

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific R  
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 productique

Présenté par :

**DJAHHEL Elaid & ABBOU Abdallah**

### Thème

Modélisation des erreurs de positionnement induites thermiquement d'une articulation prismatique d'une machine-outil à commande numérique.

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
FARSI Chouki	MCA	Président
SLAMANI Mohamed	Prof	Encadreur
BOUDILMI Aissa	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2020

# Remerciement

En premier lieu, nous remercions **ALLAH** le tout puissant, qui nous a aidé à terminer ce travail et nous a facilité la tâche.

Nous adressons également nos sincères remerciements au supervisant de ce travail Dr. SLAMANI Mohamed et MECHTA Ahlem qui nous ont aidés par ses conseils et ses orientations.

Nous remercions aussi les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nous remercions également tous ceux qui nous ont dirigés, que ce soit de près ou de loin.

**Merci beaucoup...**

# Dédicas

*Je dédie cette mémoire à...*

**À ma très chère mère Mehaya Lamria**

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

**À mon très cher Père Bouzid**

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

**À mes très chers frères Karim, Yaakoub et Oussama**

Mes chers frères qui me sont le père et la mère, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mon ange gardien et mon fidèle Compagnon dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

**À mes très chères sœurs Hadjer et Imen**

Présent dans tous mes moments d'examens par son soutien moral et ses belles surprises sucrées. Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

**À tous les membres de ma famille Djahel, Mehaya et Djeddi**

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

**À mes chers amis**

Oussama, Zaki, Aymen

Elaid

# Dédicas

## Je dédie cette mémoire à...

### **À ma très chère mère Gattouche Fatima Zohra**

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

### **À mon très cher Père Abdelkader**

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

### **À mes très chers frères Bilel et Seydali**

Mes chers frères qui me sont le père et la mère, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mon ange gardien et mon fidèle Compagnon dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

### **À mes très chères sœurs Souad et Ahlem**

Présent dans tous mes moments d'examens par son soutien moral et ses belles surprises sucrées. Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

### **À tous les membres de ma famille Abbou, Gattouche, petits et grands**

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

### **À mes chers amis**

Abdenmour, Tarek, Abdelhak, Mossaab, Omar, Nasro, Walid

**Aboud**

# Table des matières

Remerciement

Sommaire

Listes des figures

Introduction : ..... 1

## CHAPITRE I

### ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUES

I.1. Erreur des machines-outils..... 4

I.1.1. Erreurs géométriques ..... 4

I.1.2. Erreurs thermiques..... 5

I.2. Sources de chaleur dans les machines-outils : ..... 6

I.2.1. Les sources internes : ..... 6

I.2.2. Les sources externes : ..... 7

I.3. Mesure des erreurs thermiques ..... 7

I.3.1. L'interféromètre laser : ..... 8

I.3.2. Barre à billes (Ballbar) ..... 9

I.3.3. LBB 3D : ..... 10

I.3.4. R-test pour l'évaluation de la précision des axes rotatifs : ..... 12

I.3.5. Capteur de proximité CAPABILLE : ..... 13

I.3.6. Encodeur planaire KGM : ..... 14

I.4. Modélisation des erreurs thermiques : ..... 14

## CHAPITRE II

### PROTOCOLE DE MESURE DIRECTE DES ERREURS LINEAIRES PAR INTERFEROMETRE LASER

II. Principes d'interférométrie : ..... 17

II.1 L'interféromètre de Michelson : ..... 17

II.2 Composants de base : II.2.1 Laser XL-80 : ..... 19

II.2.2 Compensateur XC-80 et ses capteurs : ..... 19

II.2.3 Trépied et plate-forme : ..... 20

II.2.4 Mallettes système ..... 21

II.3 Montage de l'optique linéaire : ..... 22

<b>II.3.1</b>	<b>Positionnement correct de l'optique pour minimiser les erreurs de mesure :....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Alignement du faisceau linéaire :.....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.3</b>	<b>Positionnement de l'interféromètre linéaire et du réflecteur :.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.3.1</b>	<b>Procédure d'alignement linéaire simple :.....</b>	<b>28</b>
<b>II.3.3.2</b>	<b>Procédure d'alignement accélérée :.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.3.3</b>	<b>Réglage de faisceau vertical.....</b>	<b>30</b>
<b>II.3.3.4</b>	<b>Réglage de faisceau horizontal.....</b>	<b>31</b>

### **CHAPITRE III**

#### **METHODOLOGIE ET ASPECT EXPERIMENTAL**

<b>III.1</b>	<b>Matériel utilisé.....</b>	<b>34</b>
<b>III.2</b>	<b>Procédure de mesure.....</b>	<b>36</b>

### **CHAPITRE IV**

#### **PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION**

<b>IV.1</b>	<b>Présentation des résultats .....</b>	<b>39</b>
<b>IV.2</b>	<b>Modélisation de l'effet thermique .....</b>	<b>42</b>
<b>Conclusion</b>	<b>.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>48</b>
<b>Résume.....</b>		<b>Er</b>

**reur ! Signet non défini.**

## Listes des figures

### CHAPITRE I

Figure I.1 Erreurs dans les axes contrôlés : a) axe linéaire, b) axe rotatif. ....	5
Figure I.2 Sources thermiques possibles. ....	6
Figure I.3 Configuration matérielle de l'interféromètre laser 1D pour les mesures linéaires. ...	8
Figure I.4 Mesure des erreurs des machines-outils au moyen d'instruments Ballbar : a) QC20-W et b) DBB 110 . ....	9
Figure I.5 Résultats de test de rondeur exemplaires . ....	9
Figure I.6 LBB 3D : a) structure b) LBB 3D pendant la mesure [19], c) mesure de l'axe linéaire et de rotation erreurs au moyen du système ETALON Laser TRACER-MT .....	10
Figure I.7 Transformation des résultats en système de coordonnées cartésien . ....	11
Figure I.8 Barre vectorielle : a) avec capteurs de mesure d'angle séparés, b) pour mesurer cinq coordonnées. ....	11
Figure I.9 Configurations d'appareils basées sur le principe du test R : a) Appareil de test R fabriqué par IBS Precision Engineering . , b) prototype fonctionnel du dispositif de test R [26], c) dispositif HMS fabriqué par Fidia .....	12
Figure I.10 Capteurs et bille en position engagée .....	13
Figure I.11 Schéma d'essai de KGM sur une machine-outil .....	14

### CHAPITRE II

Figure II.1 Mesure par l'interféromètre laser.....	17
Figure II.2 Un interféromètre de base de Michelson, sans compter la source optique et le détecteur .....	18
Figure II.3 Laser XL-80 .....	19
Figure II.4 Compensateur XC-80 et ses capteurs . ....	20
Figure II.5 Trépied .....	21
Figure II.6 Mallette pour système complet (plateau retiré). ....	22
Figure II.7 Montage de l'optique linéaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage..	23
Figure II.8 Mesure de positionnement linéaire de l'axe X sur un centre d'usinage vertical . .	23

Figure II.9 Optique linéaire montée sur une machine CMM .....	24
Figure II.10 l'interféromètre linéaire servant d'optique stationnaire et le rétro-réflecteur d'optique mobile .....	25
Figure II.11 Un faisceau de diamètre réduit facilite la visualisation des alignements erronés.	25
Figure II.12 Réflecteur linéaire.....	26
Figure II.13 Le faisceau laser frappe le centre de la cible sur le canon .....	26
Figure II.14 réflecteur de référence .....	27
Figure II.15 interféromètre linéaire .....	27
Figure II.16 la cible de l'interféromètre linéaire .....	28
Figure II.17 le réflecteur s'éloigne de l'interféromètre.....	29
Figure II.18 Déplacement de la machine jusqu'à ce que vous constatiez que le faisceau s'éloigne de la cible. ....	30
Figure II.19 ajustement le pas de rotation.....	30
Figure II.20 monter ou descendre la tête laser pour amener les deux faisceaux au centre. ....	30
Figure II.21 ajustement le lacet angulaire de la tête laser. ....	31
Figure II.22 effectuer une translation horizontale du laser et amener les deux faisceaux au centre de la cible .....	31
Figure II.23 Déplacement de rétro-réflecteur sur la course complète de la machine .....	32

### CHAPITRE III

Figure III.1 Montage du laser Renishaw pour les essais le long de l'axe X de la MOCN Matsuura MC.760 VX.....	34
Figure III.2 Tête laser montée sur le trépied universel .....	35

### CHAPITRE IV

Figure IV.1 Variation de la température de l'air durant le test. ....	40
Figure IV.2 Variation de la pression atmosphérique durant le test.....	40
Figure IV.3 Variation de l'humidité de l'air durant le test .....	41
Figure IV.4 Erreurs de déplacement linéaire sur l'axe X. ....	42
Figure IV.5 Erreur thermique prédite ( ) pour le premier cycle de mesure. ....	43
Figure IV.6 Comparaison entre les erreurs géométriques statiques mesurées et prédites. ....	44
Figure IV.7 Erreur thermique prédite ( ) pour le premier cycle de mesure. ....	45
Figure IV.8 Erreur de positionnement mesuré et prédite pour le 7eme cycle de mesure. ....	45

# **INTRODUCTION**

### Introduction :

Afin de fournir des produits de haute précision et de bonne qualité, les erreurs dans les processus de fabrication doivent être minimisées. Ces erreurs incluent les erreurs géométriques des composants de la machine, les erreurs thermiques induites par les variations de température, les erreurs de déviation causées par les forces de coupe, les erreurs d'asservissement de l'axe de la machine, les erreurs algorithmiques d'interpolation CN et d'autres erreurs [1]. Parmi elles, les erreurs thermiques représentent 40 à 70 % des erreurs totales [2].

Pour un système d'entraînement par vis à billes, l'erreur thermique de la vis à billes produit directement une erreur de position. Le système de vis à billes est soumis à de grands changements de température des sources de chaleur dans le processus d'usinage, ce qui induit une erreur thermique. Ces effets thermiques peuvent donner lieu à des erreurs volumétriques d'environ 10 à 20 fois la tolérance nominale [3]. Les sources de chaleur peuvent être un écrou, roulements, engrenages, huile hydraulique, embrayages, moteurs ou l'action de coupe elle-même [4]. De plus, pendant la rotation continue de la vis à billes, les roulements et l'écrou produisent beaucoup de chaleur en raison du frottement, provoquant une élévation de température puis conduisant à des erreurs pour la vis. Le frottement entre l'outil et la pièce provoque une chaleur interne additionnelle. Il existe également des facteurs thermiques externes qui affectent la machine comme la variation de la température ambiante, les radiations solaires, les systèmes voisins ...etc. on peut dire généralement tout changement dans l'environnement de la machine.

Divers chercheurs ont mené des études approfondies et des expériences dans une grande variété de conditions dans le but ultime de développer un système thermique en temps réel de compensation d'erreur qui peut être implémenté dans un environnement d'atelier.

Généralement, il existe deux méthodes principales pour minimiser les erreurs thermiques: l'évitement des erreurs et la compensation des erreurs [5,6]. Dans le premier cas, les erreurs thermiques pourraient être minimisées en améliorant la structure des machines-outils, en optimisant la conception mécanique et en améliorant la technologie de fabrication. Bien que la précision de la machine puisse être assurée par cette approche, les coûts seraient également considérablement augmentés. D'autre part, les techniques de compensation d'erreur ont été trouvées comme efficaces et rentables pour améliorer la précision de la machine [7,8].

Pratiquement, les techniques de compensation d'erreur visent à créer une erreur artificielle pour éliminer l'erreur d'origine [9]. La technologie de détection avancée est la prémisse d'une identification précise de l'erreur thermique. L'erreur géométrique ainsi que les erreurs d'origine thermique peuvent être facilement mesurable par l'interféromètre laser.

**CHAPITRE I**  
**ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUES**

## I.1. Erreur des machines-outils

Les sources typiques d'erreurs volumétriques d'une machine-outil sont les erreurs cinématiques de mouvement, les erreurs géométriques de membrures, les erreurs thermomécaniques, les forces de coupe, les forces dynamiques et les erreurs de contrôle. Les erreurs thermomécaniques sont dues aux déformations thermiques de la structure et des différentes pièces de la machine. Ces déformations sont causées par la variation de la température des composantes de la machine, elle-même causée par les sources de chaleur externes et internes à la machine. Ce problème est connu depuis longtemps.

### I.1.1. Erreurs géométriques

L'erreur géométrique est un paramètre qui décrit le mieux de la précision de la machine-outil. Si l'erreur volumétrique est connue pour tout l'espace de travail, on peut augmenter considérablement la précision des pièces fabriquées grâce à sa compensation par le système CNC. Les types et le nombre de composants d'erreur géométrique dépend de la conception de la machine-outil, principalement du nombre d'axes linéaires et de rotation contrôlés. Les erreurs pouvant survenir dans les axes des machines-outils sont représentés sur la (Fig.I.1). Outre ces erreurs, il peut également se produire des erreurs d'équerrage dues à l'impact des erreurs dans un axe sur les erreurs dans un autre axe. Dans le cas d'une machine-outil à trois axes avec trois axes linéaires, il y a 21 composants d'erreurs, dont 3 sont les erreurs d'équerrage des axes X, Y, Z. Les autres composants sont 3 erreurs linéaires (positionnement, rectitude horizontale et verticale) et 3 erreurs angulaires (tangage, lacet, roll) pour chacun des trois axes [10]. De nombreux autres composants d'erreurs géométriques se produisent dans les machines-outils avec un plus grand nombre d'axes. Pour les machines à cinq axes avec deux axes de rotation, le nombre de composants d'erreur peut atteindre 43 [10]. Selon la définition conventionnelle, une erreur géométrique volumétrique dans un espace 3D déterminée par un interféromètre laser 1D est une moyenne efficace des trois erreurs de positionnement dans les axes X, Y, Z [10]. Même si cette erreur volumétrique est minimisée à zéro, cela ne garantit pas la précision attendue de la machine-outil, puisque la définition ci-dessus ne prend pas en compte tous les composants d'erreur.

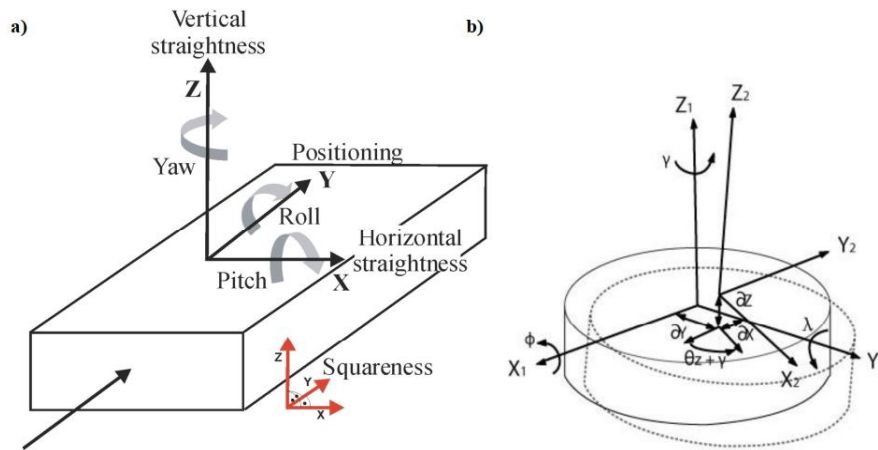


Figure I.1 Erreurs dans les axes contrôlés : a) axe linéaire, b) axe rotatif [11].

