



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Maintenance

Thème :

Évaluation de la performance des machines-outils à commande numérique par interféromètre laser

Proposé et dirigé par :

Dr. Slamani Mohamed

Présenté par :

Bouaya Soheyb Antara

Année Universitaire : 2015 / 1016

N° d'ordre : GM/...../2016

DEDICACE

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

À mes frères,

REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier **Mon Dieu**, le tout puissant, de m'avoir donné la force d'arriver à terme de ce travail.*

*Je remercie chaleureusement **Dr SLAMANI Mohamed**, mon encadreur pour son aide précieuse, et j'ai apprécié son l'esprit scientifique de haut niveau avec caractère humain a travers la formation des années d'études de master.*

*Mes remerciements les plus forts **mes parents**, et à tous mes amis.*

Je tiens aussi à remercier le président et les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

RESUME

Les machines-outils sont utilisées pour produire des pièces complexes de tailles diverses à partir de différents types de matériau. Ce travail intensif peut provoquer l'usure des composantes, générer de la chaleur à l'intérieur et à l'extérieur, déformant les composants de la machine et engendrant des erreurs dans le produit fini. Les pièces en métal lourd peuvent également être difficiles à contrôler avec précision. Leur masse importante crée des effets d'inertie tels que claquements et autres types de vibrations.

Les procédés modernes d'usinage imposent des exigences particulières en matière d'équilibrage et de précision des machines-outils. Une haute qualité d'équilibrage assure une stabilité de fonctionnement maximale, même à des vitesses de rotation élevées, et garantit ainsi les meilleurs résultats d'usinage possibles. L'un des principaux critères de performance pour une machine-outil est sa capacité à fabriquer des pièces dimensionnellement et géométriquement précises.

Il est reconnu que la propagation des erreurs paramétriques forme la principale source d'erreur dans le volume de travail. Afin d'améliorer l'exactitude des machines-outils par l'étalonnage de ces erreurs, les erreurs paramétriques doivent être définies, mesurées et modélisées mathématiquement.

La mesure directe, en utilisant un système de mesure approprié comme l'interféromètre laser, peut toujours déterminer avec précision les erreurs d'une machine-outil. Dans ce travail, les différentes erreurs des machines-outils et les procédures utilisées pour les mesurer sont discutées. Le protocole et les procédures d'installation et d'alignement utilisées pour la prise des données par l'interféromètre laser Renishaw sont aussi discutées.

Finalement, des résultats expérimentaux tirés de l'article d'Okafor pour l'évaluation de la précision d'un centre d'usinage vertical sous la forme d'erreurs linéaires, angulaires et la variation de température ont été analysés dans ce mémoire.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Description des écarts principaux qui affectent la précision du système d'usinage ..4	4
Figure I-2 Schéma de l'écart de mouvement d'une articulation prismatique de machine.7	7
Figure I-3 Laison lineaire typique d'une machine-outil.....7	7
Figure I-4 Tableau de Les erreurs liées à l'articulation prismatique suivant l'axe Y8	8
Figure I-5 Schéma d'écart de rectitude horizontale.....8	8
Figure I-6 Schéma d'écart de rectitude vertical.....8	8
Figure I-7 Schéma d'écart de lacet9	9
Figure I-8 Schéma d'écart de tangage9	9
Figure I-9 Schéma d'écart de roulis10	10
Figure I-10 Schéma d'erreur d'Abbé10	10
Figure I-11 les sources thermiques possibles12	12
Figure II-1 Laser interféromètre13	13
Figure II-2 Laser 5/6D™14	14
Figure II-3 Ballbar QC20-W sans fil Bluetooth16	16
Figure II-4 Appareil de mesure Ballbar QC20:17	17
Figure II-5 Tests sur arc 360°18	18
Figure II-6 Tests sur arc partiel de 220°18	18
Figure II-7 Analyse volumétrique dansLogiciel Ballbar19	19
Figure II-8 Tableau de Spécifications système QC20-W19	19
Figure II-9 Systèmes de mesure en 2D KGM20	20
Figure II-10 Tableau de Spécification technique de KGM21	21
Figure II-11 Capteurs et bille en position engagée.....22	22
Figure II-12 système de CapaBille23	23
Figure II-13 porte-capteur23	23
Figure II-14 positionneur.....24	24
Figure II-15 Assemblage du positionneur dans le porte-outil pour positionner la bille.....24	24

LISTE DES FIGURES

Figure II-16 Bille et support central.	25
Figure II-17 Conditionneur de LionPrecision® avec 6 cartes.....	26
Figure II-18 Sortes d'acquisition sur ordinateur portable.	26
Figure II-19 Interface de programme Lab. VIEW développé pour CapaBille.....	27
Figure III-1 système de l'interféromètre laser.....	28
Figure III-2 Interféromètre de Michelson de base.....	29
Figure III-3 Interférence constructive.....	30
Figure III-4 Interférence destructive.....	30
Figure III-5 Laser XL-80.....	30
Figure III-6 Tableau des diodes d'état du laser.....	31
Figure III-7 Compensateur XC-80 et ses capteurs.....	32
Figure III-8 Trépied.....	33
Figure III-9 Mallette pour système complet (plateau retiré).....	34
Figure III-10 Mallette système complet (plateau).....	35
Figure III-11 Tableau de contenu de la mallette pour système complet.....	36
Figure III-12 Mallette système à poignées intégrées avec Mallette pour trépied.....	37
Figure III-13 Kit de montage optique.....	37
Figure III-14 Optique de mesure linéaire.....	38
Figure III-15 Optiques de mesure angulaire.....	39
Figure III-16 Optique de mesure de rectitude.....	40
Figure III-17 Orientation pour mesurer la déviation de rectitude horizontale.....	41
Figure III-18 Orientation pour mesurer la déviation de rectitude verticale.....	41
Figure III-19 Réflecteur de rectitude représentée dans l'orientation pour la mesure de la déviation horizontale.....	42
Figure III-20 Miroir pivotant.....	42
Figure III-21 Miroir pivotant utilisé avec des axes inclinés à un angle supérieur à 45° par rapport à l'horizontale.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure III-22 Miroir de renvoi fixe.....	43
Figure III-23 Miroir tournant fixe – application typique.....	44
Figure III-24 Laser XL (dimensions en mm)	45
Figure III-25 Unité de compensation d'environnement XC (dimensions en mm)	45
Figure III-26 Dimensions et poids Kit de montage optique	46
Figure III-27 Dimensions et poids Optique de mesure linéaire	47
Figure III-28 Dimensions et poids Optique de mesure angulaire.....	48
Figure III-29 Dimensions et poids Optique de mesure de rectitude.....	49
Figure III-30 Dimensions et poids accessoires miroir tournant fixe et miroir pivotant	50
Figure III-31 Interface de Logiciel LaserXL.....	51
Figure III-32 Interface de Logiciel QuickViewXL™	52
Figure IV-1 Configuration type du système pour mesurer une position	54
Figure IV-2 Configuration optique pour la mesure linéaire	55
Figure IV-3 Principe de mesure	55
Figure IV-4 Montage de l'optique linéaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage	56
Figure IV-5 Mesure de positionnement linéaire de l'axe X sur un centre d'usinage vertical ...	57
Figure IV-6 Axes horizontaux – interféromètre mobile ou réflecteur mobile	58
Figure IV-7 Axes horizontaux – interféromètre mobile ou réflecteur mobile avec bras de référence verticale.....	58
Figure IV-8 Axes horizontaux – à angle droit de la tête laser – réflecteur mobile	58
Figure IV-9 Axes horizontaux – à angle droit de la tête laser – miroir tournant et interféromètre stationnaires – réflecteur mobile.....	59
Figure IV-10 Axes verticaux – réflecteur mobile.....	59
Figure IV-11 Axes inclinés – miroir pivotant et interféromètre stationnaires – réflecteur mobile.....	59
Figure IV-12 Erreur de parcours mort.....	63
Figure IV-13 Erreur cosinusoidale	63

