabilité des résultats

a) Résultat de L'axe X

La figure V.1 présente l'erreur de rectitude le long de la position $t_y = -100\text{mm}$. L'allure des résultats montre que cette erreur est inférieure au début puis augmente progressivement (négativement) avec l'augmentation de la position jusqu'à la fin de la course (-460mm). Autrement dit, l'écart de rectitude suit une tendance linéaire avec une pente négative, il varie dans un intervalle de 0.035mm (figure V.1). Il est également clair que tous les points des données sont à l'intérieur des deux courbes de répétabilité ($2 \times \sigma$).

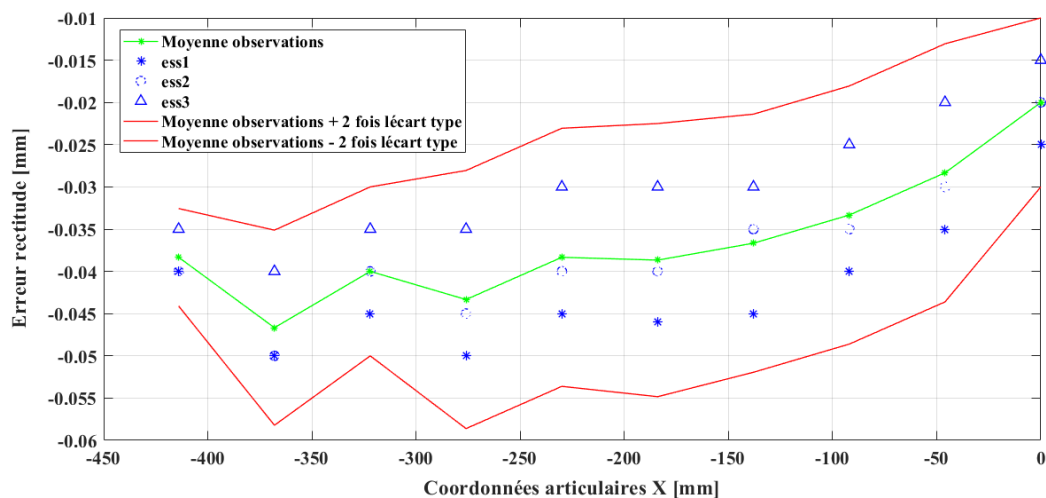


Figure V.1: Erreur de rectitude suivant l'axe X dans la position -100mm

Il est à noter que l'erreur de rectitude de tout axe peut être définie comme la distance entre deux lignes parallèles qui contiennent juste tous les points le long de l'axe et sont parallèles à la direction générale de l'axe.

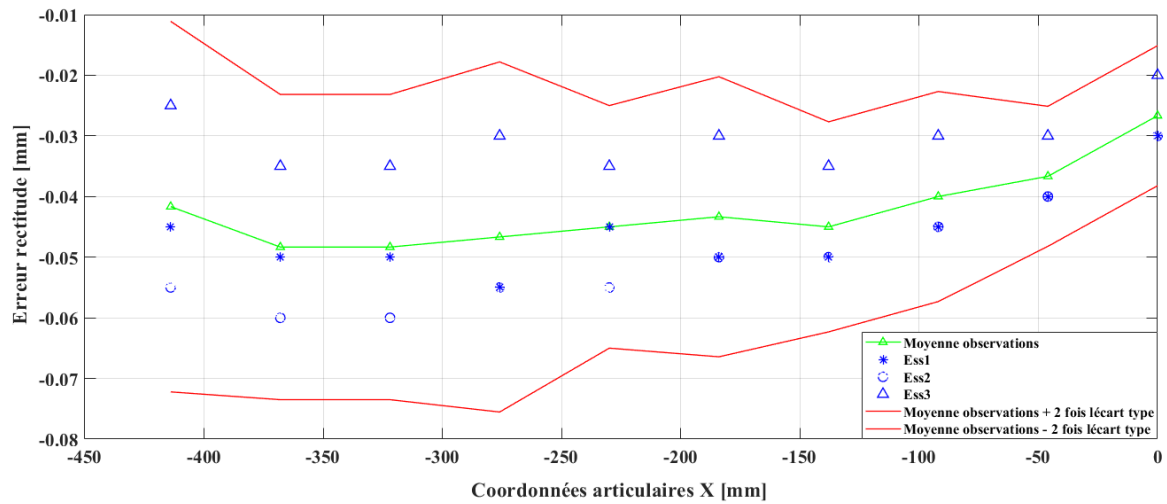


Figure V. 2. Erreur rectitude suivant l'axe X dans la position -40mm

Figure V.2. montre l'erreur de rectitude à la position -40 mm. Cette figure montre que l'erreur de rectitude suit la même tendance que la figure précédente mais avec une plus mauvaise répétabilité.