### I.1.2. Erreurs thermiques

Les erreurs thermiques des machines-outils, causées par des sources de chaleur internes et externes, sont l'un des principaux facteurs affectant la précision des machines-outils CNC. Les sources de chaleur internes comprennent toutes les sources de chaleur directement causées par la machine-outil et le processus de coupe, telles que les moteurs de broche, le frottement dans les roulements, etc. Les sources de chaleur externes sont attribuées à l'environnement dans lequel se trouve la machine, comme les machines voisines, ouverture / fermeture des portes de l'atelier d'usinage, variation cyclique de la température ambiante de jour comme de nuit et comportement différent selon les saisons. Le comportement thermique complexe d'une machine est créé par l'interaction entre ces différentes sources de chaleur. Les erreurs thermiques représentent jusqu'à 75% de l'erreur de positionnement totale de la machine-outil CNC. La réponse à l'échauffement de la broche est considérée comme la principale composante d'erreur. L'une des méthodes employées pour éviter ce problème consiste à utiliser des matériaux thermiquement stables tels que les plastiques renforcés de fibres, le béton de ciment, etc. Bien qu'il s'agisse de bonnes pratiques pour réduire la déformation de la structure de la machine-outil CNC, elles rendent l'élimination des erreurs très coûteuse et peuvent entraîner d'autres problèmes, tels qu'une augmentation des vibrations ou une accélération plus faible [12].

Les erreurs induites thermiquement sont des facteurs importants affectant la précision des machines-outils. Les erreurs thermiques proviennent généralement des déformations thermiques des éléments de la machine provoquées par les sources de chaleur qui existent à l'intérieur de la structure, c'est-à-dire vis à billes, roulements, écrous, moteurs d'entraînement

d'axes, frottements sur les surfaces, processus de coupe, écoulement de liquide de refroidissement / huile de lubrification et la température ambiante [13-15]. Ces erreurs thermiques ont été signalées comme représentant environ 70% de l'erreur de positionnement totale de la machine-outil, et les erreurs thermiques de la broche ou la dérive de la broche ont été considérées comme la composante d'erreur dominante parmi elles. Les différentes sources d'erreurs thermiques sont présentées à la (Fig.I.2).

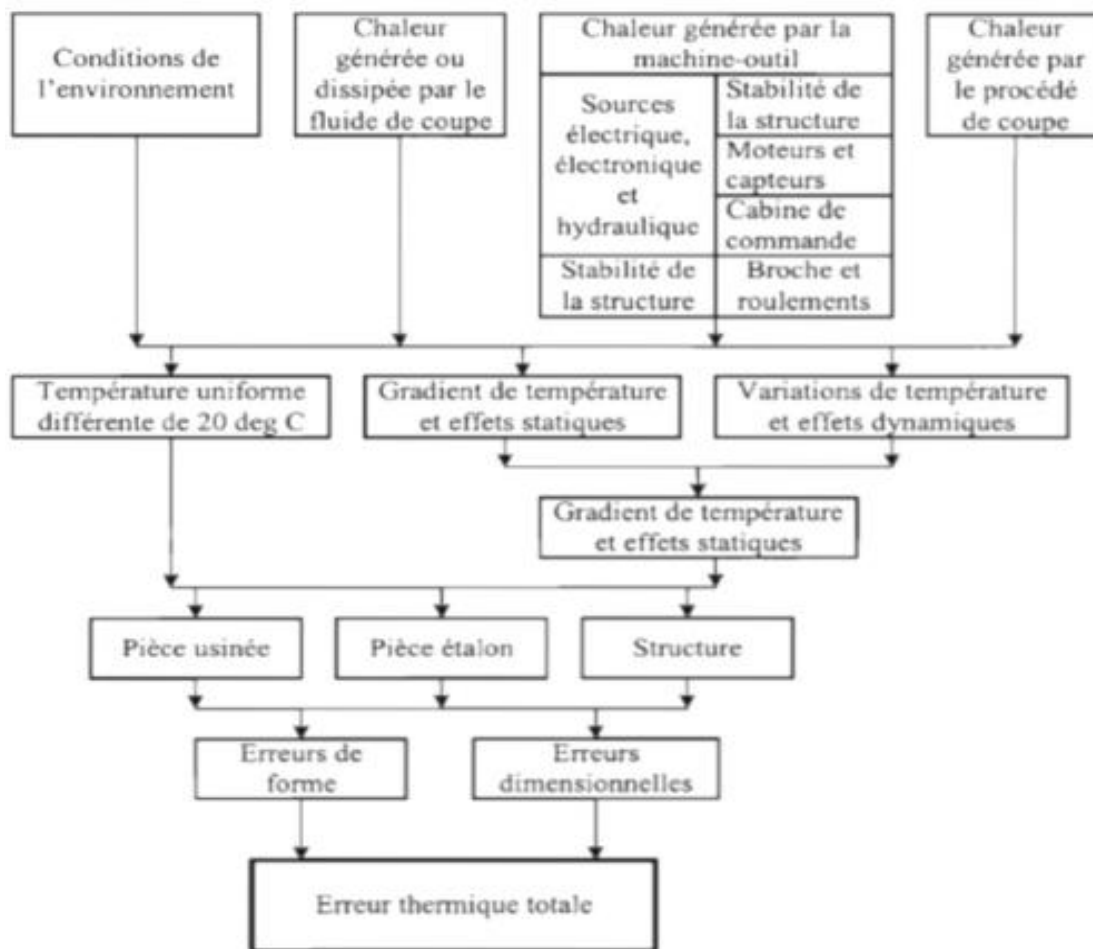


Figure I.2 Sources thermiques possibles [16].

## I.2. Sources de chaleur dans les machines-outils :

Les sources thermiques des machines-outils sont généralement divisées en deux types : source interne et source externe.

### I.2.1. Les sources internes :

Les sources internes incluent le moteur de la broche, la friction du roulement de la broche, le moteur d'entraînement, frottement des glissières, la vis à billes, composants électriques, chaleur induite par la coupe et autres effets similaires. Parmi ces sources, la perte

de puissance du moteur de la broche et la chaleur dû au frottement du roulement de la broche sont les plus importantes sources de chaleur internes. Tant que la broche tourne en permanence durant l'usinage, ces deux sources de chaleur existent toujours, et la dissipation de chaleur interne entraînera des déformations thermiques et des déplacements relatifs des pièces.

Ainsi, ces sources de chaleur ont le grand impact sur l'élévation de température et la déformation thermique des composants de la machine. De plus, la chaleur générée par la coupe affect considérablement la pièce usinée conduisant à une déformation thermique. La chaleur de coupe peut également être transférée de l'outil de coupe au manchon conique de la broche où il la transfère ensuite à l'intérieur de la machine-outil, conduisant à une élévation de la température de la machine-outil et donc une dilatation thermique. La chaleur de coupe évacuée par les copeaux et par le liquide de refroidissement a également un impact sur la température du bâti de la machine, l'établi et les accessoires, provoquant ainsi une déformation thermique et dégradation de la précision d'usinage [17].

### **I.2.2. Les sources externes :**

Les sources de chaleur externes comprennent le changement de température de l'environnement, débit d'air, rayonnement solaire, éclairage, effets géothermiques, chauffage et température corporelle de l'opérateur. Les sources thermiques externes influencent principalement le champ de température et la déformation thermique de l'ensemble de la machine. Bien qu'il y ait peu de changement local, cet impact sur la précision d'usinage ne peut pas être ignoré. L'environnement de travail d'une machine-outil de haute précision doit être celui d'un atelier à température constante pour réduire au maximum l'erreur d'usinage causée par la déformation thermique externe de l'ensemble de la machine [17].

### **I.3. Mesure des erreurs thermiques**

Il existe deux stratégies principales pour réduire les erreurs volumétriques d'une machine-outil à commande numérique, éviter l'erreur et compenser l'erreur. La première stratégie s'applique principalement au niveau de l'étape de conception et de fabrication de la machine, de sorte que les sources d'erreurs soient minimisées. Cependant, cette approche est très coûteuse, implique un degré élevé d'investissement et le coût de la machine augmente exponentiellement avec le niveau de précision demandé.

La deuxième stratégie s'appelle la technique de compensation d'erreurs. Cette stratégie est la plus demandée au niveau industriel, car elle est moins coûteuse et offre des machines-outils

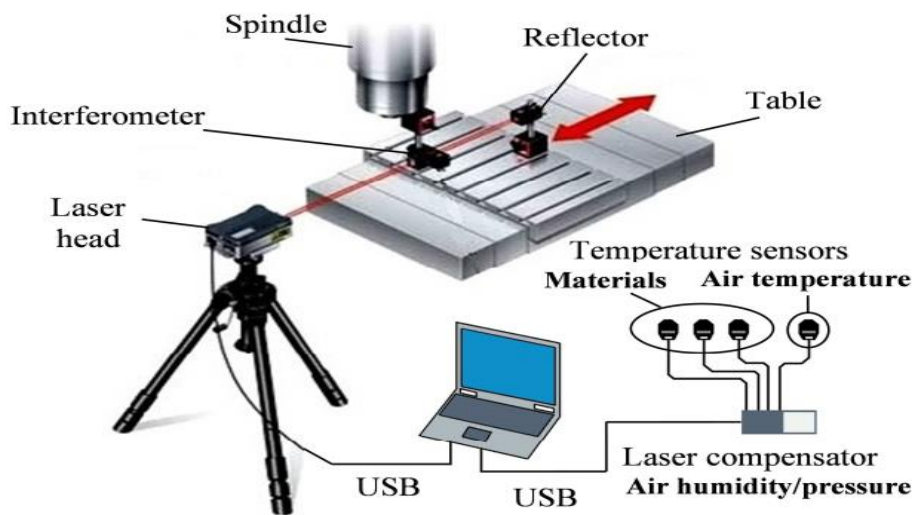
plus précises avec des coûts inférieurs. Dans ce processus, les erreurs de la machine sont mesurées et convenablement compensées de différentes manières.

Une partie essentielle de la technique de compensation d'erreur est la capacité de mesurer les erreurs de la machine. Il existe différentes méthodes de mesure suivant les exigences.

### I.3.1. L'interféromètre laser :

L'une des méthodes les plus précises d'évaluation de la précision des machines-outils consiste à la construction d'une carte d'erreurs pour l'ensemble de l'espace de travail de la machine-outil. À cet effet, des mesures linéaires et angulaires dans tous les axes contrôlés de la machine-outil doivent être effectués [18-23].

Actuellement, les interféromètres laser les plus simples peuvent effectuer des mesures en un seul axe. Ils sont utilisés principalement pour mesurer les déplacements linéaires, angulaires, les rectitudes et la perpendicularité des machines-outils. C'est une méthode bien établie dans l'environnement industriel et académique. L'interféromètre 1D le plus utilisé est celui de Renishaw (Fig.I.3). En comparaison avec le Ballbar, ils se caractérisent par une plus grande précision de mesure linéaire de  $\pm 0,5 \mu\text{m} / \text{m}$  [20].



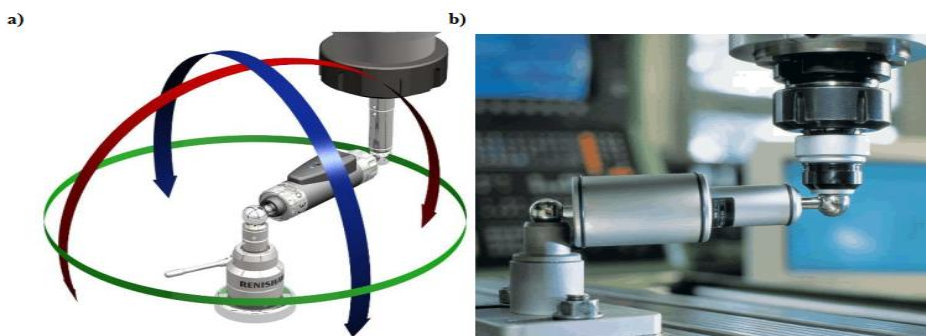
**Figure I.3 Configuration matérielle de l'interféromètre laser 1D pour les mesures linéaires [18].**

La mesure directe des erreurs thermiques par interféromètre laser consiste à mesurer un seul paramètre d'erreur dans une direction donnée. Trois montages pour le test de déformation thermique causée par le mouvement d'un axe linéaire sont suggérés dans la norme ISO230-3. L'axe se déplace périodiquement entre les positions limites où les mesures des positions et

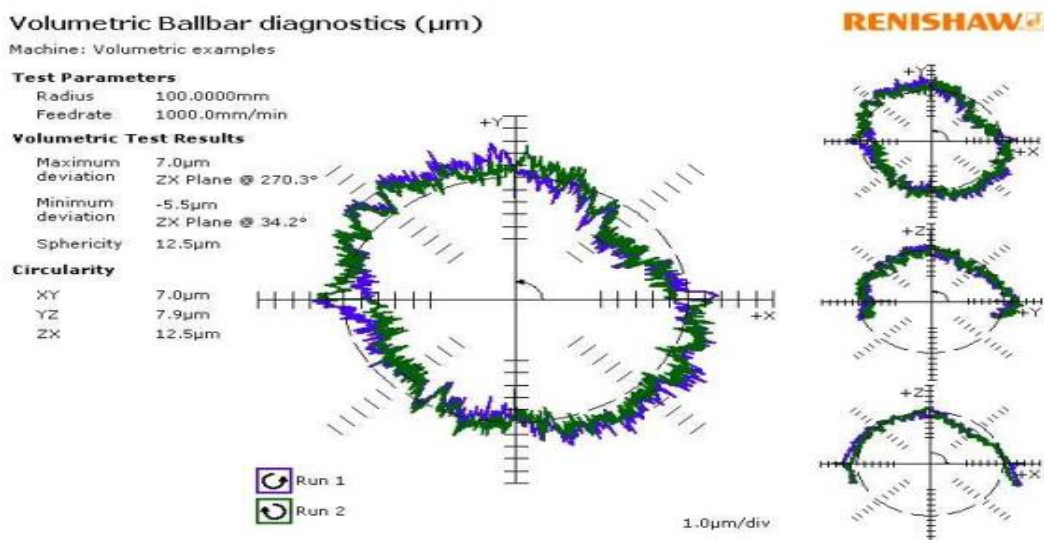
des températures sont faites. Les températures tel que, ambiante, capteur d'échelle, structure de la machine et guidage linéaire pour les paramètres d'erreur (EXY, EYY, EZY, EAY, EBY et ECY) sont mesurées en fonction du temps.

**I.3.2. Barre à billes (Ballbar)**

L'un des outils les plus couramment utilisés aujourd'hui pour tester la précision des machines-outils CNC à trois axes, sont les systèmes barre à billes (Ballbar) (Fig.I.4), tels que QC10, QC20 et DBB 110. Dans le test circulaire de barre à billes, la machine-outil effectue un mouvement circulaire dans un plan spécifié [23]. De nombreuses erreurs peuvent être identifiées. Outre que l'erreur radiale, le test barre à billes peut être utilisé pour déterminer le jeu, les pics d'inversion, les vibrations irrégulières, l'erreur de suivi, l'erreur d'échelle, ainsi que l'erreur d'équerrage d'un axe linéaire (Fig.I.5). La dérive thermique peut être également identifiée [22, 23].