LISTE DES FIGURES

Figure IV-14 Tableau d'augmentation l'erreur cosinusoidale	64
Figure IV-15 Erreur de décalage d'Abbe	64
Figure IV-16 Tableau d'exemples d'erreurs en microns provoqués par des écarts grandissants	65
Figure IV-17 Tableau de Spécifications de mesure linéaires	66
Figure IV-18 Configuration système type pour mesure d'angle de tangage et de lacet	68
Figure IV-19 Configuration optique pour la mesure angulaire	69
Figure IV-20 Montage de l'optique angulaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage	70
Figure IV-21 Optique angulaire montée sur machine à mesurer tridimensionnelle.....	71
Figure IV-22 Mesure de tangage en axe X sur un centre d'usinage vertical à lit mobile	71
Figure IV-23 Mesure d'erreur de lacet - axe horizontal	72
Figure IV-24 Mesure d'erreur de tangage - axe horizontal.....	72
Figure IV-25 Mesure d'erreur de lacet - axe horizontal - à angle droit de la tête laser	72
Figure IV-26 Mesure d'erreur de lacet à l'aide d'un miroir tournant fixe	73
Figure IV-27 Mesure d'erreur de tangage ou de lacet - axe vertical	73
Figure IV-28 Tableau des Erreurs Sin theta	79
Figure IV-29 Tableau de Spécification de la mesure angulaire	80
Figure V-1 Milacron Sabre 750.....	81
Figure V-2 Schéma de l'emplacement des capteurs de température sur la machine Sabre 750 [okafor].....	82
Figure V-3 Schéma d'interféromètre laser pour mesurer les erreurs de déplacement linéaire [Okafor]	82
Figure V- 4 Schéma des déplacements de la table avec distance de dépassement.....	83
Figure V-5 Programme CNC l'axe Y [Okafor]	84
Figure V-6 Distribution de la température pour les axes X, Y et Z.....	85
Figure V-7 La réponse Finale de la température et de l'humidité de l'air.....	85
Figure V-8 Erreur de déplacement linéaire pour l'axe X.....	86

LISTE DES FIGURES

Figure V-9 Erreur d'axe Y de déplacement linéaire.....	87
Figure V-10 Erreur de déplacement linéaire de l'axe Z.....	88
Figure V-11 Précision du déplacement linéaire et jeu d'inversion max (ASME B5.54).....	89
Figure V-12 Variation de la température pour l'axe X.....	89
Figure V-13 Variation de la température pour l'axe Y.....	90
Figure V-14 Variation de la température pour l'axe Z.....	90
Figure V-15 Pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe X.....	91
Figure V-16 Pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe Y.....	91
Figure V-17 Pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe Z.....	92
Figure V-18 axe X erreur de tangage.....	93
Figure V-19 axe X erreur de lacet.....	94
Figure V-20 Erreur de tangage de l'axe Y.....	95
Figure V-21 Erreur de lacet de l'axe Y.....	95
Figure V-22 Erreur de tangage de l'axe Z.....	96
Figure V-23 Erreur de lacet de l'axe Z.....	97
Figure V-24 erreur angulaire (ASME B5.54).....	98
Figure V-25 erreur angulaire (ASME B5.54).....	98
Figure V-26 La variation de température de l'axe X pendant mesure d'erreur de tangage.....	99
Figure V-27 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant l'axe X mesure d'erreur de tangage.....	99
Figure V-28 La variation de température pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe X.....	100
Figure V-29 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de lacet.....	100
Figure V-30 La variation de température au cours de mesure d'erreur de tangage de l'axe Y.....	101
Figure V-31 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de tangage de l'axe Y.....	101
Figure V-32 La variation de température au cours de mesure d'erreur de lacet de l'axe Y....	102

LISTE DES FIGURES

Figure V-33 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe Y.....	102
Figure V-34 La variation de température au cours mesure d'erreur de tangage de l'axe Z....	103
Figure V-35 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de tangage de l'axe Z-.....	103
Figure V-36 La variation de température lors mesure d'erreur de lacet de l'axe Z-.....	104
Figure V-37 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe Z.	104

TABLE DE MATIERES

DEDICACE

REMERCIEMENTS

RESUME

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
I-Écarts de la machine	3
I-1 Écarts dynamiques	4
I-1-1 Effet dues aux déformations élastiques.....	5
I-1-2 Effet de suivi de trajectoires	5
I-1-3 Effet dues aux modes propres	5
I-2 Écart quasi-statique	5
I-2-1 Écarts géométriques	6
I-2-2 Écarts cinématique	6
I-2-2-1 Rectitude horizontale	8
I-2-2-2 Rectitude verticale	8
I-2-2-3 Lacet.....	9
I-2-2-4 Tangage.....	9
I-2-2-5 Roulis	9
I-2-2-6 Erreur d'Abbé	10
I-3 Écarts thermiques.....	11
I-4 Erreur causée par les charges de coupe.....	12
CHAPITRE II INSTRUMENT DES MESURES DES ERREURES	13
II-1 Laser :	13
a) Laser interféromètre.....	13
b) Laser 5/6D.....	14
II-2 Ballbar QC20-W	16

TABLE DE MATIERE

II-2-1 Séquence de test Ballbar QC20-W	16
1) Configuration	16
2) Saisie de données	17
3) Analyse des données	19
II-2-2 Spécifications système QC20-W	19
II-3 Systèmes de mesure en 2D KGM 181, KGM 182/ 282	20
II-3-1 Support de la mesure et traitement du signal.....	20
II-3-2 Spécification technique	21
II-4 Capteur de proximité CAPABILLE	22
II-4-1 Parties mécaniques	23
II-4-1-1 Porte-capteur	23
II-4-1-2 Positionneur.....	23
II-4-1-3 Bille	24
II-4-2 Capteurs capacitifs.....	25
II-4-3 Système d'acquisition.....	25
II-4-4 Logiciel.....	26
CHAPITRE III DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE LASER	28
III-1 Principes d'interférométrie	28
III-1-1 L'interféromètre de Michelson	28
a) Interférence constructive.....	29
b) Interférence destructive.....	30
III-2 Composants de base	30
III-2-1 Laser XL-80	30
III-2-2 Compensateur XC-80 et ses capteurs.....	32
III-2-3 Trépied et plate-forme.....	33
III-2-4 Mallettes système	34
III-3 Les optiques des mesures laser avec Kit de montage.....	37