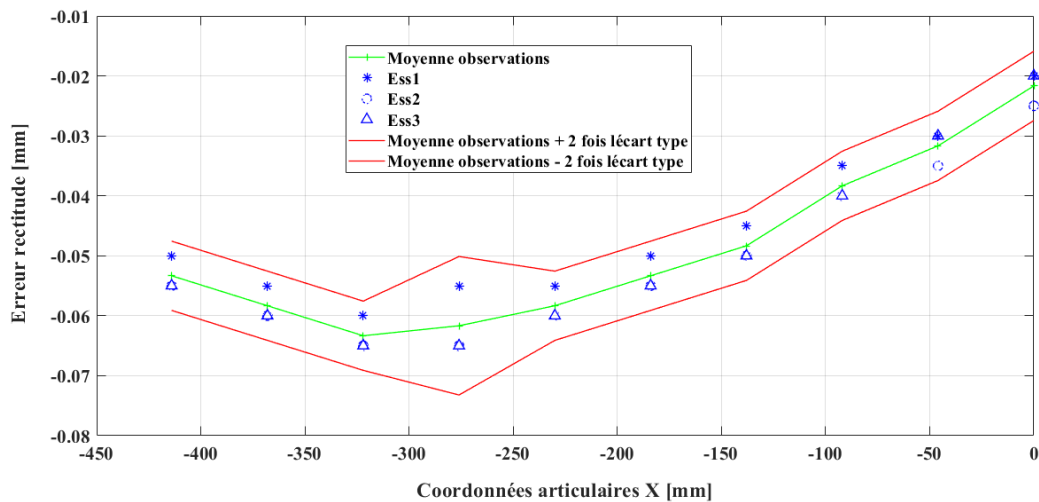


Figure V.3. Erreur rectitude suivant l'axe X dans la position 100mm

À la troisième position ($X = 100$ mm), les résultats montrent que la machine a une meilleur répétabilité (Figure V.3).

Chapitre V : ————— Analyse et discussion des résultats

b) Résultat de L'axe Y

Les résultats de l'axe Y montrent que les erreurs de rectitudes dans les trois positions de mesures choisies ont la même allure (Figures V.4-V.6). Cette axe présente également une répétabilité meilleure en comparaison avec l'axe X.