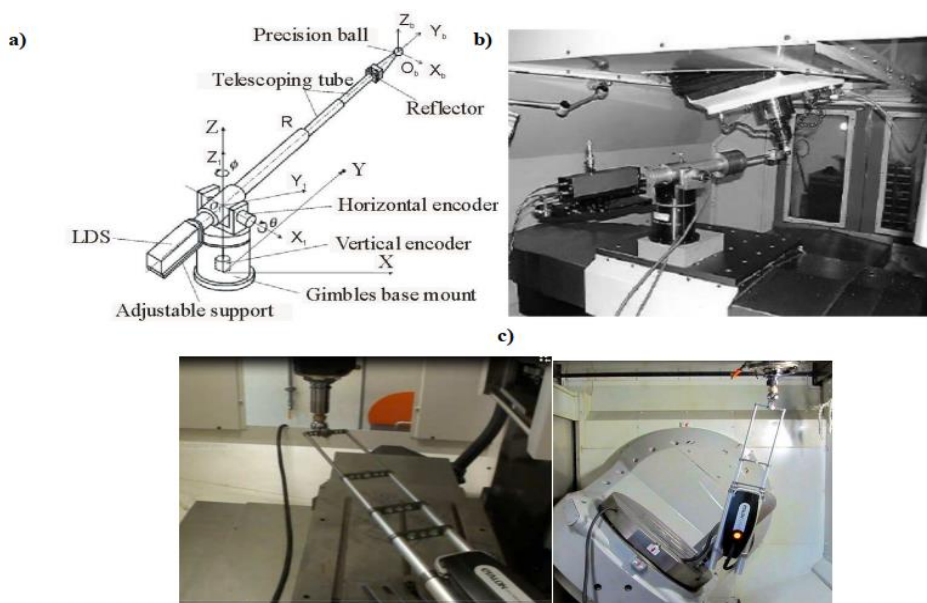
**Figure I.4 Mesure des erreurs des machines-outils au moyen d'instruments Ballbar : a) QC20-W et b) DBB 110 [21].**



**Figure I.5 Résultats de test de rondeur exemplaires [23].**

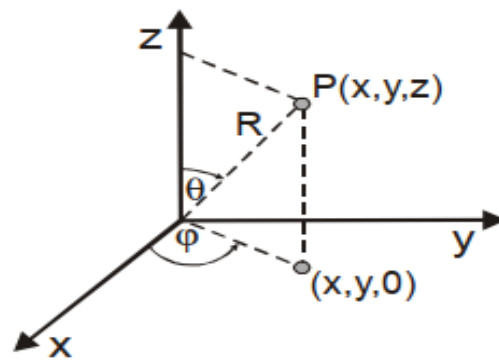
## I.3.3. LBB 3D :

En ajoutant la possibilité de mesurer deux angles de rotation de la barre, un instrument appelé 3D LBB a été obtenu. Cet instrument permet la mesure directe en temps réel de la position de la pointe de la broche. Deux encodeurs laser rotatifs pour mesurer l'angle de rotation par rapport à l'axe vertical Z et à l'axe horizontal X et pour les mesures linéaires sont utilisés dans le cas illustré à la (Fig.I.6). Le laser est un laser compact à échelle Doppler (fabriqué par Optodyne Co.) avec une précision du système jusqu'à 1,0 ppm. Les encodeurs ont une résolution maximale de 1,0 arc-sec et une précision de 1,6 arc-sec [24].



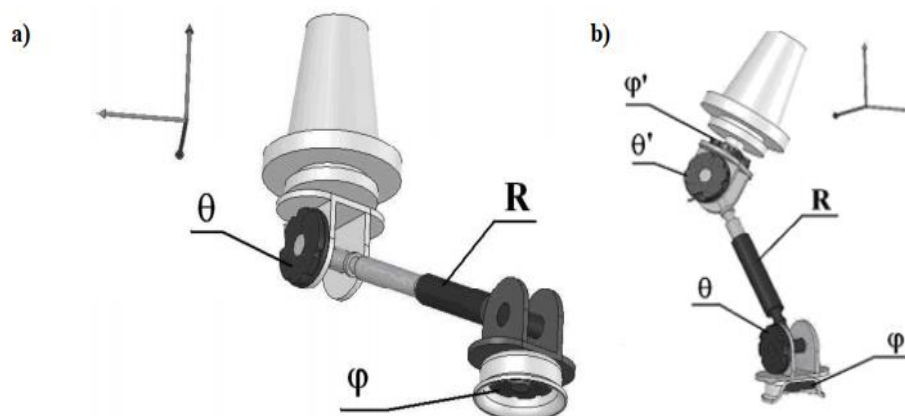
**Figure I.6 LBB 3D : a) structure b) LBB 3D pendant la mesure [19], c) mesure de l'axe linéaire et de rotation erreurs au moyen du système ETALON Laser TRACER-MT [10].**

Le système Laser TRACER-MT (MT : Mechanical tracking) fabriqué par ETALON (Fig.I.6c) est une mise en œuvre commerciale exemplaire. Le système peut être utilisé pour calibrer des machines-outils de petite et moyenne taille avec leurs assemblages décalés jusqu'à 1.5 m.



**Figure I.7 Transformation des résultats en système de coordonnées cartésien [10].**

Grâce aux trois capteurs, un pour les mesures linéaires et deux pour les mesures angulaires les déplacements peuvent être mesurés dans le système de coordonnées sphérique et enregistrés. Les résultats de mesure peuvent être facilement transformés en système de coordonnées cartésien (Fig.I.7). Afin de déterminer la position d'un point dans les coordonnées sphériques, il faut déterminer le rayon  $R$  et deux angles de rotation :  $\theta$  et  $\phi$  (Fig.I.7). Les barres vectorielles sont également basées sur le principe ci-dessus, mais diffèrent dans leur méthode de mesurer le rayon et le nombre d'angles mesurés (Fig.I.8) [10].

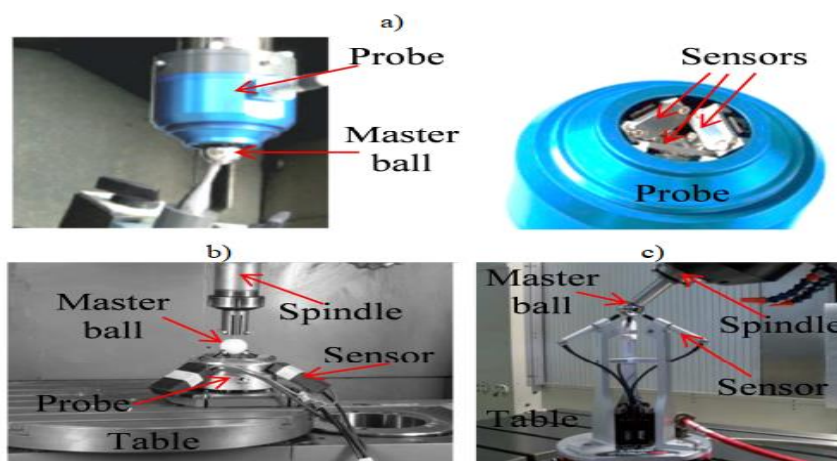


**Figure I.8 Barre vectorielle : a) avec capteurs de mesure d'angle séparés, b) pour mesurer cinq coordonnées [10].**

La principale limitation des appareils LBB et 3D LBB est la longueur minimale du tube télescopique, qui détermine la partie morte de l'espace de travail (dans laquelle aucune mesure peuvent être effectuée) et la taille maximale de l'espace de travail dans lequel des mesures peuvent être effectuées. Les systèmes laser de suivi de pointe n'ont pas une telle limite.

### I.3.4. R-test pour l'évaluation de la précision des axes rotatifs :

L'une des principales méthodes de vérification de la précision de la mesure des coordonnées machines est un test consistant à mesurer une balle maîtresse de précision au moyen d'une sonde. Le test est inclus dans de nombreuses normes internationales, telles que VI / VDE (le V3 test), ASME (test de palpation point à point) et ISO (test R). Le but du test est de déterminer avec précision la position du centre de la balle principale pendant l'opération des lecteurs. Le principe de ce test a été exploité pour construire simple (en comparaison avec les systèmes laser) des dispositifs de mesure dans lesquels trois capteurs de déplacement espacés tous les 120 ° touchent la surface du ballon, ce qui permet à tout instant de déterminer la position du centre de la bille par rapport aux autres axes contrôlés de la machine-outil, lecture coordonnées x, y, z. De tels systèmes dans différentes configurations sont utilisés pour évaluer le précision et degré de préparation des données pour la compensation des machines-outils avec axes de rotation et linéaires. Un exemple de dispositif basé sur le principe du test R est présenté sur la (Fig.I.10) [25-26].



**Figure I.9 Configurations d'appareils basées sur le principe du test R : a) Appareil de test R fabriqué par IBS Precision Engineering [25]. ,b) prototype fonctionnel du dispositif de test R [26], c) dispositif HMS fabriqué par Fidia [10].**

Dans la solution, appelée test R, proposée par IBS Precision Engineering, les trois capteurs de déplacement sont fixés à la broche tandis que la bille maîtresse est fixée à la table de la machine-outil (Fig.I.10). Dans les autres solutions proposées, c'est l'inverse, c'est-à-dire la bille est fixée à la broche et les capteurs sont fixés à la table. Le principe de mesure dans les trois cas reste le même. Il n'y a que des différences dans le logiciel d'acquisition. Le logiciel IBS Precision Engineering permet à la fois d'effectuer des mesures automatiques et de générer des G-codes NC pour les contrôleurs, Siemens, Fanuc et Heidenhain [25].

La solution, HMS (Head Measuring System), proposée par FIDIA est prise en charge par les systèmes de contrôle FIDIA classe C et a été conçu pour l'étalonnage automatique et diagnostic de têtes rotatives à deux tours et de tables basculantes dans des machines-outils à cinq axes. Cet appareil est géré par un logiciel dédié de configuration, de mesure et de traitement. Après couplage avec un système de commande FIDIA classe C le cycle de mesure se déroule automatiquement pendant environ 30 minutes [25-26].

La précision de la mesure au moyen des appareils basés sur le principe R-test varie de 1,4  $\mu\text{m}$  pour la configuration prototype [27] à 0,6  $\mu\text{m}$  pour l'IBS Precision Dispositif Technique dans une plage de mesure respectivement de 0,5 mm et 1,25 mm [28]. Les dispositifs permettent de vérifier l'état de la machine-outil chaque fois qu'un besoin se fait. Cela permet de réduire les temps d'arrêt liés à l'étalonnage des machines-outils.

### I.3.5. Capteur de proximité CAPABILLE :

L'instrument Cap-à-Bille (CapBall) utilise trois capteurs capacitifs montés dans la broche, mesurant directement les déviations volumétriques par rapport à une bille montée sur la table (Fig.I.10). Ainsi pendant ce mouvement, les capteurs mesurent les déviations entre l'outil et la pièce. Dans une application XYZ, l'essai requiert l'interpolation circulaire des deux axes linéaires X et Y, en plus de la rotation de l'axe rotatif C [16].

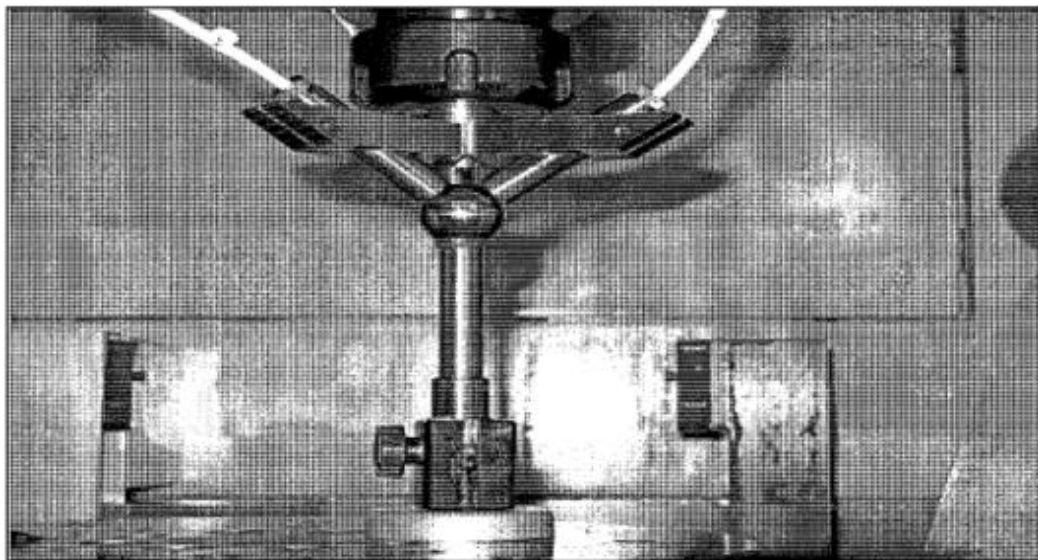


Figure I.10 Capteurs et bille en position engagée [16].

### I.3.6. 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, car, les erreurs géométriques de la machine sont minimales et leur effet est négligeable sur ce type de trajet.



Figure I.11 Schéma d'essai de KGM sur une machine-outil [29].

### I.4. Modélisation des erreurs thermiques :

**Huang (1995)** a mesuré trois sources d'erreurs thermiques dans le système d'entraînement par vis à billes par thermocouple et a établi un modèle de régression multiple pour compenser l'erreur thermique [30]. **Tan (2014)** a étudié plus en détail les effets de l'hystérésis thermique de l'environnement et a présenté un modèle analytique variant dans le temps entre la température ambiante et l'erreur thermique de grandes machines-outils utilisant la synthèse de Fourier, les séries chronologiques et la loi de refroidissement de Newton [31]. **Wang (2016)** a étudié les effets de la convection et rayonnement d'une source à haute température sur l'environnement thermique d'un bâtiment industriel [32]. **Zhang (2017)** a proposé des approches analytiques du domaine temporel et du domaine fréquentiel à analyser l'influence de la température ambiante variable dans le temps sur l'erreur thermique de la machine-outil [33].

Au cours des dernières décennies, de nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes de modélisation des erreurs thermiques. Fan [10] a proposé une nouvelle méthode de modélisation d'erreurs basée sur des polynômes orthogonaux pour améliorer la précision d'usinage d'une machine CNC. Une technique de compensation a été également proposée par la suite. Après l'application de sa technique de compensation, il a réussi de réduire l'erreur de broche induite thermiquement et l'erreur géométrique de 90 %. Lee [34] a présenté une nouvelle méthode de compensation de distorsion thermique basée sur la méthode d'analyse indépendante des composants ; cette méthode était capable de compenser les distorsions thermiques de seulement quelques micromètres. Wu [35] a proposé une nouvelle technique pour compenser l'erreur de positionnement induite par une mauvaise conception structurelle de la machine et de la dilatation thermique due à la coupe.

Bien que les méthodes de modélisation d'erreur susmentionnées puissent être appliquées avec une compensation d'erreur correspondante, ces modèles de haute précision ne fonctionnent que dans des conditions spécifiques ; en outre, la plupart des modèles réalisent une corrélation linéaire entre l'entrée de température et la sortie d'erreur thermique, qui ne sont pas significativement robustes pour gérer des conditions pratiques plus complexes. Pour développer un modèle pratique avec une précision et une robustesse élevée, des nouvelles méthodes de modélisation d'erreur sont demandées.

Donc des méthodes pour prévenir, contrôler et compenser les déformations thermiques pour minimiser ces erreurs sont souhaitées pour améliorer la précision d'usinage des machines-outils et pour augmenter la qualité et la productivité d'usinage.