TABLE DE MATIERE

III-3-1 Kit de montage optique	37
III-3-2 Optique de mesure linéaire.....	38
III-3-3 Optiques de mesure angulaire	39
III-3-4 Optique de mesure de rectitude.....	40
III-3-4-1 Interféromètre de rectitude	41
III-3-4-2 Réflecteur de rectitude	41
III-4 Accessoire des optiques des mesures	42
III-4-1 Miroir pivotant	42
III-4-2 Miroir de renvoi fixe	43
III-5 Dimensions et poids	44
III-5-1 Laser XL-80	44
III-5-2 Unité de compensation d'environnement XC.....	45
III-5-3 Kit de montage optique	46
III-5-4 Optique de mesure linéaire.....	47
III-5-5 Optique de mesure angulaire.....	48
III-5-6 Optique de mesure de rectitude.....	49
III-5-7 Accessoires.....	50
III-6 Logiciels.....	51
III-6-1 Logiciel LaserXL	51
III-6-2. QuickViewXL™	51
CHAPITRE IV MESURE PAR L'INTERFEROMETRE LASER.....	53
IV-1 Mesure linéaire.....	53
IV-1-1 Procédure pour effectuer une mesure linéaire	53
IV-1-2 Configuration de mesure linéaire.....	53
IV-1-3 Principes de mesure linéaire	55
IV-1-4 Montage de l'optique linéaire.....	56
IV-1-5 Configurations les optiques des mesures linéaires.....	57

TABLE DE MATIERE

IV-1-6 Alignement du faisceau linéaire.....	60
IV-1-7 Facteurs affectant la précision des mesures linéaires	62
IV-1-7-1 Erreur de parcours mort	62
IV-1-7-2 Erreur cosinusoidale.....	63
IV-1-7-3 Erreur de décalage d'Abbe	64
IV-1-7-4 Erreur de parcours mort du matériau	65
IV-1-8 Positionnement correct de l'optique pour minimiser les erreurs de mesure.....	66
IV-1-9 Spécifications.....	66
IV-2 Mesure angulaire.....	67
IV-2-1 Procédure pour effectuer une mesure angulaire.....	67
IV-2-2 Configuration de mesure angulaire	67
IV-2-3 Principes de la mesure angulaire.....	69
IV-2-4 Montage de l'optique angulaire	70
IV-2-5 Configurations les optiques de mesure angulaire	71
IV-2-6 Procédure d'alignement de l'angle du faisceau	73
IV-2-7 Facteurs affectant la précision des mesures angulaires.....	78
IV-2-7-1 Erreur d'alignement	78
IV-2-7-2 Erreur d'optique angulaire	78
IV-2-7-3 Calcul arc-sinus.....	78
IV-2-8 Positionnement de l'optique pour minimiser les erreurs de mesure.....	80
IV-2-9 Spécification	80
CHAPITRE V PARTIE EXPERIMENTAL	81
V-1 Les erreurs de position linéaires.....	81
V-1-1 Procédures expérimentales	81
V-1-2 Résultats expérimentaux	84
V-1-2-1 Erreur de L'axe X.....	86
V-1-2-2 Erreur de l'axe Y	87

TABLE DE MATIERE

V-1-2-3 Erreur de L'axe Z.....	88
V-1-2-4 Variations de la température avec la pression d'air et la variation relative de l'humidité pour les axes X, Y, Z.....	89
V-2 Les erreurs angulaires.....	92
V-2-1 Résultats de l'axe X.....	92
a) Erreur de tangage de l'axe X.....	92
b) Erreur de lacet de l'axe X.....	93
V-2-2 Résultats de l'axe Y.....	94
a) Erreurs de tangage d'axe Y.....	94
b) Erreurs de lacet de l'axe Y.....	95
V-2-3 Résultats de l'axe Z.....	96
Les erreurs de tangage et lacet de l'axe Z.....	96
V-2-4 Variations de la température avec la pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe X.....	99
a) Erreur de tangage pour l'axe X.....	99
b) L'erreur de lacet de L'axe X.....	100
V-2-5 La variation de température avec La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant l'axe Y.....	101
a) L'erreur de tangage de L'axe Y.....	101
b) Erreur de lacet de L'axe Y.....	102
V-2-6 La variation de température avec La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant l'axe Z.....	103
a) L'erreur de tangage de L'axe Z.....	103
b) L'erreur de l'acet de L'axe Z.....	104
CONCLUSION	106
REFERANCE	108

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les machines-outils sont toujours jouées un rôle important dans la production, tant pour l'usinage de masse que pour l'outillage ou les produits hautement précis. Les progrès technologiques ont beaucoup contribué à l'amélioration des MOCN. Les progrès informatiques comme l'augmentation de la capacité de mémoire et la vitesse des processeurs, les composants comme les moteurs linéaires ainsi que les algorithmes des contrôleurs plus performants ont fait en sorte qu'aujourd'hui on constate la présence de MOCN à haute vitesse plus précise et performante.

A l'heure actuelle, beaucoup de constructeurs de machines-outils annoncent des précisions très élevées. L'utilisateur constate, lors des travaux qu'il exécute sur sa machine, des résultats qui s'éloignent fortement de ceux annoncés par le constructeur. En effet, si ce dernier peut garantir certaines valeurs de la précision des machines qu'il fabrique, il se limite à quelques éléments seulement sans tenir compte de facteurs perturbateurs qui dépendent des conditions d'emploi.

Sur toutes les machines-outils, on peut grouper les diverses erreurs qui interviennent lors d'un usinage en plusieurs catégories essentielles, à savoir :

- Erreurs dues à l'imprécision de l'organe qui mesure les déplacements ou les mouvements d'un élément mobile (table, coulisseau, broche, etc.).
- Erreurs géométriques de la machine à vide, c'est-à-dire lorsque le poids de la pièce en usinage et les efforts de coupe sont nuls.
- Erreurs géométriques additionnelles provenant de l'influence du poids de la pièce ainsi que des efforts de coupe.
- Erreurs provenant des variations de la température, aussi bien du local dans lequel la machine est installée que celles provoquées par les échauffements locaux inévitables de la machine.
- Erreurs provenant de l'usure provoquée avec le temps par les frottements et dont toute machine souffre plus ou moins après un certain nombre d'années de service.

Bien que les machines-outils à commande numérique modernes offrent d'excellentes spécifications, leurs performances (même quand elles sont neuves) peuvent être affectées par des fondations inadéquates, des emplacements incorrects et des installations médiocres. Une fois mises en service, elles sont aussi soumises à l'usure et aux détériorations que produisent les collisions ou les mauvais usages.

C'est pourquoi, il est essentiel non seulement que les performances des machines-outils soient régulièrement vérifiées mais aussi de le faire avant de lancer la production des pièces.

Pour éviter que la machine produit des pièces hors tolérance, ce qui se traduit en perte de matériel, de productivité et de qualité, il est opportun d'améliorer, de maintenir et de contrôler la précision des machines, en utilise la mesure direct.

L'objectif de ce projet est de présenter une méthode pour l'évaluation de la performance des machines-outils à commande numérique en utilisant la méthode de mesure directe par l'interféromètre laser.

CHAPITRE I

Revue De La Littérature

CHAPITRE I REVUE DE LA LITTÉRATURE

I- Écarts de la machine

Les principales sources d'erreur qui influencent la précision d'une machine-outil peuvent être classées comme suit (Figure I-1) [1]:

- écart dynamique
- écart quasi statique
 - écart géométrique
 - écart cinématique
 - écart thermique
- Erreur causée par la charge de coupe

En outre les erreurs de machines-outils peuvent être divisées en erreurs systématiques (précision) et erreurs aléatoires [2]. Les erreurs systématiques peuvent être décrites et mesurées, permettant la modélisation et la prévision, tandis que les erreurs aléatoires sont difficiles à prévoir.