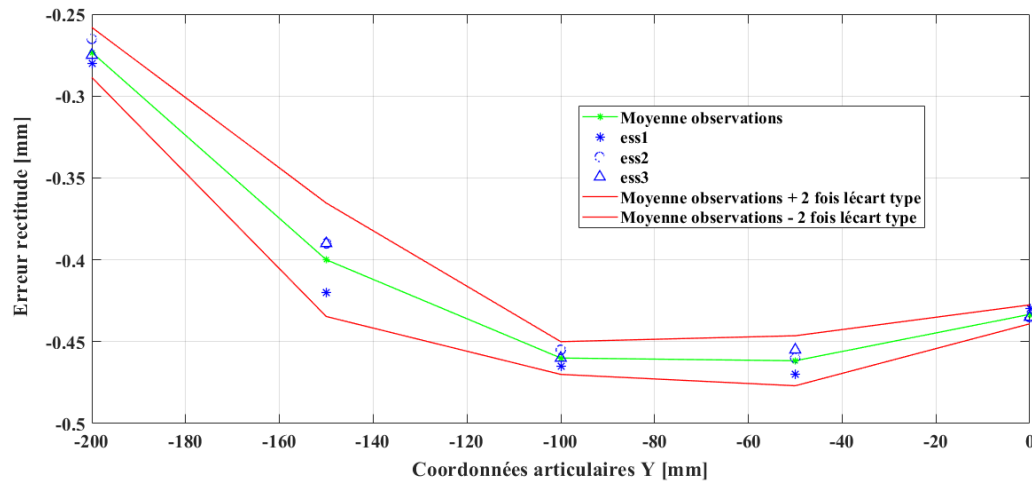


Figure V.4 : Erreur de rectitude suivant l'axe Y dans la position -15mm

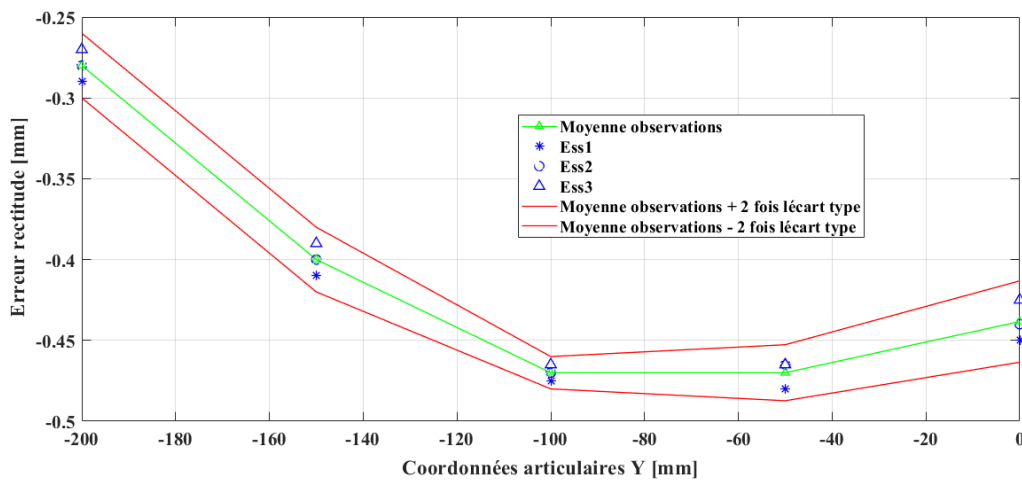


Figure V.5. Erreur de rectitude suivant l'axe Y dans la position -10mm

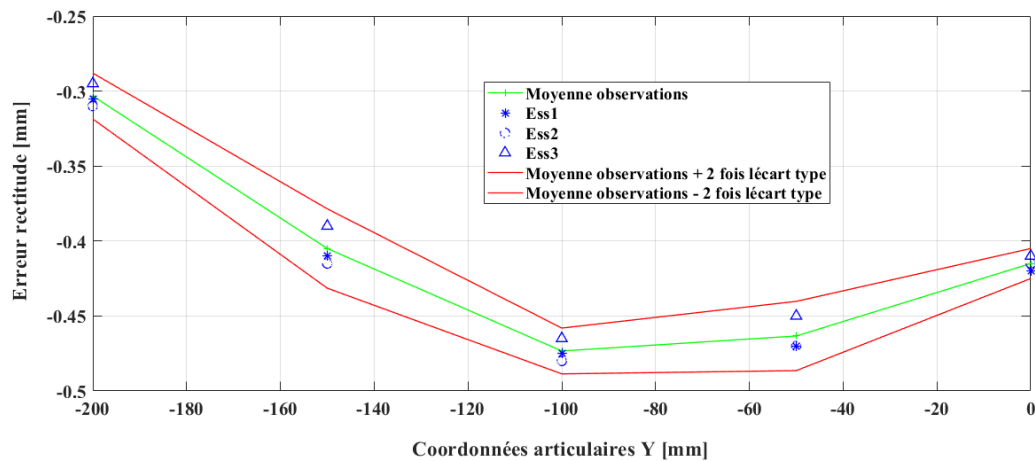


Figure V.6. Erreur rectitude suivant l'axe Y dans la position 10mm

V.2. Estimation de l'erreur de rectitude et les erreurs angulaire selon le principe de Bryan.

Le principe de Bryan dit que la distance entre l'axe fonctionnel et le l'axe de référence (ligne droite) peut être appelé le décalage de Bryan (t_y). L'angle de roulis de la glissière provoquera la mesure de rectitude verticale du comparateur à cadran par la quantité de $t_y * \epsilon_x$. C'est une erreur typique de Bryan.

La résolution de l'équation de Bryan nécessite trois positions de mesure différentes le long de l'axe étudié sur la machine.

Pour l'axe X nous avons :

$$E_{ZX}^M 1 = E_{ZX} - E_{BX} * t_X 1 + E_{AX} * t_Y 1 \quad (1)$$

$$E_{ZX}^M 2 = E_{ZX} - E_{BX} * t_X 2 + E_{AX} * t_Y 2 \quad (2)$$

$$E_{ZX}^M 3 = E_{ZX} - E_{BX} * t_X 3 + E_{AX} * t_Y 3 \quad (3)$$

Où les E_{ZX}^M sont les écarts de rectitudes mesurés et E_{ZX} , E_{BX} et E_{AX} sont les écarts à estimer.