**CHAPITRE II**  
**PROTOCOLE DE MESURE DIRECTE DES**  
**ERREURS LINEAIRES PAR**  
**INTERFEROMETRE LASER**

Les mesures directes sont des mesures basées sur la mesure d'un seul paramètre d'erreur, selon une direction connue. Parmi les instruments de mesure disponible il y a l'interféromètre laser, les capteurs de proximité, aussi un palpeur monté sur la machine et des cales de référence [36]. L'interféromètre laser permet de réaliser des mesures de justesse d'axe linéaire, circulaire, angulaire (lacet, tangage) de rectitude, d'équerrage et dynamique. Pour réaliser des usinages précis suivant les tolérances exigées par les cahiers des charges, l'interféromètre laser permet d'évaluer la précision des machines et éventuellement d'insérer des nouvelles corrections dans la commande numérique pour obtenir une machine plus précise (Fig.II.12) [37].



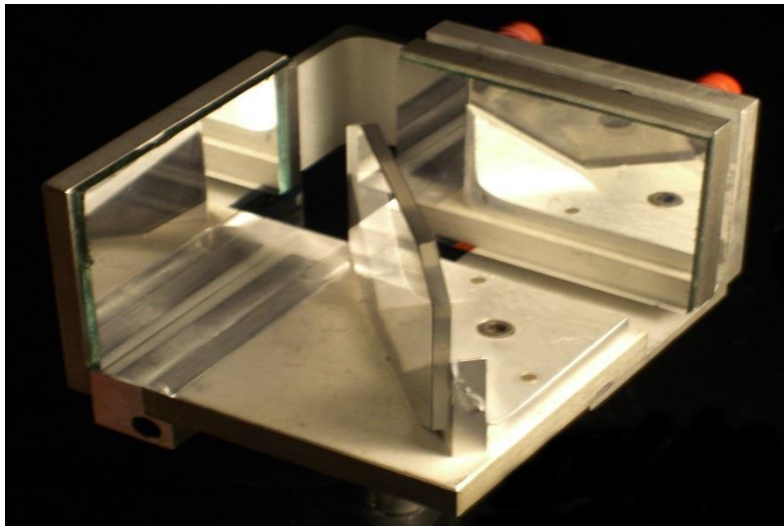
Figure II.1 Mesure par l'interféromètre laser [37].

## II. Principes d'interférométrie :

### II.1 L'interféromètre de Michelson :

L'interféromètre de Michelson est une configuration courante pour l'interférométrie optique et a été inventé par Albert Abraham Michelson. À l'aide d'un séparateur de faisceau, une source de lumière est divisée en deux bras. Chacun de ces faisceaux lumineux est réfléchi vers le séparateur de faisceaux qui combine ensuite leurs amplitudes en utilisant le principe de superposition. Le motif d'interférence résultant qui n'est pas dirigé vers la source est généralement dirigé vers un certain type de détecteur photoélectrique ou de caméra. Pour différentes applications de l'interféromètre, les deux chemins lumineux peuvent être de longueurs différentes ou incorporer des éléments optiques ou même des matériaux à tester.

L'interféromètre de Michelson (parmi d'autres configurations d'interféromètre) est utilisé dans de nombreuses expériences scientifiques et est devenu bien connu pour son utilisation par Albert Michelson et Edward Morley dans la célèbre expérience Michelson – Morley (1887) dans une configuration qui aurait détecté le mouvement à travers l'éther lumineuse supposé que la plupart des physiciens croyaient à l'époque était le milieu dans lequel les ondes lumineuses se propageaient. Le résultat nul de cette expérience a essentiellement réfuté l'existence d'un tel éther, conduisant finalement à la théorie spéciale de la relativité et à la révolution de la physique au début du XXe siècle. En 2015, une autre application de l'interféromètre de Michelson, LIGO, a fait la première observation directe des ondes gravitationnelles. Cette observation a confirmé une prédiction importante de la relativité générale, validant la prédiction de la théorie de la distorsion spatio-temporelle dans le contexte d'événements cosmiques à grande échelle (connus sous le nom de tests sur le terrain fort) [38].



**Figure II.2 Un interféromètre de base de Michelson, sans compter la source optique et le détecteur [38].**

## II.2 Composants de base :

### II.2.1 Laser XL-80 :



**Figure II.3 Laser XL-80 [37]**

Le Laser XL-80 produit un faisceau laser extrêmement stable dont la longueur est homologuée par des normes nationales et internationales. La stabilité de la fréquence laser est spécifiée à  $\pm 0,05$  ppm sur une année et à  $\pm 0,02$  ppm sur une heure. Cette excellente stabilité est obtenue par une gestion thermique dynamique de la longueur du tube laser à quelques nanomètres près.

La précision de mesure linéaire est garantie à  $\pm 0,5$  ppm sur toute la plage de fonctionnement, à savoir de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  et de 650 à 1150 mbar. Les mesures sont prises à 50 kHz avec une vitesse de mesure linéaire de 4 m/s et une résolution linéaire de 1 nm, même à la vitesse maximale. L'interférométrie est à la base de toutes les options de mesure (pas seulement linéaire) du système XL. La connexion USB intégrée n'exige plus d'interface séparée Laser/PC. Le laser comporte aussi en standard une sortie analogique auxiliaire et en option une sortie en quadrature. La même prise accepte aussi une entrée de signal de déclenchement pour synchroniser la saisie de données. Les diodes d'état du laser (Fig.II.14) et de puissance du signal complètent les indicateurs sur les écrans du logiciel. Avec un mode longue portée commutable (40 m à 80 m) et un temps de préchauffage inférieur à 6 minutes, ces fonctions rendent le XL-80 rapide et facile à utiliser [16]

### II.2.2 Compensateur XC-80 et ses capteurs :

Le compensateur XC-80 est fondamental pour la précision de mesure du système XL. Doté de « capteurs intelligents » qui traitent les lectures à la source, ce compensateur effectue une mesure très précise de la température de l'air, de la pression atmosphérique et de l'humidité relative.



**Figure II.4 Compensateur XC-80 et ses capteurs [39].**

Il modifie ensuite la valeur nominale de la longueur d'onde du laser pour produire une valeur exacte à utiliser dans les calculs, ce qui élimine pratiquement toute erreur de mesure découlant de ces écarts. Ceci peut être effectué automatiquement toutes les sept secondes comme l'indiquent les diodes d'état sur l'unité XC-80. Chaque capteur « s'éteint » entre les mesures pour minimiser la dissipation de chaleur. C'est là un aspect typique du soin apporté à l'étude du XC-80, lequel utilise une table de correction température et pression pour le capteur de pression, ainsi que des capteurs thermiques ajustés par coefficients. Jusqu'à trois capteurs de température peuvent aussi être connectés au compensateur XC-80 pour permettre une normalisation des mesures linéaires à une température de référence matériau de 20 °C. Les cordons (5 mètres) des capteurs sont amovibles pour faciliter leur remplacement. Plusieurs cordons peuvent être vissés les uns aux autres pour créer des allonges sur les machines plus longues. L'étude du XC-80 et des capteurs permet d'obtenir des mesures extrêmement précises sur la plage complète des conditions d'exploitation. Ces différents éléments ont été conçus pour résister aux manipulations quotidiennes dont la plupart des systèmes font l'objet [16].

### **II.2.3 Trépied et plate-forme :**

À moins d'utiliser un banc de mesure spécial, il y a de forte chance qu'un trépied et qu'une plate-forme soient nécessaires pour ajuster la position relative du laser par rapport à l'axe de mesure souhaité. Le nouveau trépied universel, qui a fait l'objet d'essais très complets, constitue une base de réglage très stable, légère et compacte. La plate-forme du trépied XL permet des rotations angulaires et des translations précises du Laser XL-80. Grâce à sa conception, elle peut rester fixée à l'unité laser, offrant ainsi un rangement facile et une installation rapide.



**Figure II.5 Trépied [37].**

Un mécanisme à blocage/débloqué instantané réalise une fixation sûre et rapide au trépied. Dans les applications peu pratiques pour un trépied, un montage à même la table d'une machine-outil par exemple, la plate-forme et le laser peuvent aussi s'installer sur la plupart des socles magnétiques standard avec un adaptateur fileté M8 optionnel. Grâce à leur conception soignée, le laser XL-80 et ses optiques peuvent aussi être placés directement sur un marbre ou une table (sans plate-forme de trépied) pour l'étalonnage de machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

#### **II.2.4 Mallettes système**

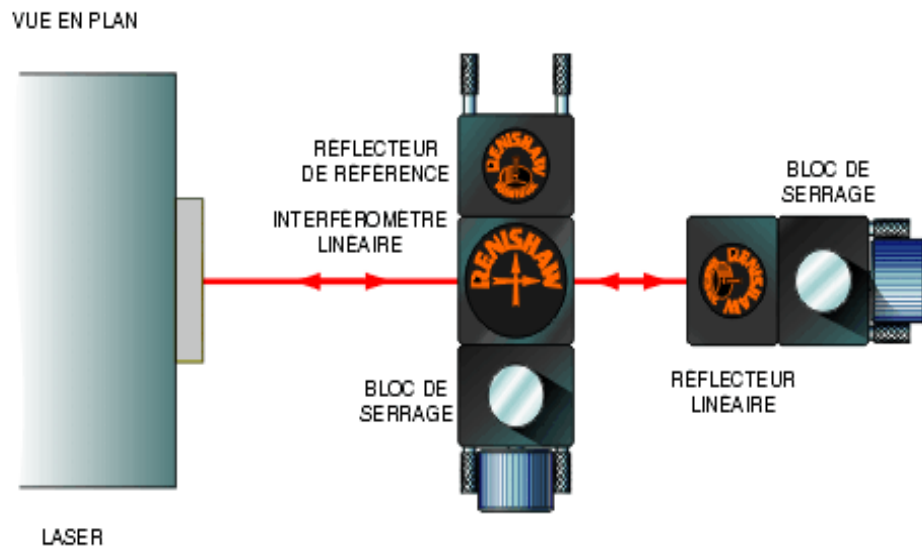
La mallette pour système complet peut loger le laser XL et le compensateur XC ainsi qu'une gamme complète d'optiques et d'accessoires pour toutes les configurations de mesure prises en charge (Fig.II.17). La mallette pour système de base est plus petite. Elle peut loger le laser XL et les kits de compensateur XC ainsi que l'optique et les accessoires pour des configurations de mesures linéaire et angulaire [13].



Figure II.6 Mallette pour système complet (plateau retiré) [39].

### II.3 Montage de l'optique linéaire :

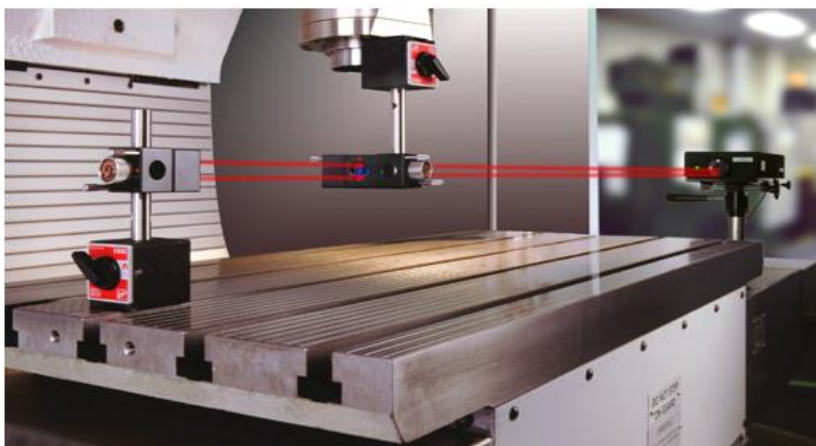
La (Fig.II.18] représente une configuration typique de montage de l'optique linéaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage.



**Figure II.7 Montage de l'optique linéaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage [39].**

Les colonnes de montage sont fixées à la machine en utilisant des blocs de serrage aimantés et/ou des plaques d'appui en acier. L'interféromètre linéaire et le réflecteur linéaire doivent se monter au niveau des pièces à usiner et du support de palpeur ou d'outil. Les mesures reflètent alors correctement les erreurs qui se produisent entre la pièce à usiner et l'outil ou le palpeur, et ne sont pas contaminées par d'autres erreurs. Même si les couvercles et les protections rendent l'accès à la machine difficile, il faut essayer toujours de fixer rigidement l'interféromètre et le rétro-réflecteur sur la machine.

Un exemple de positionnement de l'interféromètre et du réflecteur sur un centre d'usinage et une machine CMM est représenté dans les (Fig.II.19 - 20) ci-dessous [39].



**Figure II.8 Mesure de positionnement linéaire de l'axe X sur un centre d'usinage vertical [39].**

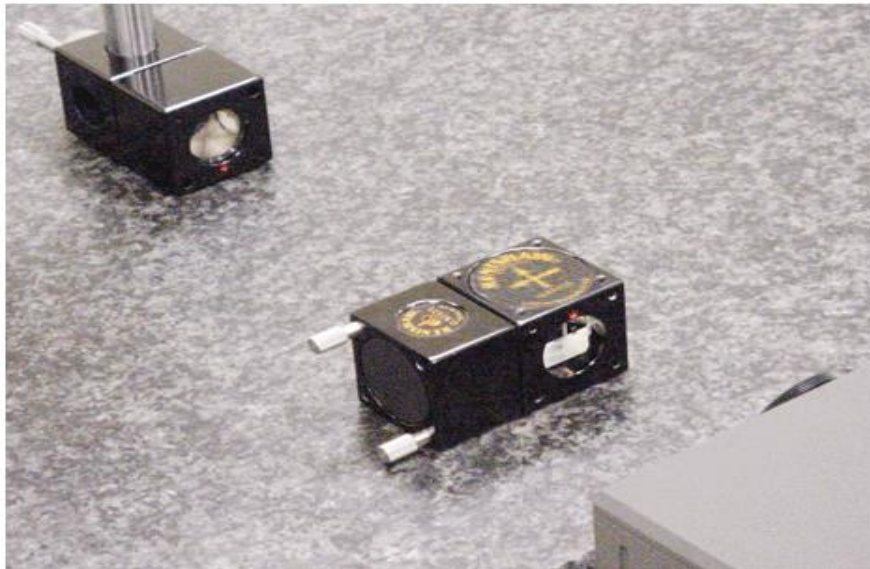


Figure II.9 Optique linéaire montée sur une machine CMM [39].

### II.3.1 Positionnement correct de l'optique pour minimiser les erreurs de mesure :

Pour simplifier la configuration et minimiser les risques d'erreur de mesure, les facteurs suivants doivent être pris en considération lors du montage des composants optiques [39].

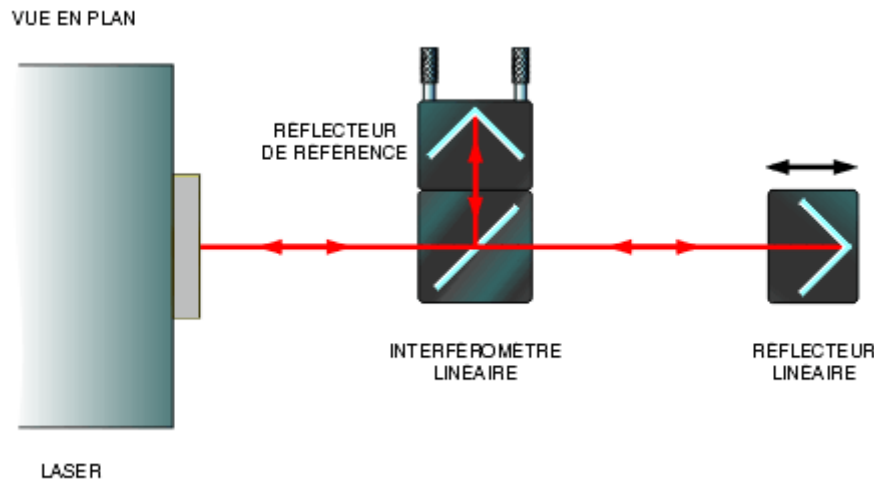
- Minimiser l'erreur de décalage d'Abbe.
- Fixer les éléments optiques directement aux points intéressants.
- Fixer les éléments optiques de façon rigide.
- Rassembler les éléments optiques à une extrémité du parcours de l'axe.
- Éviter les sources thermiques localisées.
- Minimiser l'erreur de parcours mort du matériau.
- Utiliser des miroirs tournants.
- Propreté des composants optiques.