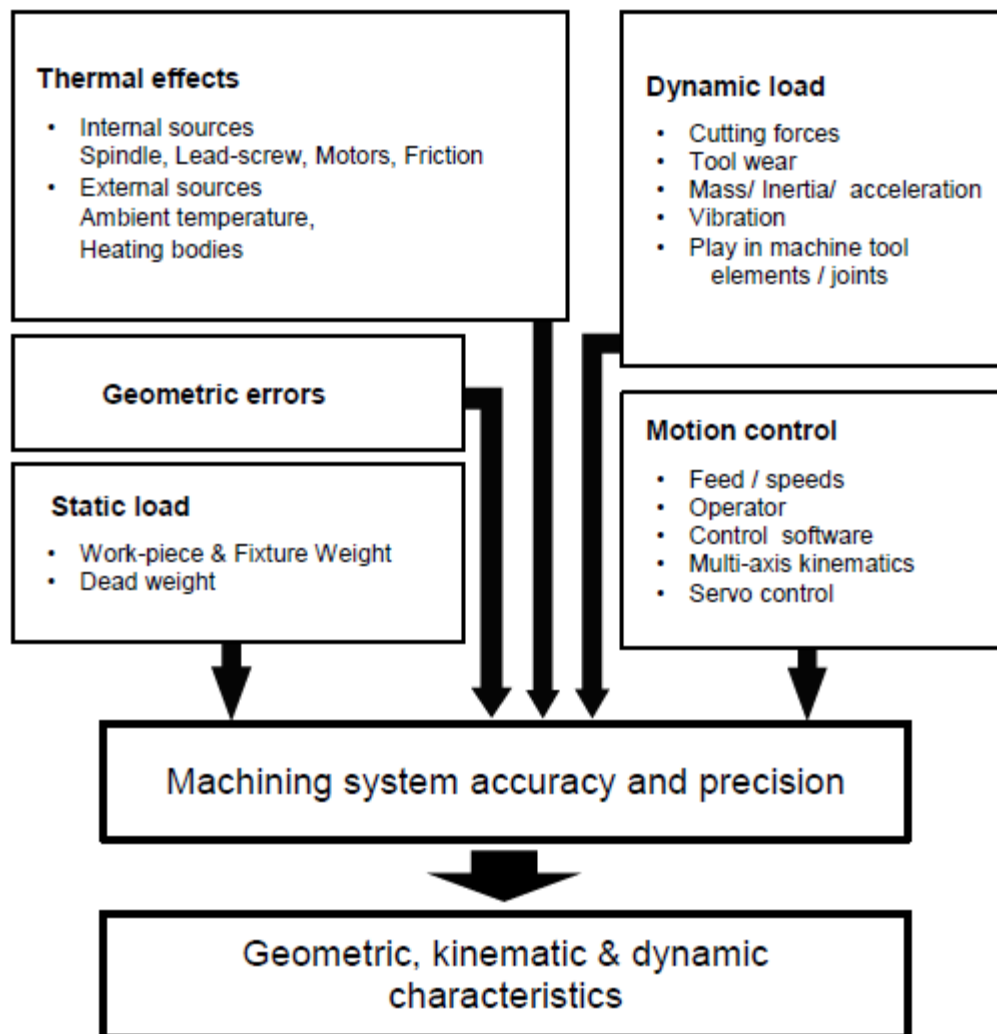


Figure I-1 Description des écarts principaux qui affectent la précision du système d'usinage.

I-1 Écarts dynamiques

La boucle structurelle d'une machine-outil est généralement soumise à des effets dynamiques qui influencent son comportement dynamique. Ces effets proviennent des forces variables telles que l'évolution rapide des forces de coupe pendant le processus d'usinage, les forces d'inertie provoquées par l'accélération ou la décélération des axes ainsi que des vibrations induites par les déformations, en raison des caractéristiques dynamiques inégales des éléments structuraux [3], [4].

I-1-1 Effet dues aux déformations élastiques

Cette sollicitation est importante, puisque des efforts de coupe ainsi que des forces d'inertie sont couplés avec une grande accélération. Ainsi, plus le procédé de coupe génère des efforts importants sur la structure, plus ces erreurs sont conséquentes.

I-1-2 Effet de suivi de trajectoires

Ces erreurs dépendent de la valeur des paramètres de la commande numérique et de la direction des efforts de coupe. Ainsi, plus la commande est dynamique plus ces erreurs sont augmentées.

I-1-3 Effet dues aux modes propres

Les modes propres d'une structure sont liés à la rigidité statique. Dans le cas de l'usinage avec une structure parallèle, la valeur de ce mode propre dépend de la position de l'outil dans l'espace de travail. Plus le procédé génère des efforts importants sur la structure en utilisant des mouvements discontinus en tangence ou en courbure à une fréquence élevée, plus ces erreurs ne doivent être prises en compte.

Outre, le comportement dynamique de la boucle structurale affecte également la trajectoire réalisée [5]. La rigidité dynamique de tous les composants de la machine-outil est responsable des erreurs causées par les efforts de coupe [6]. Les vibrations auto induites et forcées de la structure de machine, les déflexions sous les forces d'inertie, les erreurs de contrôleur et le mouvement de la broche sont des sources qui provoquent les erreurs dynamiques [7].

Ces dernières varient rapidement et affectent les caractéristiques locales de la pièce à fabriquer comme la rugosité de surface ou les arrondies de coins plutôt que sa précision dimensionnelle [5].

I-2 Écart quasi-statique

Les erreurs quasi-statiques constituent environ 70 % des erreurs attribuables aux machines-outils [8]. Et sont les erreurs de position relative entre l'outil et la pièce qui changent lentement avec le temps [7].

Elles sont associées à la structure de la machine comme les imperfections géométriques/cinématiques dans les systèmes de guidage, la rigidité finie de la boucle structurale sous une charge statique et les expansions thermiques dans la structure de la machine-outil [5]. Elles comportent principalement l'écart géométrique et cinématique ainsi l'écart thermique.

I-2-1 Écarts géométriques

Les erreurs géométriques sont associées aux composantes structurelles de la machine et affectent directement les déplacements des éléments mobiles par rapport au système de référence. Ces imperfections peuvent provenir de défauts géométriques sur une articulation, lorsqu'une erreur modifier l'orientation d'un ou de plusieurs composants de la MOCN.

I-2-2 Écarts cinématique

Les machines-outils sont le mécanisme spatial avec des joints qui peuvent être modélisée comme cinématique paires. Selon le type de machine, Les erreurs cinématiques sont des variations de position dans le comportement fonctionnel des éléments d'une machine-outil.

L'écart cinématique de mouvement sont étroitement liées à des erreurs géométriques des composants structurels de la machine-outil, et qui peut être partiellement considéré comme un effet résultant des erreurs géométriques lors du déplacement de coordonnées des composants fonctionnels. En tant que tel, des erreurs de mouvement sont des fonctions d'au moins la position de l'axe porteur et se produisent principalement pendant l'exécution des algorithmes d'interpolation.

L'écart cinématique d'une machine-outil se définit comme l'écart de mouvement relatif entre l'outil et la pièce. Une cause importante de l'écart cinématique provient du mouvement de chaque axe de la machine qui peut être décrit par six degrés de liberté. Trois translations et trois rotations (voir la figure I-2) alors qu'idéalement un seul degré de liberté est présent suivant l'axe du mouvement souhaité qu'il soit linéaire ou de rotation.