Si on applique la forme matricielle on a :

$$\begin{bmatrix} E_{ZX}^M 1 \\ E_{ZX}^M 2 \\ E_{ZX}^M 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -t_X 1 & t_Y 1 \\ 1 & -t_X 2 & t_Y 2 \\ 1 & -t_X 3 & t_Y 3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_{ZX} \\ E_{BX} \\ E_{AX} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donc ça implique :

Chapitre V : ————— Analyse et discussion des résultats

$$\begin{bmatrix} E_{ZX} \\ E_{BX} \\ E_{AX} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -t_{X1} & t_{Y1} \\ 1 & -t_{X2} & t_{Y2} \\ 1 & -t_{X3} & t_{Y3} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} E_{ZX}^M 1 \\ E_{ZX}^M 2 \\ E_{ZX}^M 3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Après la résolution du système linéaire, les erreurs estimées sont présentées aux figures V.7-V.9.

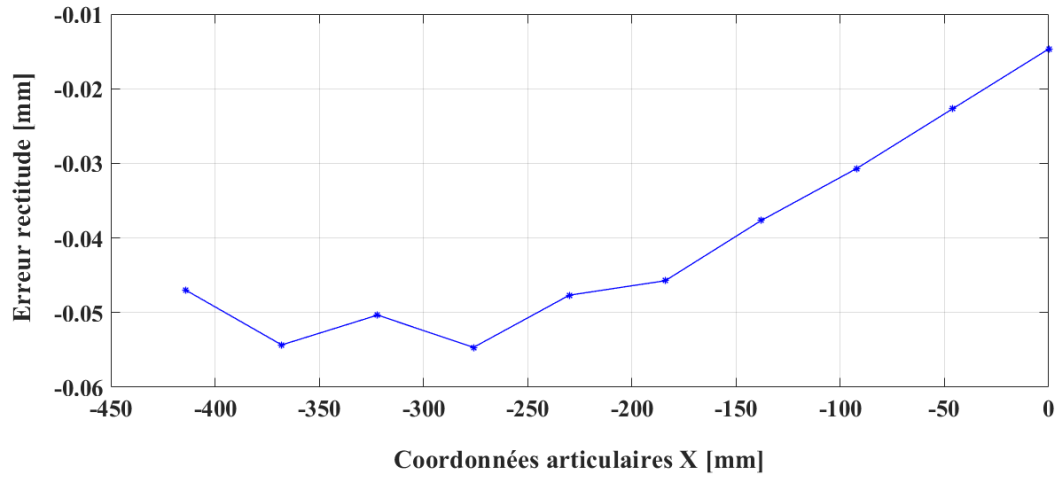


Figure V.7. Erreur de rectitude verticale estimée suivant l'axe X (E_{ZX})

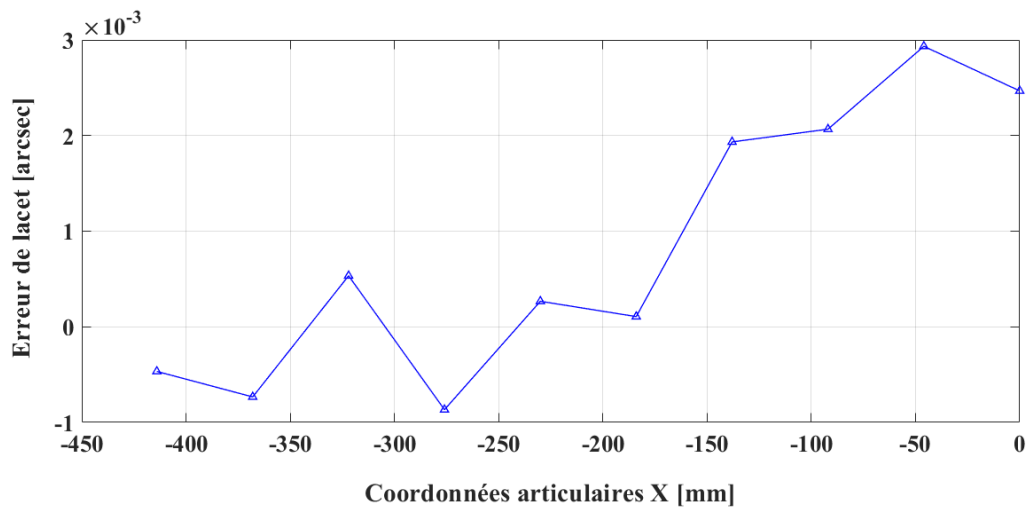


Figure V.8. Erreur de lacet estimée suivant l'axe X (E_{BX})