### II.3.2 Alignement du faisceau linéaire :

Pour obtenir une puissance de signal suffisante sur l'axe de course complet d'une machine et minimiser les erreurs de mesure cosinusoidale, le faisceau laser du XL doit être aligné de façon à être parallèle à l'axe de course.

- L'orienteur laser peut être utilisé pour simplifier l'alignement du faisceau. Cette précaution réduit le degré d'ajustement à apporter au trépied et à la tête laser.
- Monter le laser XL au-dessus du trépied et de la plate-forme.

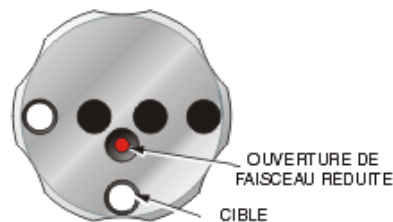
Les procédures d'alignement abordées dans ce chapitre partent du principe que l'optique est configurée conformément à la (Fig.II.21), l'interféromètre linéaire servant d'optique stationnaire et le rétro-rélecteur d'optique mobile.



**Figure II.10** l'interféromètre linéaire servant d'optique stationnaire et le rétro-rélecteur d'optique mobile [39].

### II.3.3 Positionnement de l'interféromètre linéaire et du réflecteur :

1. Positionner le trépied et le laser pour qu'il pointe normalement vers l'optique de mesure. Alignez approximativement le laser sur l'axe de course en utilisant le carter comme ligne de mire.
2. Pivoter l'obturateur laser afin que le laser produise un faisceau à diamètre réduit conformément à la (Fig.II.22). Un faisceau de diamètre réduit facilite la visualisation des alignements erronés.

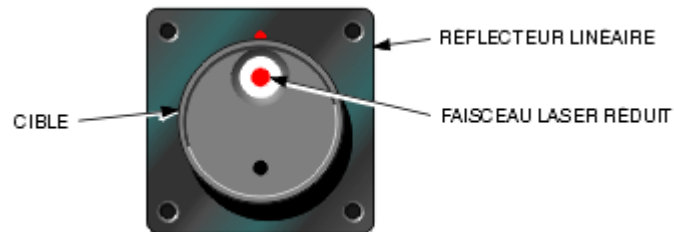


**Figure II.11** Un faisceau de diamètre réduit facilite la visualisation des alignements erronés [39].

3. Déplacer la machine afin de rapprocher le réflecteur linéaire du laser et d'installer une cible devant, avec le point blanc en haut. Effectuer une translation

du laser ou de la machine jusqu'à ce que le faisceau tombe sur le point blanc sur la cible.

**Remarque :** L'interféromètre linéaire ne doit pas être positionné entre le laser et le réflecteur linéaire à ce stade.



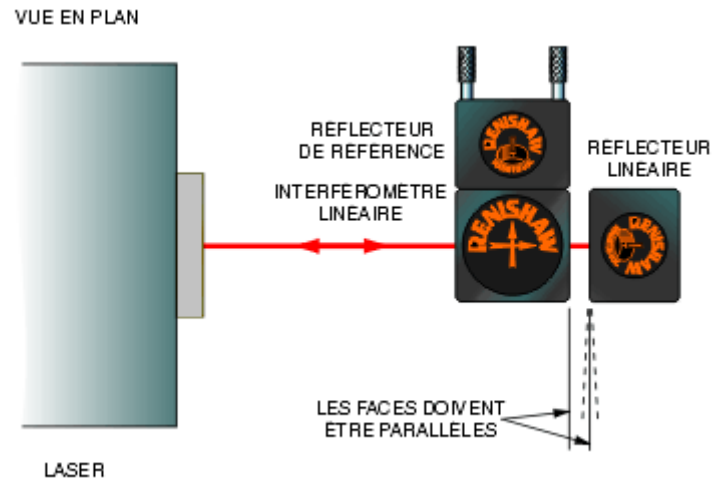
**Figure II.12 Réflecteur linéaire.**

4. Retirer la cible et en assurant que le faisceau renvoyé du réflecteur tombe sur le centre de la cible sur l'obturateur du Laser XL. Si ce n'est pas le cas, effectuer la translation du laser ou de la machine jusqu'à ce que le faisceau tombe sur le centre de la cible.



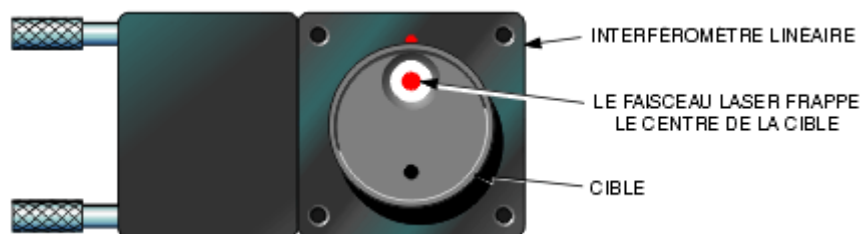
**Figure II.13 Le faisceau laser frappe le centre de la cible sur le canon [39].**

5. Positionner l'interféromètre linéaire le plus près possible du réflecteur conformément à la (Fig.II.25). S'ils sont près l'un de l'autre, le reste de l'alignement peut être obtenu en ajustant simplement la tête laser.



**Figure II.14 réflecteur de référence [39].**

6. Les faces externes de l'interféromètre et du réflecteur doivent être perpendiculaires à la machine et alignées entre elles. Si l'interféromètre est positionné en biais, la précision peut être dégradée et la détection risque d'être impossible en cas d'obstruction du faisceau. En règle générale, il est conseillé d'aligner l'interféromètre avec un écart supérieur à  $\pm 2^\circ$  en roulis, tangage et lacet, ce qui peut souvent être réalisé à l'œil nu.
7. Installer une cible sur l'ouverture d'entrée de l'interféromètre avec le point blanc en haut et effectuer la translation verticale et horizontale de l'interféromètre pour que le faisceau tombe sur la cible [39].



**Figure II.15 interféromètre linéaire [39].**

8. Retirer la cible de l'interféromètre linéaire et assurez-vous que le faisceau renvoyé de l'interféromètre tombe sur le centre de l'obturateur du laser XL au-dessus du faisceau renvoyé par le rétro-réflecteur. Si ce n'est pas le cas, effectuer la translation de l'interféromètre jusqu'à ce que le faisceau tombe sur le centre de la cible blanche.

Remarque : il est parfois utile de bloquer le faisceau renvoyé par le réflecteur en positionnant une carte entre l'interféromètre et le réflecteur.

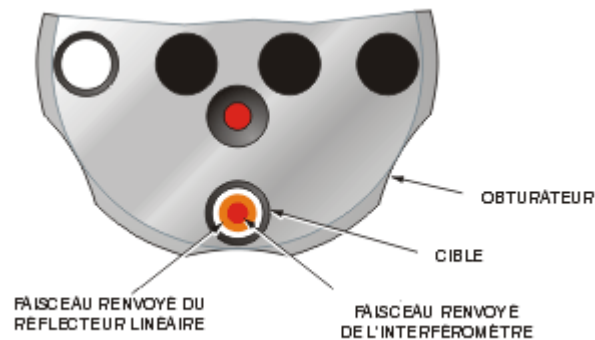


Figure II.16 la cible de l'interféromètre linéaire [39].

### II.3.3.1 Procédure d'alignement linéaire simple :

Une procédure d'alignement accélérée peut être effectuée par des experts. La procédure consiste à :

- Entraîner la machine sur une courte distance le long de l'axe à calibrer, de façon à installer la cible sur le rétro-réflecteur avec la cible blanche au-dessus (Fig.II.27).

Aligner le laser pour que le faisceau laser tombe sur le centre de la cible sur la longueur de la course de l'axe.

- Retirer la cible du réflecteur linéaire et, s'il y a lieu, procéder à une translation horizontale de la tête laser pour que les faisceaux renvoyés de l'interféromètre linéaire et du rétro-réflecteur tombent sur la ligne centrale horizontale de la cible de l'obturateur.



- Effectuer ensuite une translation verticale de la tête laser pour ramener le faisceau sur le centre de la cible.

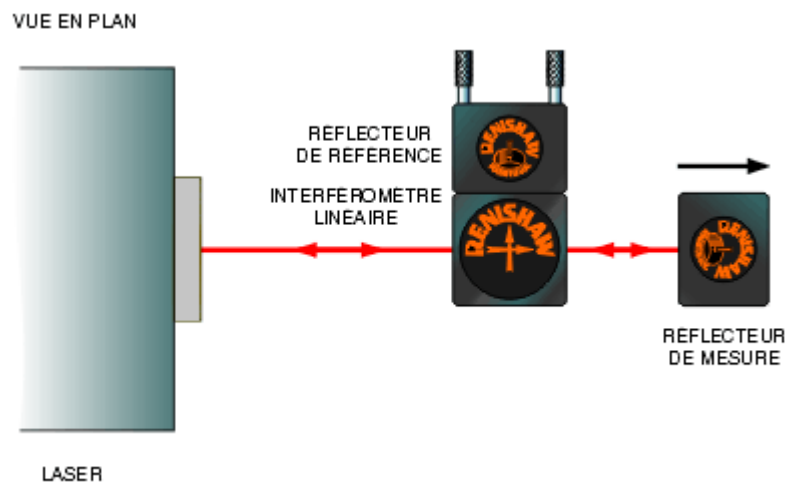
Remarque : A ce stade, il est sans doute nécessaire d'effectuer un autre petit ajustement de rotation horizontale pour ramener le faisceau laser au centre de la cible.



- Revérifier l'alignement des faisceaux renvoyés au niveau de la tête laser conformément à la procédure d'alignement accélérée. Au niveau de la tête laser, l'effet d'un désalignement du faisceau est doublé, ce qui permet de détecter plus facilement ce type de défaut [39].

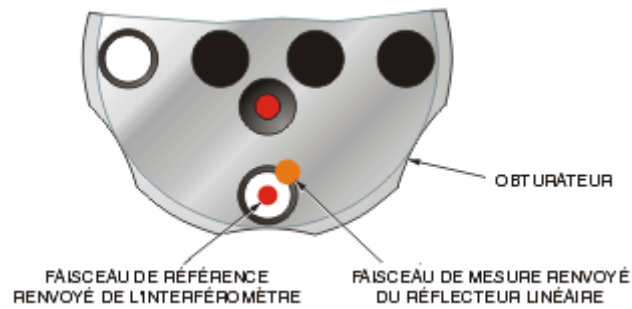
### II.3.3.2 Procédure d'alignement accélérée :

- Entraîner la machine le long de l'axe de course pour que le réflecteur s'éloigne de l'interféromètre (Fig.II.28).



**Figure II.17 le réflecteur s'éloigne de l'interféromètre**

- Déplacer la machine jusqu'à ce que vous constatiez que le faisceau s'éloigne de la cible sur l'obturateur du laser XL. Dès que l'un des faisceaux a atteint le bord de la cible, arrêtez le mouvement de la machine (Fig.II.29).



**Figure II.18 Déplacement de la machine jusqu'à ce que vous constatiez que le faisceau s'éloigne de la cible.**

### II.3.3.3 Réglage de faisceau vertical

- Utiliser le bouton à molette à l'arrière de la tête laser pour ajuster son pas de rotation et ramener les deux faisceaux à la même hauteur (Fig.II.30).



**Figure II.19 ajustement le pas de rotation**

- Utiliser la roue de réglage de hauteur sur la colonne centrale du trépied pour faire monter ou descendre la tête laser et amener les deux faisceaux au centre de la cible (Fig.II.31).



**Figure II.20 monter ou descendre la tête laser pour amener les deux faisceaux au centre.**

### II.3.3.4 Réglage de faisceau horizontal

- À l'aide du petit bouton situé à l'arrière du côté gauche de la plate-forme du trépied, ajuster le lacet angulaire de la tête laser pour amener les deux faisceaux l'un au-dessus de l'autre (Fig.II.32).



**Figure II.21 ajustement le lacet angulaire de la tête laser.**

- Ensuite, utiliser le gros bouton à molette situé à mi-chemin le long du côté gauche de la plate-forme du trépied pour effectuer une translation horizontale du laser et amener les deux faisceaux au centre de la cible (Fig.II.33).

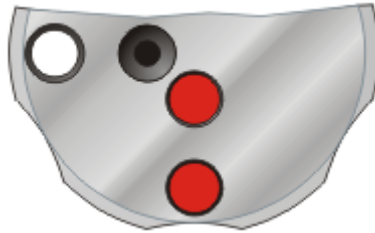


**Figure II.22 effectuer une translation horizontale du laser et amener les deux faisceaux au centre de la cible [39].**

- Reprendre alors l'entraînement de la machine sur l'axe de course. Là encore, arrêtez la machine après avoir constaté que le faisceau laser s'est éloigné de la cible. Refaites les étapes 3 à 6 d'alignement du laser de façon à atteindre la fin de l'axe.
- Après avoir atteint la fin de l'axe, ramener la machine vers l'arrière de façon à rapprocher le rétro-réflecteur et le réflecteur linéaire.

**Remarque :** Si l'un des faisceaux s'est éloigné de la cible de l'obturateur, cela signifie que le rétro-réflecteur subit un décalage latéral. Déplacer le rétro-réflecteur de haut en bas et de gauche à droite jusqu'à ce que le faisceau renvoyé du rétro-réflecteur chevauche le faisceau provenant de l'interféromètre sur la cible de l'obturateur.

- Refaites les étapes 1 à 10 jusqu'à ce que les deux faisceaux restent au centre de la cible sur toute la course de l'axe.
- Le faisceau laser est maintenant aligné avec l'axe de course. Mettre l'obturateur en position de mesure tel qu'indiqué à la (Fig.II.34) et vérifiez l'intensité du signal dans le logiciel de saisie des données linéaires à mesure que le rétro-rélecteur se déplace sur la course complète de la machine.



**Figure II.23 Déplacement de rétro-rélecteur sur la course complète de la machine [39].**

- Bloquer le faisceau laser entre l'interféromètre et le réflecteur et vérifiez si le voyant BEAM OBSTRUCT est affiché dans le logiciel de calibration. Si le blocage de faisceau ne se produit pas, vérifiez que les faces externes de l'interféromètre et du réflecteur sont perpendiculaires à la machine et alignées entre elles conformément aux indications de la rubrique positionnement de l'interféromètre linéaire et du réflecteur.

**Remarque :** Si l'axe de course de la machine mesure moins d'un mètre, d'autres ajustements seront sans doute nécessaires pour minimiser l'effet de l'erreur cosinusoidale.