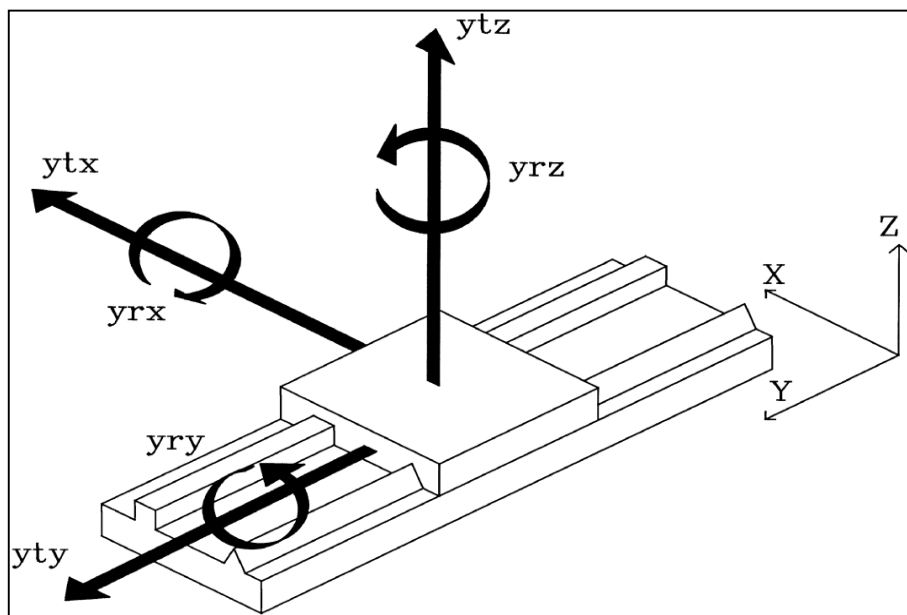


Figure I-2 Schéma de l'écart de mouvement d'une articulation prismatique de machine [9].

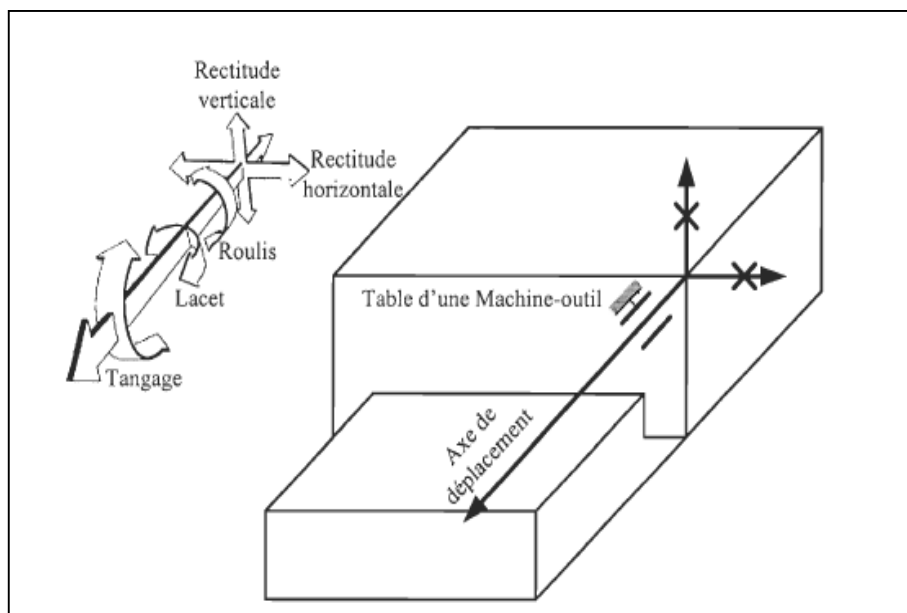


Figure I-3 Liaison linéaire typique d'une machine-outil.

Selon la norme ISO 230-1 [9], les six erreurs d'une articulation prismatique suivant l'axe Y illustrées à la Figure I-2 et I-3 sont énumérées au Figure I-4 :

Erreur	Description
yty	erreur de positionnement selon l'axe de mouvement y (écart d'échelle)
ytx	erreur de positionnement selon l'axe x (erreur de rectitude)
ytz	erreur de positionnement selon l'axe z (erreur de rectitude)
yry	erreur de rotation suivant l'axe du mouvement (roulis)
yrz	erreur de rotation suivant l'axe z (lacet)
yrx	erreur de rotation suivant l'axe x (tangage)

Figure I-4 Tableau de Les erreurs liées à l'articulation prismatique suivant l'axe Y.

I-2-2-1 Rectitude horizontale

La rectitude horizontale (Figure I-5) est une déviation horizontale par rapport à la ligne directrice du mouvement. Cette déviation par rapport à un mouvement selon l'axe X engendrera une erreur de position selon l'axe Y.

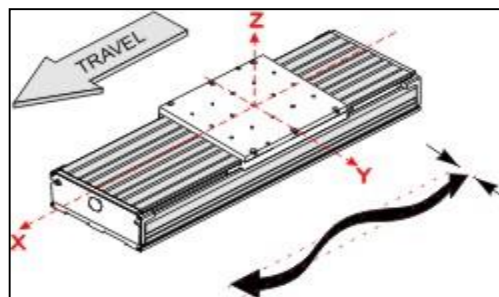


Figure I-5 Schéma d'écart de rectitude horizontale.

I-2-2-2 Rectitude verticale

La rectitude verticale (Figure I-6) est une déviation verticale par rapport à la ligne directrice du mouvement. Cette déviation par rapport à un mouvement selon l'axe X engendrera une erreur de position selon l'axe Z.

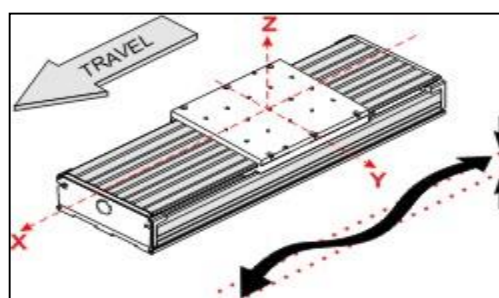


Figure I-6 Schéma d'écart de rectitude vertical.

I-2-2-3 Lacet

Le lacet (Figure I-7) est une rotation (déviatio n angulaire par rapport à la direction idéale du mouvement) autour d'un axe dans le plan vertical qui est perpendiculaire à la direction du mouvement. Selon l'axe X, le lacet engendrera une erreur d'Abbé selon les axes X et Y.

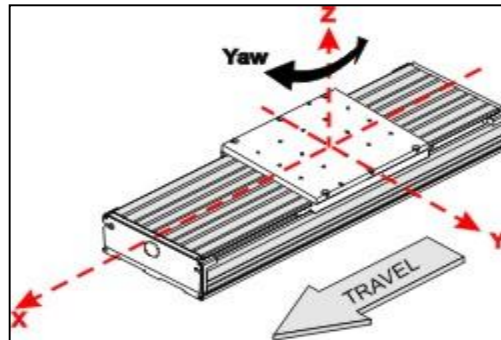


Figure I-7 Schéma d'écart de lacet.

I-2-2-4 Tangage

Le tangage (Figure I-8) est une rotation (déviatio n angulaire par rapport à la direction idéale du mouvement) autour de l'axe dans le plan horizontal qui est perpendiculaire à la direction du mouvement. Selon l'axe X, un tangage engendrera une erreur d'Abbé selon les axes X et Z.