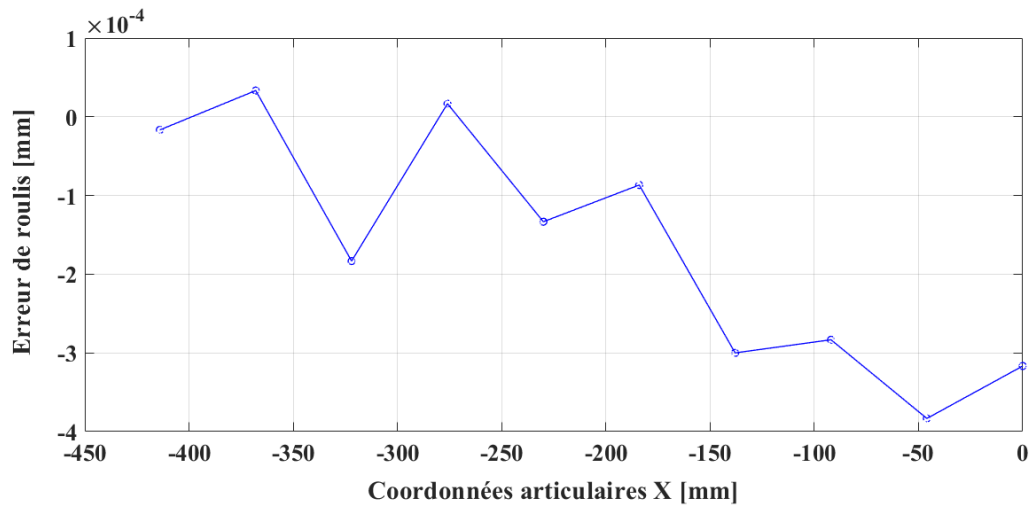


Figure V.9. Erreur de roulis estimée suivant l'axe X (E_{AX})

Pour l'axe Y les équations deviennent

$$E_{ZY}^M 1 = E_{ZY} - E_{BY} * t_X 1 + E_{AY} * t_Y 1 \quad (6)$$

$$E_{ZY}^M 2 = E_{ZY} - E_{BY} * t_X 2 + E_{AY} * t_Y 2 \quad (7)$$

$$E_{ZY}^M 3 = E_{ZY} - E_{BY} * t_X 3 + E_{AY} * t_Y 3 \quad (8)$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} E_{ZY}^M 1 \\ E_{ZY}^M 2 \\ E_{ZY}^M 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -t_X 1 & t_Y 1 \\ 1 & -t_X 2 & t_Y 2 \\ 1 & -t_X 3 & t_Y 3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_{ZY} \\ E_{BY} \\ E_{AY} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Le système est sous la forme $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, la solution retournée est celle des moindres carrés.

$$\begin{bmatrix} E_{ZY} \\ E_{BY} \\ E_{AY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -t_X 1 & t_Y 1 \\ 1 & -t_X 2 & t_Y 2 \\ 1 & -t_X 3 & t_Y 3 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} E_{ZY}^M 1 \\ E_{ZY}^M 2 \\ E_{ZY}^M 3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Les erreurs estimées sont présentées aux figures 10-12.

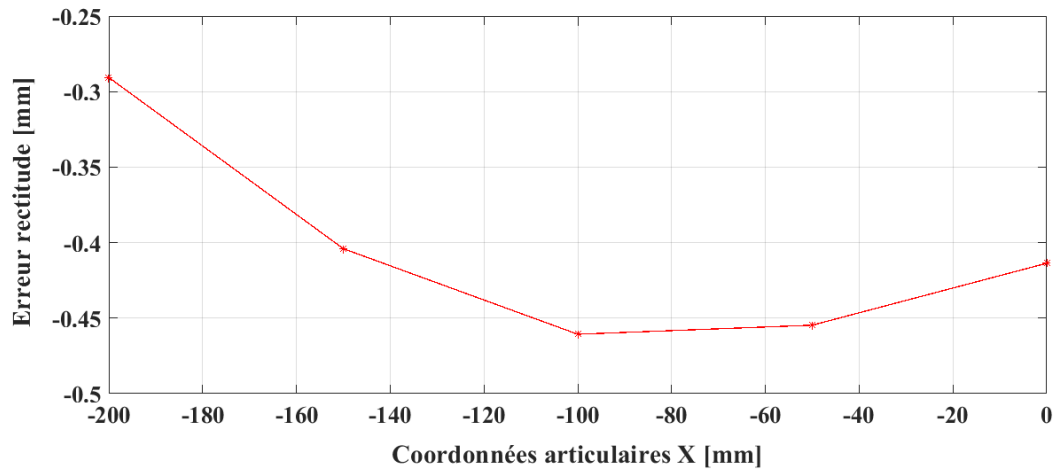


Figure V.10. Erreur rectitude verticale estimée suivant l'axe Y (E_{ZY})