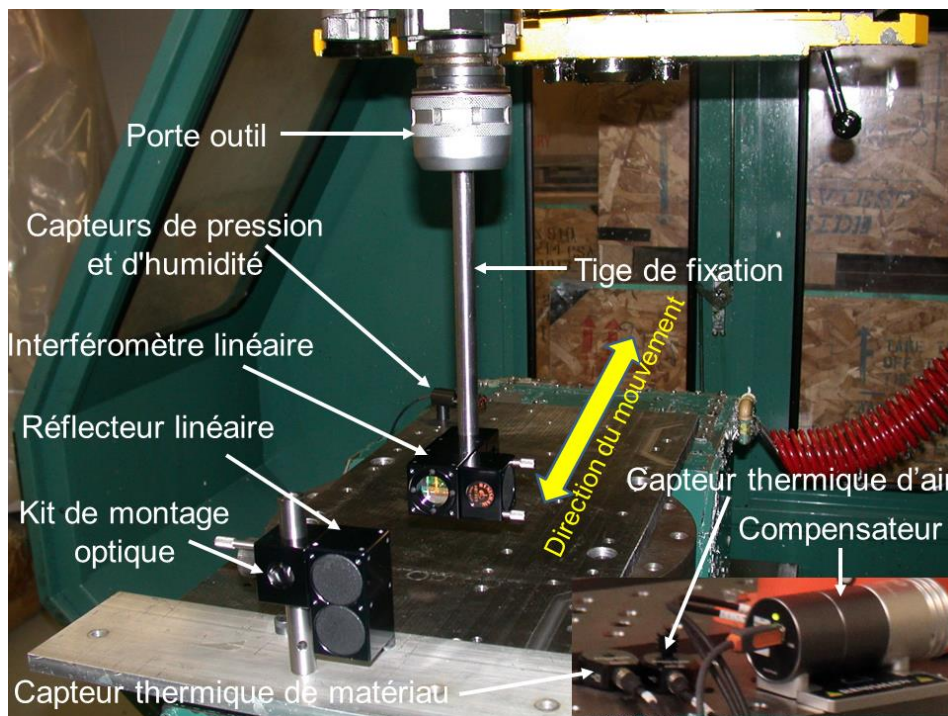
- Activez ensuite la compensation environnementale et vérifiez si le coefficient de dilatation matérielle correct a été entré dans le logiciel. Saisissez ensuite les données de saisie linéaire.

**CHAPITRE III**  
**METHODOLOGIE ET ASPECT**  
**EXPERIMENTAL**

Ce chapitre expose les procédures expérimentales utilisées pour l'acquisition des données des erreurs de positionnement linéaires d'un axe prismatique d'une machine-outil à commande numérique afin d'établir un modèle de prédiction des erreurs thermique. Le matériel utilisé, les procédures et les conditions expérimentales sont discutées. Des détails sur l'installation des équipements utilisés pendant les divers essais sont également fournis.

### III.1 Matériel utilisé

Les exigences de données pour l'estimation et la compensation des erreurs de la machine-outil nécessitent le développement d'une base de données empirique qui combine la position commandée, la position absolue et les conditions thermiques et environnementales de la machine-outil à tester. La position de la machine commandée est la position nominale de l'axe, qui est déterminée par le programme pièce en cours d'exécution. La position absolue de la machine et l'erreur à cette position sont lues directement dans la base de données à partir d'un interféromètre laser contrôlé par un PC. Les conditions thermiques et environnementales de la machine-outil sont mesurées par des capteurs installés sur la machine (Fig.III.35).



**Figure III.1 Montage du laser Renishaw pour les essais le long de l'axe X de la MOCN Matsuura MC.760 VX**

Un système de mesure laser de Renishaw est utilisé pendant toutes les mesures d'erreur de déplacement linéaire. Un schéma de la configuration de l'interféromètre laser pour les mesures d'erreur de déplacement linéaire est présenté aux (Fig.III.35 et III.36).



**Figure III.2 Tête laser montée sur le trépied universel**

Le système se compose de 5 unités principales :

1. La tête laser ML10 utilise un faisceau laser HeNe de classe II de faible puissance (1 mW) avec une longueur d'onde nominale de 0.633 mm (sous vide) et une stabilité de longueur d'onde à long terme (sous vide) de 0,1 ppm;
2. Kit d'optique linéaire Renishaw comprenant un interféromètre linéaire et un rétroreflécteur ;
3. Unité de compensation environnementale pour les mesures de la température de l'air, de l'humidité de l'air, de la pression de l'air et de la température des matériaux ;
4. PC Gateway 2000 P166 installé avec le logiciel de mesure laser et d'enregistrement de données Renishaw ;
5. Carte d'interface PCMCIA pour la communication de données avec le PC Gateway 2000 P166 via un câble de liaison de données.

Une photo de montage du laser Renishaw sur la plaque en acier pour les essais le long de l'axe X de la MOCN Matsuura MC.760 VX et les endroits de disposition des capteurs de température et de pression sont montrés à la (Fig.III.35). En plus des capteurs de température des matériaux, un capteur de température de l'air fixé magnétiquement à la table de la machine ainsi que des capteurs de pression et d'humidité de l'air ont été utilisés pour surveiller les effets environnementaux. La compensation d'environnement automatique emploie le compensateur XC pour compenser la longueur d'onde et dilatation thermique du matériau. Si la calibration est effectuée dans un environnement où les conditions atmosphériques sont susceptibles de varier pendant le test, une compensation automatique est vivement recommandée.

Le capteur de température d'air et de matériau utilisé dans ce test est un capteur intelligent. Des microprocesseurs intégrés analysent et traitent les données des capteurs avant d'envoyer des valeurs numériques de température au compensateur XC-80. On obtient ainsi

des mesures plus sûres. C'est en outre un des facteurs principaux pour la compacité du XC-80.

De plus, durant ce test, le capteur de température atmosphérique a été placé aussi près que possible de la ligne de mesure du rayon laser, sans interférer avec le procédé de mesure et loin de toutes sources de chaleur localisées telles les moteurs ou les courants d'air. Le capteur de température de l'air a été attaché à la plaque en acier par magnétisme, à ses côtés sont placés les capteurs de pression atmosphérique et d'humidité (Fig.III.35) pour surveiller les effets environnementaux.

Toutes les sept secondes, une lecture est prise sur l'un des capteurs d'environnement et transmise au PC. Le facteur de compensation d'environnement est mis à jour avec cette lecture. L'ordre dans lequel les lectures du capteur d'environnement sont prises est le suivant : température d'air, humidité relative, pression atmosphérique et les 3 capteurs thermiques de matériaux.

### III.2 Procédure de mesure

Pour la plupart des configurations de calibration de machine-outil, il est recommandé de monter le laser XL sur le trépied et la plate-forme (Fig.III.36). Le trépied universel et la plate-forme réalisent une monture stable pour le laser XL qui lui permettent d'être positionné à différentes hauteurs et qui assurent un contrôle d'alignement complet du faisceau laser.

Comme le montre la figure 3.1, l'interféromètre linéaire est positionné sur le trajet du faisceau entre le Laser XL et le réflecteur linéaire. Pendant les mesures linéaires, l'un des composants optiques reste stationnaire tandis que l'autre se déplace sur l'axe linéaire. Dans ce test, le réflecteur est installé comme composant optique mobile et l'interféromètre comme composant stationnaire (Fig.III.35).

Lors de montage du ML10, le faisceau laser est aligné pour éviter les erreurs de trajectoire morte et de cosinus. La pleine force du faisceau a été obtenue sur toute la course de l'axe pendant les mesures.

Après avoir un pleine force du signale, le cycle de mesure a été lancé immédiatement (machine en état froid) pour mesurer les erreurs de positionnement linéaire du centre d'usinage Matsuura MC.760 VX pendant le cycle de préchauffage. La course mesurée de l'axe X est définie sur une plage de 600 mm avec un intervalle (pas) de 1 mm et X=0 est sélectionné comme point de référence.

Les erreurs de position linéaires ainsi que les lectures de température et de pression/humidité de l'air ont été enregistrées pendant les cycles de mesure laser. Les cycles de test d'échauffement et de mesure d'erreur ont été répétés pendant une période de 35 h.

La saisie de données est effectuée par le déplacement de la machine (réflecteur) à plusieurs positions (dites "cibles") le long de l'axe testé et par la mesure de l'erreur machine. Un programme en code G a été utilisé pour déplacer la machine d'une position à une autre selon la course disponible, en faisant une pause de quelques secondes à chaque position cible. Des mesures sont prises pendant chaque pause le long de l'axe sous essai.

Les paramètres qu'on doit indiquer pour créer le programme de déplacement (code G) sont :

- le nombre de courses que le contrôleur fera par les cibles indiquées ;
- la direction de chaque passe. Ceci peut être unidirectionnel ou bidirectionnel ;
- le temps d'arrêt à chaque position avant de passer à la suivante ;
- une distance de dépassement, qui indique la région d'inversion de direction aux fins de course de l'axe ;

La vitesse d'avance pour déplacer la table mobile d'une position à la suivante.

**CHAPITRE IV**  
**PRESENTATION DES RESULTATS ET**  
**DISCUSSION**

### IV.1 Présentation des résultats

Lorsque l'on désire des usinages très précis, on se heurte presque invariablement aux erreurs provenant des variations de température qui engendrent des dilatations de valeurs inégales. Il est possible de classer les effets de ces variations de température en trois catégories essentielles, à savoir :

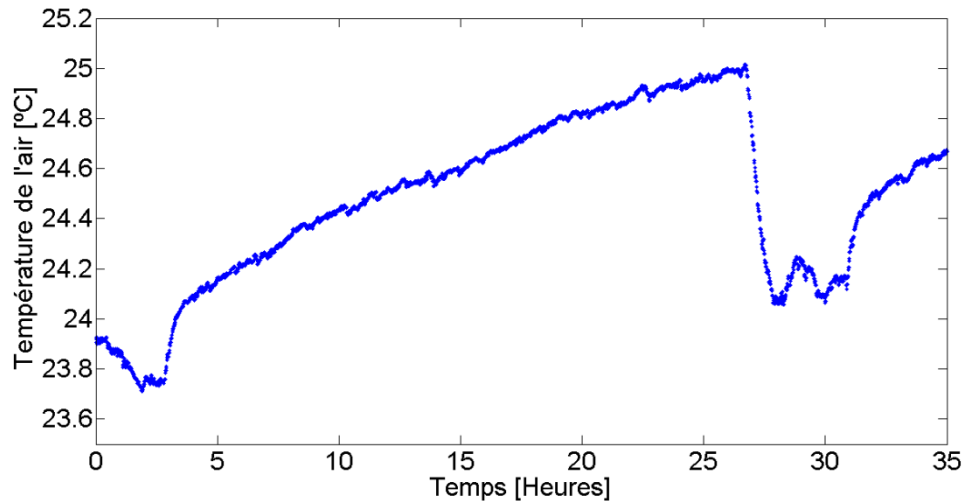
- Les erreurs dues à réchauffement de la machine ou de certaines de ses parties.
- Les erreurs dues aux changements de la température ambiante et qui résultent du fait que l'inertie thermique de la machine et celle de la pièce ne sont pas égales.
- Les erreurs qui proviennent de réchauffement de la pièce pendant l'usinage.

Généralement, la cause principale d'échauffement de la machine est le moteur d'entraînement de la broche porte-outil. En effet, ce moteur n'est pas impliqué dans ces tests. Seul le moteur qui sert à déplacer la table est impliqué. Ces moteurs sont généralement dotés de puissances bien moindres en comparaison avec celle de la broche.

Il n'est pas nécessaire, pour obtenir des usinages de grande précision, que la température du local dans lequel la machine-outil est placée soit parfaitement constante. Par contre, il ne faut pas qu'il subisse des variations brusques de température. En effet, la machine possède, de par sa masse, une certaine inertie thermique, elle ne suit pas instantanément la température du local. Il en est de même de la pièce mais, comme elle est beaucoup plus légère que la machine, son inertie thermique est moindre. D'autre part, la surface de dissipation de la chaleur varie beaucoup d'une pièce à l'autre. C'est pourquoi il faut laisser à la machine le temps nécessaire pour suivre les variations de la température ambiante. D'autre part, il est exceptionnel qu'un local ait la même température au sol qu'au plafond. Il en résulte des erreurs provenant du gradient de température ayant pour effet d'altérer la rectitude des glissières. Enfin, il est encore très fréquent de voir des dispositifs de chauffage qui provoquent des courants d'air violents néfastes pour la conservation de la bonne stabilité d'une machine de précision.

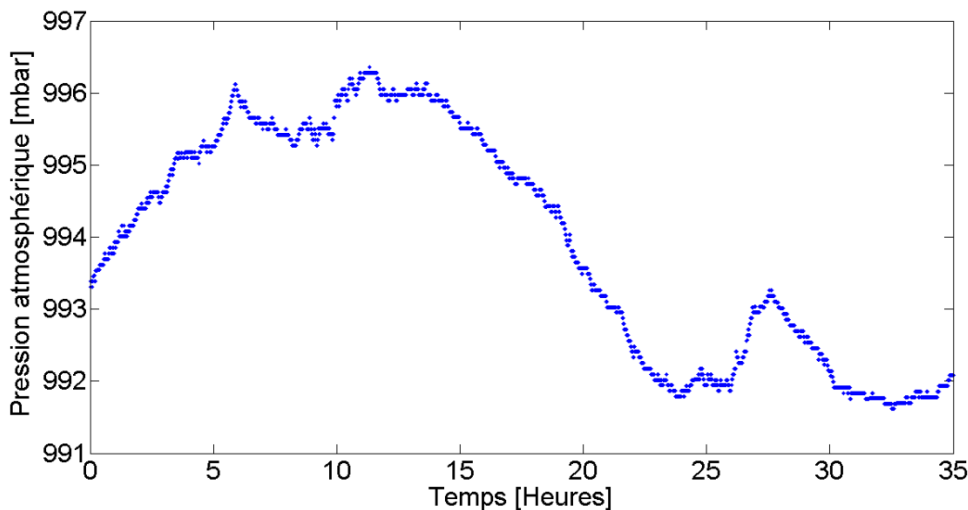
Dans ce travail, l'axe X de la machine-outil à commande numérique Matsuura MC.760 VX a été testé en termes d'erreur de positionnement linéaire. Les (Fig.IV.37, IV.38 et IV.39) présentent la variation de la température de l'aire, de la pression atmosphérique et de l'humidité de l'aire durant les 36 heures de test. La (Fig.IV.37) montre que la température de l'air n'est pas parfaitement stable durant le test, il varie dans une plage inférieure à 2° C. Il est à noter cependant que les tests ont été déroulés durant la fin de semaine, portes d'atelier fermées et dans un environnement non climatisé.

La (Fig.IV.37) montre également une dérive linéaire entre la 5ème et la 25ème heure, suivie par une chute de température d'environ 1° C. Cette chute de température est peut être due à l'ouverture de la porte de l'atelier par l'opérateur pour une vérification de l'état d'avancement des tests.