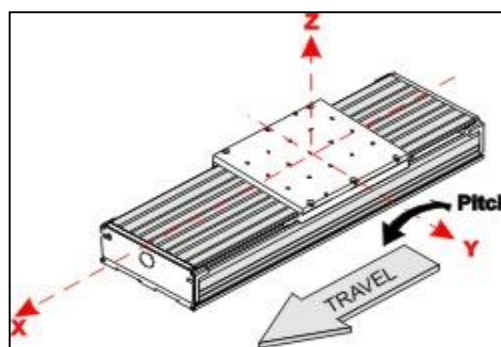


Figure I-8 Schéma d'écart de tangage.

I-2-2-5 Roulis

Le roulis (Figure I-9) est une rotation (déviatio n angulaire par rapport à la direction idéale du mouvement) autour d'un axe dans le plan horizontal parallèle à la direction du

mouvement. Selon l'axe X, le roulis engendrera une erreur d'Abbé dans la direction des axes Y et Z.

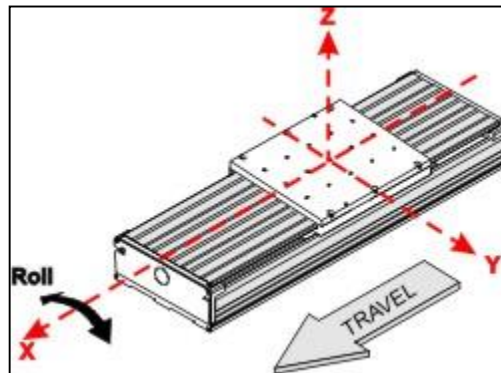


Figure I-9 Schéma d'écart de roulis.

I-2-2-6 Erreur d'Abbé

L'erreur d'Abbé (Figure I-10) est une erreur de positionnement linéaire causée par la combinaison d'une erreur angulaire dans les roulements (sens du déplacement), d'un décalage de distance entre l'équipement de mesure (vis sans fin, codeur...) et le point considéré.

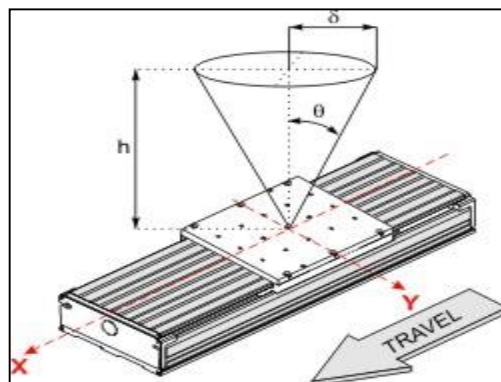


Figure I-10 Schéma d'erreur d'Abbé.

h : étant la distance entre le codeur et le point de travail. Pour réduire l'erreur d'Abbé, la distance h doit être la plus petite possible.

I-3 Écarts thermiques

Les effets thermiques sont parmi les principales contributions de précision dans un système d'usinage. La chaleur peut être introduite à l'intérieur, générée par des composants mobiles de la machine-outil tels que les moteurs, la broche de transmission, roulements, écrous et vis-mère par le procédé de coupe. Des sources externes de chaleur créent également des gradients de température qui influent sur les différentes parties du système. Les gradients de température induisent des contraintes élastiques à boucle structurelle du système en raison des différents coefficients de dilatation des composants, de créer des distorsions qui influencent leur géométrie et produisent des erreurs dans la position relative de la pointe de l'outil par rapport à la pièce de travail [10], [11], [12], [13], [14].

Évidemment, tous les systèmes d'usinage est sensible aux différents effets thermiques, rendant ainsi important d'avoir une vision claire de ce qui sont les principales sources de chaleur et la contribution de chacun d'entre eux sur les erreurs géométriques. Les erreurs thermiques ont un caractère non linéaire complexe qui rend difficiles à manipuler. Les principes causes de déformations thermiques sont la variation de la température de l'atelier (par exemple entre l'hiver et l'été, le matin et après-midi).

La figure I-11 présente les sources thermiques possibles ainsi que leur mode d'action dans une machine-outil.

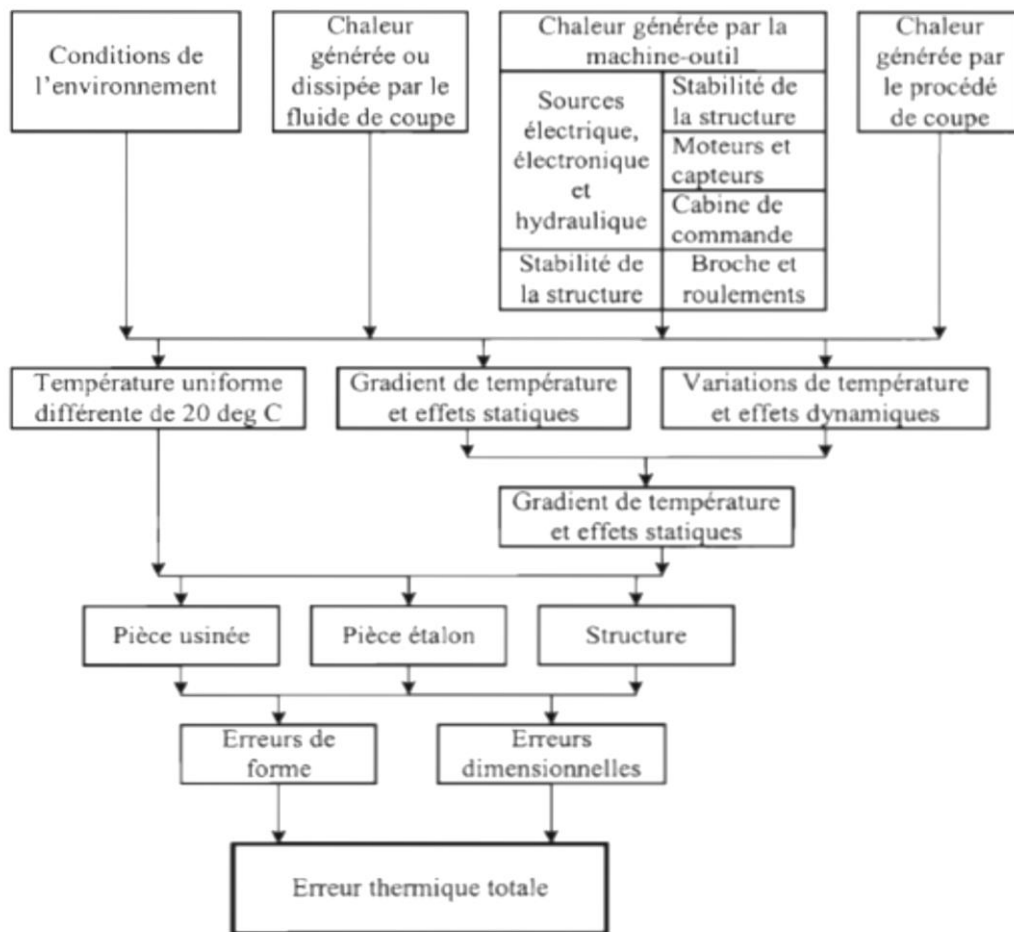


Figure I-11 les sources thermiques possibles.

I-4 Erreur causée par les charges de coupe

Les machines-outils sont soumises à des chargements qui déforment les composants de la machine et en conséquence engendrent des déviations de position relative entre l'outil et la pièce. Les charges de coupe sont une source d'erreurs causant une déviation de l'outil par rapport à la pièce affectant la géométrie désirée de la surface usinée. Elles provoquent des déformations élastiques de la pièce, de l'outil et de la machine. La géométrie de l'outil et le processus de coupe (enlèvement de matière et vitesse de coupe) provoquent un comportement vibratoire par l'excitation périodique de la structure (machine-outil-pièce). L'effort de coupe est à l'origine de deux types d'erreurs : l'erreur dynamique et l'erreur statique.