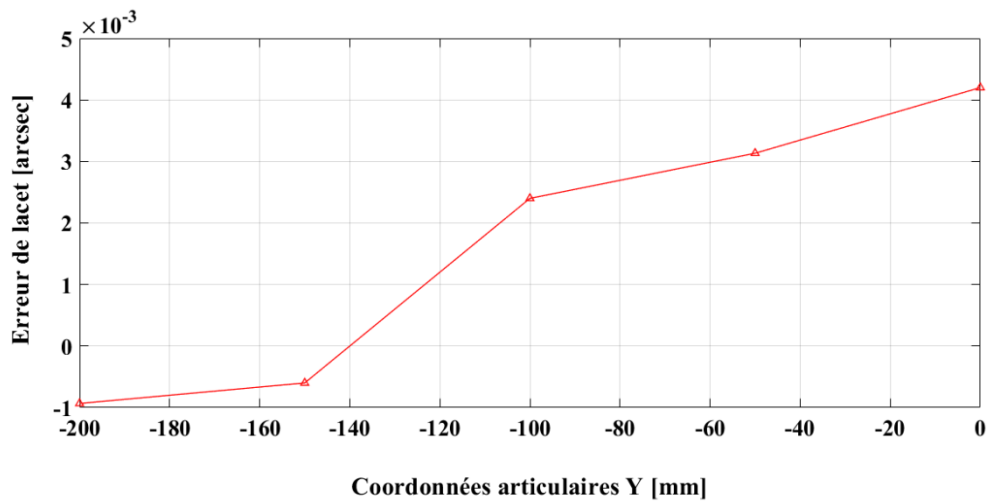


Figure V.11. Erreur de lacet estimée suivant l'axe Y (E_{AY})

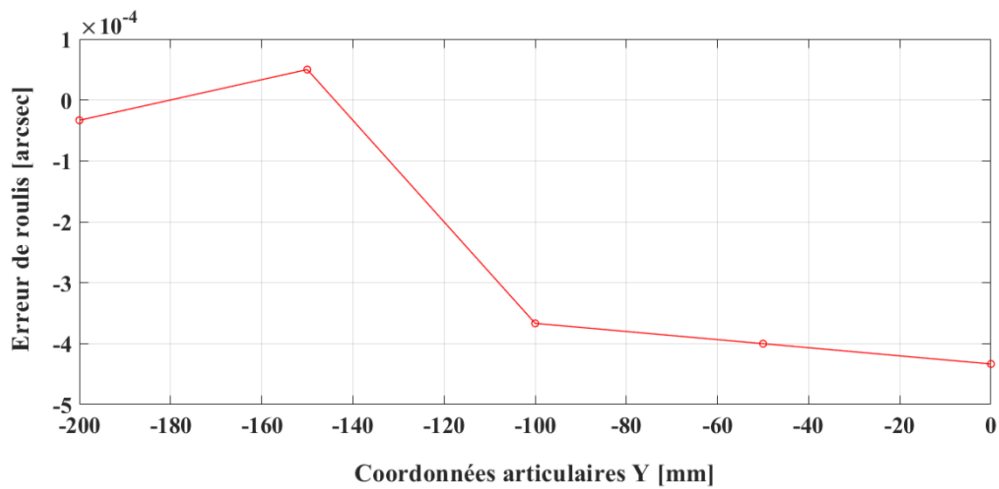


Figure V.12. Erreur de roulis estimée suivant l'axe Y (E_{BY})

Chapitre V : ————— Analyse et discussion des résultats

V.3. Estimation de l'erreur de positionnement linéaire au niveau de l'encodeur linéaire et les erreurs angulaires (lacet et tangage).

Si l'encodeur linéaire (l'échelle linéaire) a sa propre erreur de positionnement e_{xx} , alors, selon le principe d'Abbe, l'erreur de positionnement au bout d'outil (TCP) sera :

$$E_{XX} = e_{XX} - E_{CX} \times t_{ya} + E_{BX} \times t_{za} \quad (11)$$

Où E_{XX} est l'erreur de positionnement linéaire mesuré, E_{CX} est l'erreur angulaire de tangage et E_{BX} est l'erreur angulaire de lacet. Les t_{ya} et t_{za} sont les décalages d'Abbé.

Pour identifier les trois inconnus (e_{xx} , E_{CX} et E_{BX}) dans l'équation précédente 3 équations (3 mesures) avec différents décalages d'Abbé sont nécessaires.