**Figure IV.1 Variation de la température de l'air durant le test.**

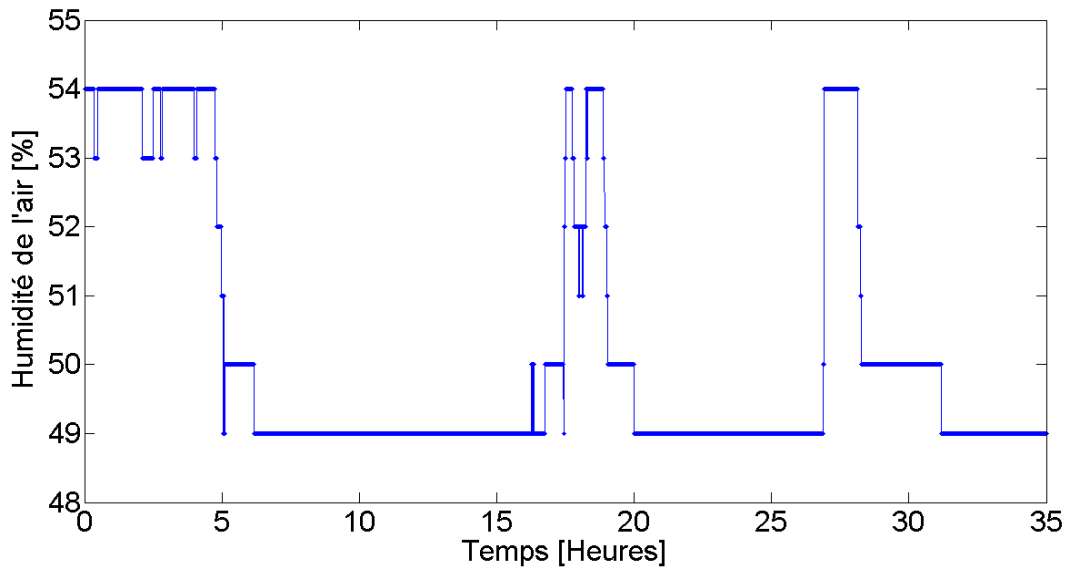
D'autre part, (Fig.IV.38) montre que la pression atmosphérique augmente avec le temps pendant les 10 premières heures pour atteindre une valeur maximale de 996 mbar puis chute à une valeur minimale de 992 mbar après 28 heures. Ensuite, la pression atmosphérique augmente à nouveau avec le temps.



**Figure IV.2 Variation de la pression atmosphérique durant le test**

La (Fig.IV.39) montre la variation de l'humidité de l'air en fonction du temps. L'humidité relative de l'air s'exprime en pourcentage et se définit comme le rapport de la quantité d'eau effectivement contenue dans l'air et la capacité d'absorption à une température donnée. La (Fig.IV.39) montre également que l'humidité relative est généralement supérieure

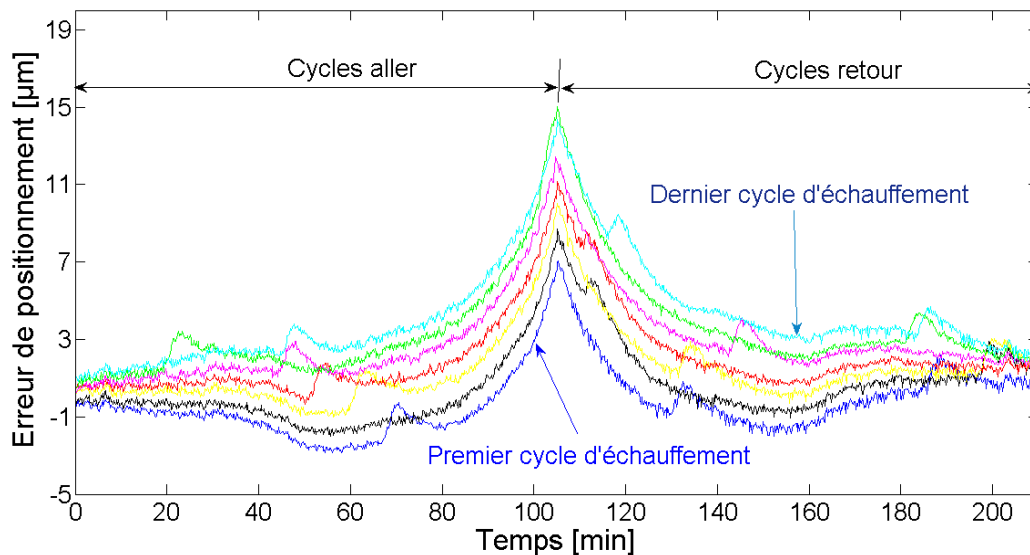
à 49 % et varie relativement au cours du test. Les humidités relatives durant le test oscillent entre 49 % et 54 %.



**Figure IV.3** Variation de l'humidité de l'air durant le test

Théoriquement, les 21 composantes d'erreur paramétriques (écarts cinématiques articulaires) sont toutes soumises à des effets thermiques. En pratique, chaque machine a ses propres problèmes thermiques particuliers en fonction de sa configuration et de sa construction. Par conséquent, une étude préliminaire de la façon dont la structure de la machine réagit à la hausse des températures est nécessaire. D'autre part, les fluctuations des conditions d'environnement provoquent des dilatations des éléments de la machines et des modifications dimensionnelles dans la pièce au cours de l'usinage. De plus, la stabilité thermique des machines-outils est essentielle pour assurer la qualité requise des pièces usinées.

Les erreurs de déplacement linéaire le long de l'axe X à différentes périodes sont données à la (Fig.IV.40) Dans cette figure, le premier cycle d'échauffement indique que les erreurs ont été mesurées lorsque la machine était à froid (0 heure de fonctionnement) pour les directions aller et retour, respectivement. Les résultats de mesures montrent que les erreurs de position sont généralement plus faibles au début du déplacement de l'axe (position de départ) et ont une tendance d'augmenter avec l'augmentation de la position nominale de l'axe. Il a été constaté aussi que bien que les erreurs de positionnements linéaires variaient avec la température (heure de fonctionnement de la machine), leurs profils de base le long du trajet ne changeaient pas radicalement. L'ampleur des erreurs augmente progressivement au fur et à mesure que la machine se réchauffe.



**Figure IV.4 Erreurs de déplacement linéaire sur l'axe X.**

On peut clairement voir que chaque courbe présente la même variation, mais avec l'augmentation du temps de fonctionnement, le changement global de l'écart de position devient plus important. Après avoir atteint l'état d'équilibre thermique, le changement ralentit progressivement et l'écart entre les courbes diminue.

Dans des conditions de démarrage à froid, seuls les profils d'erreurs stationnaires (c'est-à-dire les erreurs géométriques pures) existent dans la machine. Pendant le cycle de préchauffage, des dérives variant dans le temps (erreurs d'origine thermique) sont ajoutées aux erreurs géométriques. Lorsque la machine est à l'état froid, l'erreur de déplacement linéaire maximale est de l'ordre de grandeur de  $7 \mu\text{m}$ . À la fin de cycle de préchauffage, l'erreur augmente à sa valeur maximale de  $15 \mu\text{m}$ .

#### IV.2 Modélisation de l'effet thermique

Les erreurs géométriques pures sont considérées comme les erreurs de la machine, qui existent dans des conditions de démarrage à froid. Pendant le cycle de préchauffage, des pentes variant dans le temps (erreurs d'origine thermique) sont ajoutées aux erreurs géométriques.

L'approche du modèle empirique, qui établit la relation entre les erreurs géométriques-thermiques et les températures mesurées en conjonction avec les données de position des axes seront utilisées dans ce travail pour prédire les erreurs géométriques et thermiques des machines-outils. En conséquence, l'erreur de positionnement induite thermiquement mesuré par l'interféromètre laser peut être séparée en deux parties : l'une est l'erreur géométrique statique liée à l'emplacement de l'axe, et l'autre est l'erreur thermique liée aux caractéristiques thermiques et à l'emplacement de l'axe. L'erreur de positionnement mesuré peut être définie comme suit :

$$\delta_{pos} = \delta_{geo} + \delta_{therm} \quad (IV.1)$$

Où,  $\delta_{pos}$  indique l'erreur de positionnement mesurée de l'axe,  $\delta_{geo}$  est l'erreur géométrique statique et  $\delta_{therm}$  est l'erreur thermique.

Les gradients thermiques produisent des déformations significatives des composants de la machine et en conséquence des erreurs de positionnement supplémentaires ( $\delta_{therm}$ ).

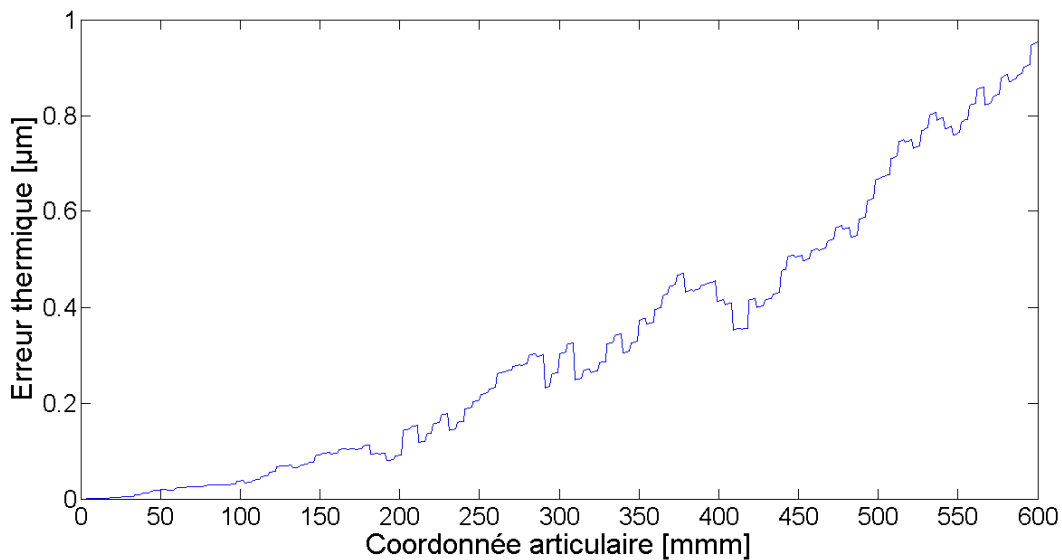
$$\delta_{therm} = p \times \Delta T \times \alpha \quad (IV.2)$$

Où,  $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique (exprimé en  $10^{-6}/^{\circ}C$ ), pour l'acier  $\alpha = 11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ;

$\Delta T$  Est la variation homogène de la température (en  $^{\circ}C$ ) ;

p est la longueur de l'élément testé (m).

(Fig.IV.41) montre l'erreur thermique prédite  $\delta_{therm}$  pour le premier cycle de mesure utilisant l'équation (IV.2).



**Figure IV.5 Erreur thermique prédite ( ) pour le premier cycle de mesure.**

De nombreux chercheurs ont étudié la méthode de modélisation des erreurs géométriques statiques. Feng [40] a proposé une nouvelle méthode de modélisation basée sur les courbes B-spline et a obtenu une précision de modélisation élevée. Fan [41] a proposé les polynômes orthogonaux et a considérablement amélioré la précision des machines-outils par rapport à celles sans compensation d'erreur. Slamani [42] a prouvé expérimentalement qu'un polynôme de degré trois ou quatre est suffisant pour représenter les erreurs géométriques statiques d'une MOCN.

En se basant sur les résultats de Slamani [42], un polynôme de degré 3 est adopté dans ce travail pour modéliser les erreurs géométriques statiques.

$$\delta_{geo} = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 \quad (IV.2)$$

Où,  $\delta_{geo}$  est l'erreur géométrique statique (résultat du premier test (premier cycle)) et  $X$  est la position nominale (programmée) de l'axe X (coordonnée articulaire).

Selon l'équation (IV.1) :

$$\delta_{geo} = \delta_{pos} - \delta_{therm} \quad (IV.3)$$

L'équation (IV.2) peut être écrite sous la forme matricielle comme suite :

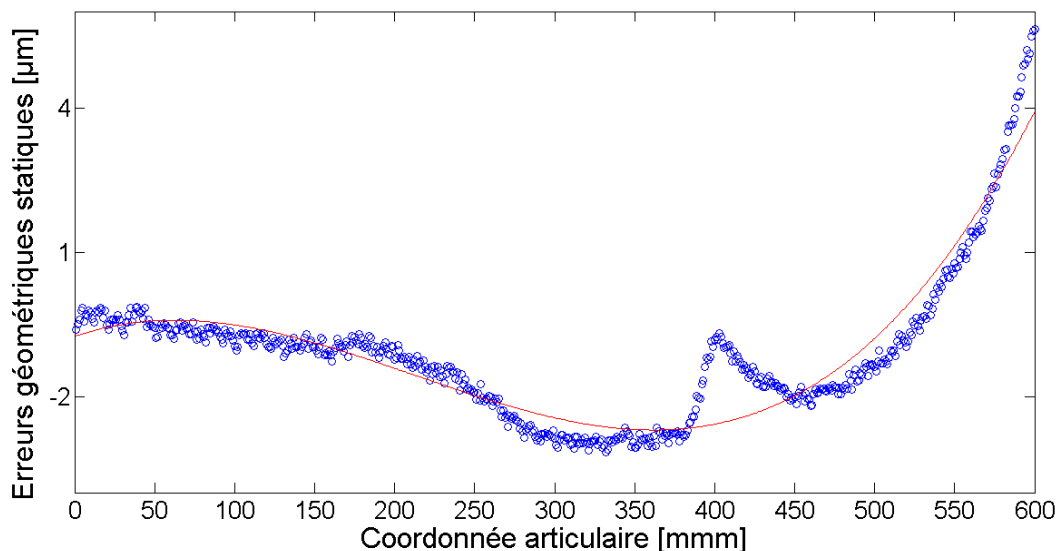
$$\begin{bmatrix} \delta_{geo_1} \\ \delta_{geo_2} \\ \vdots \\ \delta_{geo_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & X_1^2 & X_1^3 \\ 1 & X_2 & X_2^2 & X_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & X_n^2 & X_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \quad (IV.4)$$

$$\delta = X\beta \quad (IV.5)$$

L'équation (IV.5) présente un système linéaire à quatre inconnus, la résolution de cette équation permettant de trouver les coefficients  $\beta_i$  au sens des moindres carrés. Après résolution, l'équation estimée devienne :

$$\delta_{geo} = -0.7579 + 0.0115X + -1.08 \times 10^{-4}X^2 + 1.7 \times 10^{-7}X^3 \quad (IV.6)$$

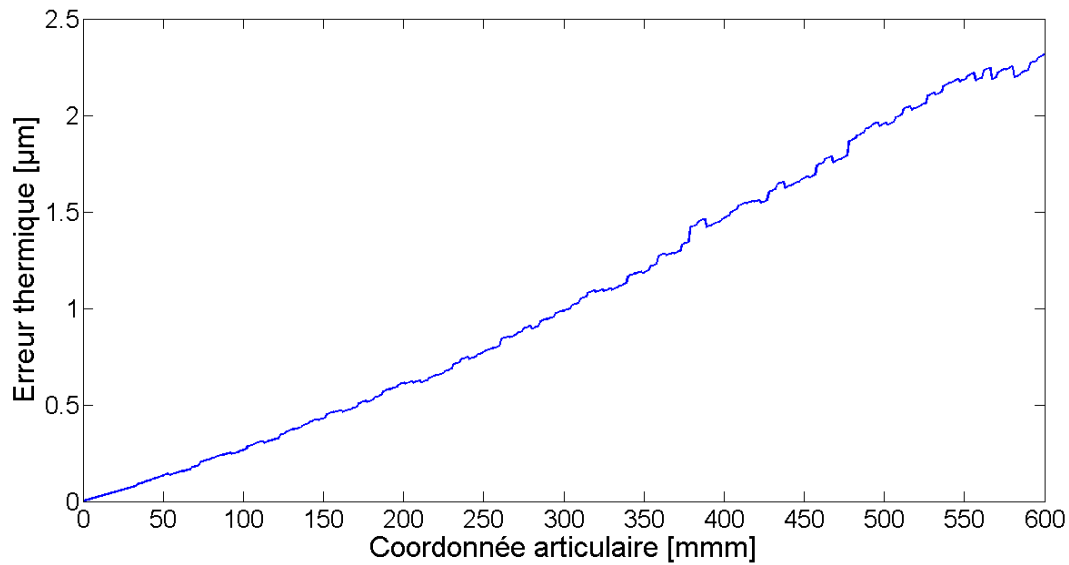
La (Fig.IV.42) montre que le modèle estimé est très représentatif, il offre une qualité d'ajustement de  $R^2 = 90\%$ .