CHAPITRE II

INSTRUMENTS DE MESURE DES ERREURS

CHAPITRE II INSTRUMENTS DE MESURE DES ERREURS

Sur une machine-outil, le résultat de l'usinage qui tient compte notamment du respect des tolérances sur les pièces, de la qualité de surface, etc. dépend en grande partie de la précision dynamique et statique du mouvement de la machine. Pour la précision d'usinage, il est donc important de compenser les variations du déplacement. Une partie essentielle de la technique de compensation d'erreur est la capacité de mesurer les erreurs de la machine. La mesure directe, en utilisant un système de mesure approprié, peut toujours déterminer avec précision les erreurs d'une machine. Des normes et réglementations relatives au contrôle et aux tests de réception de machines-outils (DIN ISO 230-2, ISO/DIS 230-3 et ISO 230-4 ainsi que la directive VDI/DGQ 3441) imposent un certain nombre de méthodes de mesure destinées à déterminer les variations dynamiques et statiques du déplacement.

Il existe différentes méthodes de mesure suivant les exigences :

II-1 Laser

a) Laser interféromètre

L'interférométrie laser est une méthode bien établie pour mesurer les distances avec grande précision. Les systèmes de mesure de performance machine utilisent des interféromètres distants pour tous les modes de mesure (pas seulement linéaire), et une source laser stabilisée haute précision pour obtenir des qualités de mesure exceptionnelles.



Figure II-1 Laser interféromètre.

- **Historique de l'interférométrie**

La première démonstration d'application des principes d'interférence lumineuse aux mesures remonte aux années 1880. Bien que cette technologie ait évolué au fil des années, le principe élémentaire d'utilisation d'une longueur d'onde de lumière très petite, très stable et précisément définie.

- **Précision et performances dynamiques**

La précision de mesure linéaire est garantie à $\pm 0,5$ ppm grâce à une source laser stabilisée haute précision et à une compensation d'environnement très fiable. On peut prendre des mesures avec un échantillonnage maximum de 50 kHz, à une vitesse linéaire maximale de 4 m/s et à une résolution linéaire de 1 nm (même à la vitesse maximale). Du fait que les options de mesure (pas seulement linéaire) sont toutes basées sur des mesures interférométriques, la confiance dans la précision des données saisies s'en trouve renforcée.

b) Laser 5/6D



Figure II-2 Laser 5/6D™.

Le laser 5/6D, est capable de mesurer simultanément toutes les erreurs d'axe pour une évaluation d'erreur rapide sur machine-outil. La mesure peut passer à 3 ou 4 heures. Le système XD Laser assure une mesure rapide et exacte des capacités de positionnement de la machine pour permettre une évaluation complète avec 80% d'indisponibilité en moins.

La mesure simultanée donne une image vraie de toutes les erreurs d'axe, qui ne serait pas possible avec des systèmes à seul paramètre, la configuration unique pour chaque axe est le secret d'une indisponibilité fortement réduite. Le XD est le seul système de mesure laser à assurer la mesure de "roulis" autour d'un axe automatiquement en même temps que les mesures de linéarité, de rectitude X et Y, de tangage et de lacet. La mesure complète des 21 paramètres d'erreur de la zone de travail associée à notre ensemble de compensation d'erreur volumétrique permet aux utilisateurs de réduire de façon très importante le nombre de pièces défectueuses comme de prolonger la durée de vie utile de leurs centres d'usinage. Ultra-précis Le système laser de précision ultime, Le système XD Laser est totalement sans fil avec connexion Ethernet, Le système XD Laser est proposé en deux niveaux d'exactitude, standard et de précision. Ce système est le plus souvent utilisé dans la compensation et l'étalonnage des mesures numériques 3D. Le système à haute précision autorise toujours la collecte simultanée de jusqu'à six degrés de liberté d'un seul coup, mais utilise des technologies spécifiques pour assurer une meilleure stabilité du faisceau et précision. Les Caractéristiques du système de mesure XD Laser sont :

- Disponible en configurations 1, 3, 5 et 6 degrés de liberté.
- Fonctionnement totalement sans fil.
- Boîtier de commande intégré dans la tête laser pour une portabilité idéale.
- Connectivité Ethernet.
- Capacité d'envoi sans fil de données à un ordinateur distant.
- Station météo modulaire extensible jusqu'à 5 capteurs de température matériels.
- Capteur d'humidité disponible.
- Mesure tous les paramètres d'erreur à partir d'un réglage unique pour chaque axe.
- Mesure simultanément linéarité, rectitude, tangage, lacet et roulis.
- Données affichées en temps réel avec les autres données mesurées.
- Support pour fixation du laser et alignement rapide.
- Tête à la taille de la main avec plaque support.
- Station météo compensant les variations d'environnement en temps réel.
- Réglage unique de perpendicularité optique.
- Capacité d'évaluation de vitesse, accélération, parallélisme et planéité.
- Fonctionnement toujours conforme à la norme ASME B5.54.

II-2 Ballbar QC20-W

Avec l'intégration de la technologie sans fil Bluetooth (Figure II-3), l'électronique entièrement revue et des fonctionnalités de tests perfectionnées ont rendu le système Ballbar QC20-W encore plus facile à utiliser et plus puissant que son prédécesseur.



Figure II-3 Ballbar QC20-W sans fil Bluetooth.

En théorie, si vous programmez une machine à CN pour tracer une trajectoire circulaire et que ses performances de positionnement est parfaite, le cercle réel qu'elle dessinera correspondra exactement au cercle programmé. En pratique, de nombreux facteurs liés à la géométrie machine, au système d'asservissement et à l'usure peuvent entraîner une déviation du rayon et de la forme du cercle de test par rapport au cercle programmé. Une mesure précise du trajet circulaire réel et le comparer au trajet programmé permet d'avoir une évaluation de précision de la machine. C'est là le principe de tous les tests à Ballbar télescopique.

II-2-1 Séquence de test Ballbar QC20-W

Les tests Ballbar comportent trois étapes simples : configuration, saisie des données, analyse.

1) Configuration

- Grâce à sa connectivité *Bluetooth*, la connexion du QC20-W est simple.
- Le pivot central est positionné sur la table de la machine et (avec une bille de réglage fournie dans le kit QC20-W), la broche est déplacée à un point de référence et aux coordonnées d'origine du test.

- La broche est alors déplacée à la position de départ du test et le QC20-W est installé entre deux accouplements cinématiques magnétiques.