Vue le manque d'instrumentation pour mesurer les erreurs de positionnement linéaires l'identification des trois erreurs précédentes n'est pas accomplie.

CONCLUSION

Conclusion :

Conclusion

Les guides linéaires sont largement utilisées dans les machines-outils et autres équipements de précision. Ce sont des dispositifs qui permettent de déplacer de façon longitudinale des objets ou des charges. Les guidages linéaires sont donc des éléments de guidage pour des mouvements en translation.

Les machines-outils à trois axes de type série normale utilisent souvent des guides linéaires pour fournir des mouvements dans les directions X, Y et Z. La machine à mesurer tridimensionnelle traditionnelle est construite avec des structures similaires. Cependant, chaque axe contient plusieurs erreurs géométriques causées par des erreurs de fabrication des pièces et des erreurs d'assemblage. De plus, chaque guidage comporte des erreurs de roulis et de lacet inévitables avant ou après l'assemblage.

Dans ce travail la relation entre l'erreur de rectitude du rail de guidage et l'erreur de mouvement du chariot a été étudiée et analysé. La corrélation entre l'erreur de rectitude mesurée et l'erreur de mouvement angulaire a été également clarifiée. Sur la base des principes de Bryan et d'Abbé, une méthode d'identification des erreurs de rectitude et de mouvement angulaire pour un axe linéaire est présentée.

Le tangage et le lacet peuvent être dérivés de la mesure de l'erreur de déplacement linéaire sur deux lignes parallèles pour chaque axe. Les erreurs de roulis peuvent être dérivées des erreurs de rectitude sur deux plans parallèles. En se basant sur les principes de Bryan et d'Abbé, des formules pour calculer ces composantes d'erreur en un point particulier sont données. Les expériences montrent que cette méthode est économique, simplifie l'étalonnage de la machine, réduit l'équipement nécessaire et peut améliorer la précision.

RÉFÉRENCES

Références

- [1] FERREIRA, Placid Mathew et LIU, C. Richard. A method for estimating and compensating quasistatic errors of machine tools. 1993.
- [2] KIRIDENA, V. S. B. et FERREIRA, Placid Mathew. Kinematic modeling of quasistatic errors of three-axis machining centers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1994, vol. 34, no 1, p. 85-100.
- [3] LI, Yi-Tsung et FAN, Kuang-Chao. A novel method of angular positioning error analysis of rotary stages based on the Abbe principle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2018, vol. 232, no 11, p. 1885-1892.
- [4] DRESCHER, Joseph. Analytical estimation of measurement uncertainty in surface plate calibration by the Moody method using differential levels. *Precision engineering*, 2003, vol. 27, no 3, p. 323-332.
- [5] BRYAN, J. B. A simple method for testing measuring machines and machine tools Part 1: Principles and applications. *Precision engineering*, 1982, vol. 4, no 2, p. 61-69.
- [6] HUANG, Y. B., FAN, K. C., LOU, Z. F., et al. A novel modeling of volumetric errors of three-axis machine tools based on Abbe and Bryan principles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, vol. 151, p. 103527.
- [7] OKAFOR, Anthony Chukwuekwu et ERTEKIN, Yalcin M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40, no 8, p. 1199-1213.
- [8] ABBASZADEH-MIR, Yousefali, MAYER, J. R. R., CLOUTIER, Guy, et al. 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*, 2002, vol. 40, no 18, p. 4781-4797.
- [9] Metrology of five-axis machine tools by ball bar and chain lock cinematic. © seyedhossein hajzargarbashi, 2008.
- [10] GAO, W., HAITJEMA, H., FANG, F. Z., et al. On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, no 2, p. 843-866.
- [11] Development of a real-time machine tool error measurement system multi-axis for active compensation. Nouredine Barka. January 2005.

Références :