**Figure IV.6 Comparaison entre les erreurs géométriques statiques mesurées et prédites.**

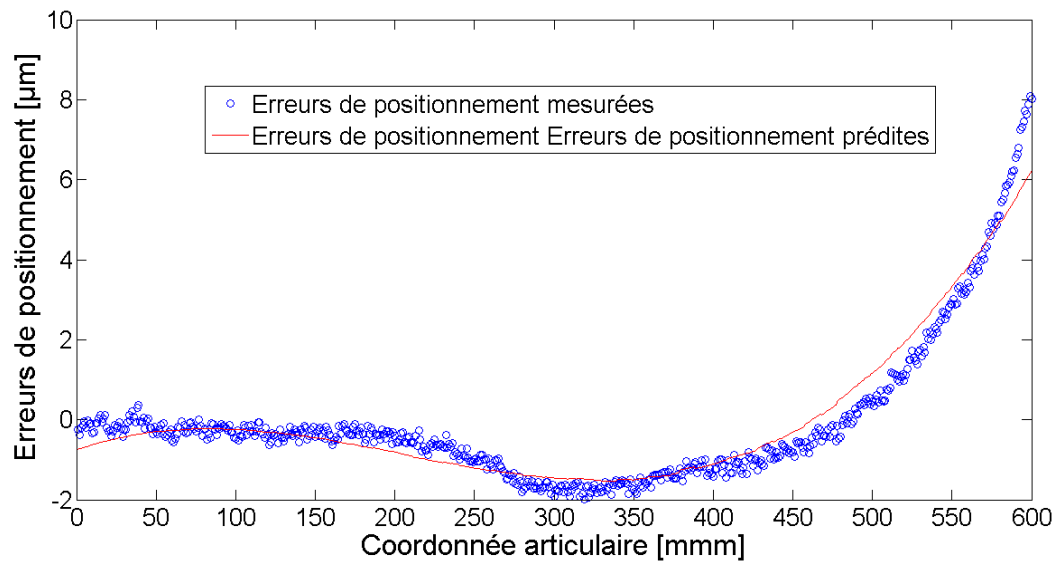
Pour valider le modèle proposé, nous prenons au hasard un cycle de test, disons le septième cycle. Pour cela, l'erreur thermique est prédite de nouveau utilisant l'équation (IV.2).

Le résultat de prédiction est montré à la (Fig.IV.42).



**Figure IV.7 Erreur thermique prédite ( ) pour le premier cycle de mesure.**

Les résultats de la (courbe IV.43) sont ajoutés aux résultats des erreurs géométriques statiques prédites par l'équation (IV.6) et sont présentés à la (Fig.IV.44). Une bonne adéquation est obtenue. La bonne qualité d'ajustement ( $R^2 = 0.95$ ) montre la validité du modèle proposé.



**Figure IV.8 Erreur de positionnement mesuré et prédite pour le 7ème cycle de mesure.**

# **Conclusion**

## Conclusion

Les travaux réalisés dans ce mémoire sont en lien direct avec les besoins industriels demeurant d'avoir des machines-outils de très haute performance tant sur la productivité que sur la qualité des composantes géométriques usinées.

Ce travail a démontré également que le problème thermique, qui est bien connu dans l'industrie manufacturière, est toujours présent dans les machines-outils et qu'il est indispensable de poursuivre la recherche pour trouver de nouvelles solutions plus efficaces.

L'état thermique d'une machine-outil à commande numérique affecte les erreurs géométriques des différentes articulations de machine et est généralement difficile à évaluer. L'effet des variations thermiques peut être caractérisé en mesurant le comportement géométrique de la machine en fonction de la température.

Ce travail a contribué à l'amélioration de la précision d'une machine-outil disponible dans le l'industrie d'usinage. Sur la base d'une analyse qualitative des principales sources d'erreur, l'étude s'est concentrée sur le développement d'un modèle qui prédit les effets des erreurs géométriques et du comportement thermique. Les résultats montrent que l'amplitude des erreurs induites thermiquement domine l'effet des erreurs géométriques.

Pour l'évaluation des erreurs géométriques statiques, un modèle polynomial de degré trois a été conçu, capable de prédire l'erreur de positionnement linéaire, en fonction de la position des chariots (coordonnées articulaires). Ce modèle est applicable aux machines-outils de configuration arbitraire.

Le comportement thermique est déterminé par un modèle mathématique basé sur la connaissance du coefficient de dilatation thermique du matériau pour une variation  $\Delta T$  homogène de la température.

L'approche de modélisation développée est avérée efficace et apporte une amélioration de la précision de la machine-outil testée.

Le travail de recherche présenté dans ce travail a permis d'approfondir la connaissance sur le comportement thermique des machines-outils.

## **REFERENCES**

## Référence :

- [1] **D.S. Lee, J.Y. Choi, D.H. Choi**, ICA based thermal source extraction and thermal distortion compensation method for a machine tool, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43 (2003) 589–597.
- [2] **R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo**, Error compensation in machine tools—a review Part II: thermal errors, *Int. J. Mach. Tool Manuf.* 40 (2000) 1257–1284.
- [3] **R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo**, Support vector machines model for classification of thermal error in machine tools, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 20 (2002) 114–120.
- [4] **Z.Z. Xu, X.J. Liu, H.K. Kim, J.H. Shin, S.K. Lyu**, Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system, *Int.J. Mach. Tools Manuf.* 51(2011) 605–611.
- [5] **J. Ni**, CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation, *J. Manuf. Sci. Eng.—Trans. Asme* 119(1997)717–725.
- [6] **J. Yang**, Error synthetic compensation technique and application for NC machine tools, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 1998.
- [7] **J. Yang, J. Yuan, J.Ni**, Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 39 (1999) 1367–1381.
- [8] **Z.Li, K.Fan, J.Yang, Y. Zhang**, Time-varying positioning error modeling and compensation for ball screw systems based on simulation and experimental analysis, 2014.
- [9] **Z.Y. Han, H.Y. Jin, Y. L.Liu, H.Y. Fu**, A review of geometric error modeling and error detection for CNC machine tool, *Appl. Mech. Mater.* 303–306 (2013) 627–631.
- [10]. **KWAŚNY, W., TUREK**, Paweł, et JEŃDRZEJEWSKI, J. Survey of machine tool error measuring methods. *Journal of Machine Engineering*, 2011, vol. 11.
- [11]. **KHIM**, Seng ET KEONG, Chin. Modeling the volumetric errors in calibration of five-axis CNC machine. 2010.
- [12]. **RAMESH, R., MANNAN, M. A., et POO, A. N.** Error compensation in machine tools—a review: Part II: thermal errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40, no 9, p. 1257-1284.
- [13]. **BRYAN, J. B.** International status of thermal error research. *Annals of the CIRP*, 1968, vol. 16, p. 203-215.
- [14]. **MCCLURE, E. R.** *Significance of Thermal Effects in Manufacturing and Metrology*. Lawrence Radiation Lab., Univ. of California, Livermore, 1966.

- [15]. **SUTTON**, G. P. Economy of accuracy, technology of machine tools, Vol. 5. 1980.
- [16]. **SOHEYB ANTARA**, Bouaya. *Évaluation de la performance des machines-outils à commande numérique par interféromètre laser*. 2016. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE
- [17]. **ZHANG, Jianfu, FENG, Pingfa, CHEN**, Chuang, *et al.* A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 68, no 5-8, p. 1517-1527.
- [18]. **TUREK**, Paweł, **KWAŚNY**, Wojciech, ET **JĘDRZEJEWSKI**, Jerzy. Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek. *Inżynieria Maszyn*, 2010, vol. 15, p. 7-37
- [19]. **KALICKI**, Tomasz, **PRZEPIÓRA**, Paweł, **KUSZTAL**, Piotr, *et al.* Historical and present-day human impact on fluvial systems in the Old-Polish Industrial District (Poland). *Geomorphology*, 2020, vol. 357, p. 107062.
- [20]. **WANG, Charles**. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory. *Review of scientific instruments*, 2000, vol. 71, no 10, p. 3933-3937.
- [21]. **HEIDENHAIN**, A. G. Measuring systems for machine tool inspection and acceptance testing. *Product brochure*, 1997, p. 0-16.
- [22]. **SCHWENKE**, Heinrich, **KNAPP**, Wolfgang, **HAITJEMA**, Han, *et al.* Geometric error measurement and compensation of machines—an update. *CIRP annals*, 2008, vol. 57, no 2, p. 660-675.
- [23]. **BARNES, A., TINGLE, J., ET LEE, J.** AUTOMATED FIBRE PLACEMENT EDGE OF PLY ACCURACY WITH RESPECT TO MACHINE PERFORMANCE AND DESIGN.
- [24]. **FAN, Kuang-Chao, WANG, Hai, SHIOU, Fang-Jung, et al.** Design analysis and applications of a 3D laser ball bar for accuracy calibration of multiaxis machines. *Journal of manufacturing systems*, 2004, vol. 23, no 3, p. 194-203.
- [25]. **Machine tool calibration**,  
<http://ibs.questo.nl/public/uploads/content/files/MachineToolCalibration-20pEnglish.pdf>.
- [26]. **WEIKERT, S. R-test**, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools. *CIRP annals*, 2004, vol. 53, no 1, p. 429-432.

- [27]. **WANG, C.** Dimensional machine tool positioning accuracy: laser vector measurement vs. linear measurement. *Tooling & Production*, 2003
- [28]. **FONTAINE, Michaël.** *Modélisation thermomécanique du fraisage de forme et validation expérimentale*. 2004. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine-Metz
- [29]. **AHLEM, MECHTA.** *Développement d'un simulateur pour simuler les erreurs d'une machine-outil à commande numérique durant un trajet circulaire*. 2017. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA
- [30]. **Huang, S. C.** (1995). Analysis of a model to forecast thermal deformation of ball screw feed drive systems. *International Journal of Machine Tools and manufacture*, 35(8), 1099-1104.
- [31]. **Tan, B., Mao, X., Liu, H., Li, B., He, S., Peng, F., & Yin, L.** (2014). A thermal error model for large machine tools that considers environmental thermal hysteresis effects. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 82, 11-20.
- [32]. **Wang, Y., Meng, X., Yang, X., & Liu, J.** (2014). Influence of convection and radiation on the thermal environment in an industrial building with buoyancy-driven natural ventilation. *Energy and Buildings*, 75, 394-401.
- [33]. **Zhang, C., Gao, F., & Yan, L.** (2017). Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature. *Precision Engineering*, 47, 231-238.
- [34]. **Lee, D. S., Choi, J. Y., & Choi, D. H.** (2003). ICA based thermal source extraction and thermal distortion compensation method for a machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(6), 589-597.
- [35]. **Wu, C. W., Tang, C. H., Chang, C. F., & Shiao, Y. S.** (2012). Thermal error compensation method for machine center. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5-8), 681-689.
- [36]. **BITAR-NEHME, Elie.** *Modélisation des erreurs thermiques des machines-outils numériques à cinq-axes*. 2017. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal.
- [37]. <https://www.machine-outil.com/t503/p2532-mesure-par-interferometre-laser.html>.
- [38]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson_interferometer)
- [39]. Help de l'interféromètre.

**[40]. W.L. Feng, X.D. Yao, A. Azamat, J.G. Yang,** Straightness error compensation for large CNC gantry type milling centers based on B-spline curves modeling, *Int. J. Mach.Tools Manuf.*88(2015)165–174.

**[41]. K.G. Fan, J.G. Yang, L.Y. Yang,** Unified error model based spatial error compensation for four types of CNC machining center: Part II- unified model based spatial error compensation, *Mech. Syst. Signal Process.* 49 (2014) 63–76.

**[42]. Slamani M,** Mayer JRR, Cloutier GM (2010) Modeling and experimental validation of machine tool motion errors using degree optimized polynomial including motion hysteresis. *Exp Tech* 35(1) 37–44

## **Résumé**

Ce travail présente les résultats expérimentaux issus de la caractérisation de la précision d'une machine-outil à commande numérique sous la forme d'erreurs de positionnement linéaires et de variations de température à l'aide d'un système de mesure laser de Renishaw ainsi que d'une unité de contrôle environnemental. La machine étudiée est une machine-outil à commande numérique Matsuura MC.760 VX. La précision de la machine est caractérisée sous la forme d'erreurs géométriques et thermiques en fonction de la position de l'axe nominal de la machine-outil et de l'effet environnemental (température de l'air, pression de l'air et humidité relative). L'étude ultérieure s'est concentrée sur le développement d'un modèle par lequel l'effet de ces sources d'erreur peut être prédit. Les résultats montrent que la précision de positionnement linéaire est meilleure lorsque la machine est à froid et se détériore avec l'augmentation du temps de fonctionnement. Les résultats montrent également que le modèle développé peut bien prédire l'erreur thermique et l'erreur géométrique statique sous une position et température donnée.

**Mots-clés :** Machine-outil, erreur géométrique, erreur thermique, modélisation, prédiction

## **Abstract**

This work presents the experimental results for the characterization of the accuracy of a CNC machine tool in terms of linear positioning errors and temperature variations using a Renishaw laser measurement system and an environmental control unit. The machine studied is a Matsuura MC.760 VX CNC machine tool. The accuracy of the machine is characterized in the form of geometric and thermal errors depending on the position of the nominal axis of the machine tool and the environmental effect (air temperature, air pressure and relative humidity). The subsequent study is focused on the development of a prediction for these sources of error. The results show that the linear positioning accuracy is better when the machine is cold and deteriorates with increasing operating time. The results also show that the developed model can accurately predict the thermal error and the static geometric error under a given position and a given temperature.

**Keywords:** Machine tool, geometric error, thermal error, modeling, prediction

## ملخص:

يعرض هذا العمل النتائج التجريبية من توصيف دقة أداة آلة التحكم العددي باستعمال الحاسوب في شكل أخطاء تحديد المواقع الخطية وتغيرات درجات الحرارة باستخدام نظام قياس ليزر Renishaw بالإضافة إلى وحدة التحكم البيئي الآلة المدروسة هي أداة آلة CNC Matsuura MC.760 VX. تتميز دقة الآلة في شكل أخطاء هندسية وحرارية اعتماداً على موضع المحور الاسمي لأداة الماكينة والتأثير البيئي (درجة حرارة الهواء وضغط الهواء والرطوبة النسبية). وركزت الدراسة اللاحقة على تطوير نموذج يتم من خلاله تأثير مصادر الخطأ التي يمكن توقعها. بينت النتائج أن دقة التموضع الخطي تكون أفضل عندما تكون الآلة باردة وتتدهور مع زيادة وقت التشغيل. تظهر النتائج أيضاً أن النموذج المطور يمكنه التنبؤ بالخطأ الحراري والخطأ الهندسي الثابت جيداً تحت موضع ودرجة حرارة معينين.

**الكلمات المفتاحية:** أداة الآلة، الخطأ الهندسي، الخطأ الحراري، النمذجة، التنبؤ.