- [12] Woody BA, Smith KS, Hocken RJ, Miller JA, (2007) A technique for enhancing machine tool accuracy by transferring the metrology reference from the machine tool to the workpiece. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME.* 129/3:636-643
- [13] ISO, Organisation Internationale de Normalisation. *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration--Représentation et échange de données de produits--Partie 203: Protocole d'application: Conceptions 3D contrôlées de configuration de pièces mécaniques et des assemblages.* 2005.
- [14] OKAFOR AC, Ertekin YM. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2000; 40:1199–213.
- [15] ISO 230–1: 2012. *Test Code for Machine Tools–Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating Under No-Load or Quasi-Static. Conditions;* International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2012.
- [16] YANG, J.; FENG, Q. Research progress on volumetric geometric error measurement of numerical control (NC) machine tools. *Chin. J. Sci. Instrum.* **2017**, 38, 1901–1911. (In Chinese)
- [17] WU, Y.; SHEN, H.; SUN, X.; WANG, D. 5D error prediction model for elastic prismatic pair of machine tool. *J. Huahong Univ. Sci. Technol. Nat. Sci. Ed.* **2019**, 47, 121–126. (In Chinese)
- [18] TONG, V.; KWON, S.; HONG, S. Modeling of moving table with linear roller guides subjected to geometric errors in guide rails. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **2020**, 21, 1903–1919.
- [19] SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; HAITJEMA, H.; Weckenmann, A.; Schmitte, R.; Delbressine, F. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *Cirp Ann.* **2008**, 57, 660–675.
- [20] NI, Y.; ZHOU, H.; SHAO, C.; LI, J. Research on the error averaging effect in a rolling guide pair. *Chin. J. Mech. Eng.* **2019**, 32, 72.
- [21] RAHMANI, M.; BLEICHER, F. Experimental and numerical studies of the influence of geometric deviations in the performance of machine tools linear guides. *Procedia CIRP* **2016**, 41, 818–823.
- [22] MAHBUBUR RAHMAN. Modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy Linnanmaa, on June 4th, 2004, at 12 noon.

Références :

- [23] R. HOCKEN, J. A. SIMPSON, B. BORCHARDT, J. LAZAR, C. REEVE, ET P. STEIN, "Three dimensional metrology," *Annals of the CIRP*, vol. 26, no. 2, pp. 403-408, 1977.
- [24] G. H. J. FLORUSSEN, F. L. M. DELBRESSINE, M. J. G. VAN DE MOLENGRAFT, ET P. H. J. SCHELLEKENS, "Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three dimensional length measurements," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 30, no. 4, pp. 241-255, 2001.
- [25] PERREIRA PH, HOCKEN R.J., 2007, Characterization and Compensation of Dynamic Errors of a Scanning Coordinate Measuring Machine, *Precision Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 22-32, ISSN 0141-6359.
- [26] W. T. LEI ET Y. Y. HSU, "Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probeball. Part I: Design and modeling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 10, pp. 1153-1162, 2002.
- [27] R. RAMESH, M.A. MANNAN A.N. POO. Error compensation in machine tools à review. Received 7 July 1999; received in revised form 22 December 1999; accepted 14 January 2000.
- [28] WEEKERS W.G., 1996, Compensation for Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines, Eindhoven, Netherland, Eindhoven University of Technology, Doctoral Thesis.
- [29] M. PRIEL, *Les Robots Industriels, Caractéristiques, Performances et Choix : AFNOR Technique*, 1990.
- [30] AGILENT 5530, Dynamic calibrator, verify machine performance with the world standard for laser based technology, Agilent Technologies.
- [31] ISO 10791-6 K2: test conditions for machining centres_ part 6 : Accuracy of speeds and interpolations.
- [32] ISO 230-4. Test code for machine tools – Part 4: circular tests for numerically controlled machine tools.
- [33] YANG, S.-H., KIM, K.-H., PARK, Y. K., et al. Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 23, no 7, p. 495-500.
- [34] ISO 230-7:2006.
- [35] ABBE, E. Messapparate für physiker. *Z. Instrum.* **1890**, 10, 446–448.

Références :

- [36] BIRAL, Francesco et BOSETTI, Paolo. On-line measurement and compensation of geometrical errors for Cartesian numerical control machines. In : 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006. IEEE, 2006. p. 120-125.
- [37] SRIVASTAVA, A. K., VELDHUIS, S. C., et ELBESTAWIT, M. A. Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, vol. 35, no 9, p. 1321-1337.
- [38] EKINCI, T. O. et MAYER, J. R. R. Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, no 12-13, p. 1997-2004.
- [39] AHN, Kyoung-Gee, MIN, Byung-Kwon, et PASEK, Zbigniew J. Modeling and compensation of geometric errors in simultaneous cutting using a multi-spindle machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 29, no 9, p. 929-939.
- [40] FAN, K. C., WANG, T. H., WANG, C. H., et al. Development of an Abbé Error compensator for NC machine tools. In : Proc. 37th MATADOR Conf., Manchester. 2012. p. 105-108.
- [41] LOU ZF. Fan KC. (2019) Optical Sensors for Machine Tool Metrology. In: Gao W. (eds) *Metrology. Precision Manufacturing.* Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4912-5_4-1.