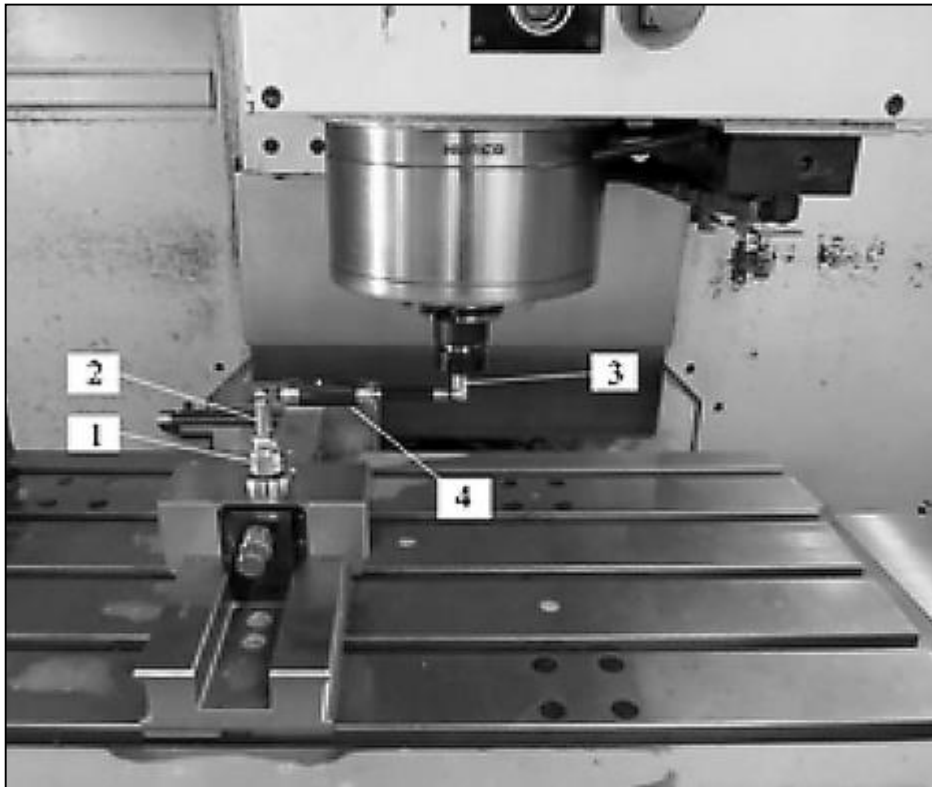


Figure II-4 Appareil de mesure Ballbar QC20 : 1 - support central magnétique, 2 - centre magnétique tasse attaché à crémaillère, 3 - Centre magnétique coupe serrée dans virole, 4 - Dispositif de mesure.

2) Saisie de données :

Test sur 360°

- Le test ordonne à la machine-outil d'effectuer deux cercles consécutifs ; l'un dans le sens horaire, l'autre dans le sens antihoraire.
- En pratique, un arc supplémentaire est ajouté avant et après le cercle du test pour permettre à la machine d'accélérer puis de ralentir.
- Au moyen d'allonges, le rayon de test peut être sélectionné pour refléter la taille de la machine et la sensibilité à certains problèmes. Par exemple, les cercles à grands rayons sont meilleurs pour mettre en exergue les erreurs de géométrie machine. En revanche, les petits cercles sont plus sensibles aux différences ou retards d'asservissement.

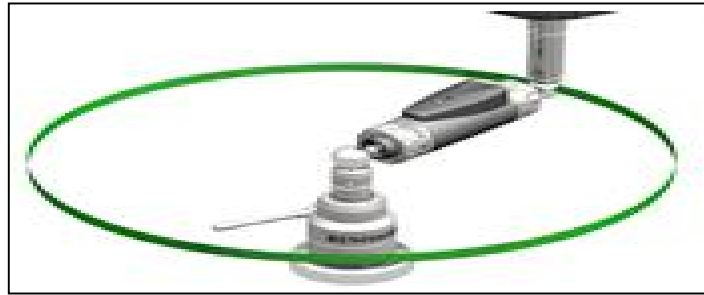


Figure II-5 Tests sur arc 360°.

La saisie de données étant affichée en direct à l'écran, tout problème ou erreur peut être détecté à mesure que le test avance. Le test peut donc être interrompu sans perdre de temps supplémentaire, ce qui peut être important si vous effectuez un test sur un grand rayon avec une vitesse d'avance très lente.

Tests sur "arc partiel" de 220°

Avant l'apparition du QC20-W, les tests sur plans perpendiculaires au plan standard X-Y exigeaient des montages de test spéciaux ainsi qu'un repositionnement du support central. Des tests sur 3 plans orthogonaux sont désormais possibles sans avoir à déplacer le pivot central. Le secret est que le système QC20-W peut réaliser un arc restreint (220°) sur deux des plans. Ceci produit une analyse de test modifiée pour cet arc mais produit néanmoins une valeur globale de circularité pour ce test. Avec les trois tests effectués autour d'un seul point, il permet d'utiliser le rapport de diagnostics volumétriques qui fournit davantage d'informations, et plus rapidement.

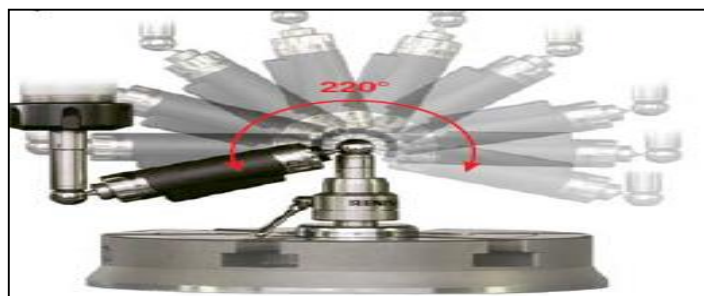


Figure II-6 Tests sur arc partiel de 220°.

3) Analyse des données

- Dispose de plusieurs formats de rapports (conformes à des normes internationales telles que ISO et ASME).
- De nombreux rapports peuvent être personnalisés, et le résultat final utilisé pour des rapports rédigés au moyen de la fonction intégrée.



Figure II-7 Analyse volumétrique dans Logiciel Ballbar.

II-2-2 Spécifications système QC20-W

Résolution du capteur	0,1 µm
Précision de mesure du Ballbar*	± (0,7 + 0,3% L) µm
Plage de mesure du capteur	± 1,0 mm
Course du capteur	-1.25 mm à +1.75 mm
Fréquence d'échantillonnage maximale	1000 Hz
Portée de transmission de données (Bluetooth Classe 2)	10 pieds val. type
Plage de fonctionnement	0 °C à 40 °C
Dimensions de la mallette système (Lo x La x Ha)	395 mm x 300 mm x 105 mm
Poids de la mallette système (contenu du kit compris)	3,75 kg (environ)

Figure II-8 Tableau de Spécifications système QC20-W.

Aussi appelée 'variation de mesure radiale' Valide de 15 °C à 25 °C.

L = Longueur sur laquelle l'erreur est mesurée.

C.à.d. Spécification pour mesure d'erreur 10 μm sur machine : $\pm 0,73 \mu\text{m}$.

Spécification pour mesure d'erreur 100 μm sur machine : $\pm 1,00 \mu\text{m}$.

II-3 Systèmes de mesure en 2D KGM 181, KGM 182/ 282

Les systèmes de mesure en 2D KGM sont conçus pour tester en dynamique le comportement de contournage des machines-outils équipées de CN. Ils exécutent notamment des tests de forme circulaire de rayons compris entre 115 mm et 1 μm et ce, avec des avances de contournage jusqu'à 80 m/minute. Le KGM peut également réaliser des tests de forme libre sur deux axes. L'un des avantages du KGM réside dans une mesure sans contact - les effets des roulements à billes du DBB sont absents. De plus, les erreurs de géométrie de la machine n'influent pas sur le résultat de la mesure effectuée sur des tests de forme circulaire de très petits rayons.



Figure II-9 Systèmes de mesure en 2D KGM.

II-3-1 Support de la mesure et traitement du signal

Le KGM comporte une plaque de mesure avec réseau croisé encastré dans une plaque de montage. Lors de la mesure, la tête captrice est déplacée sans contact au-dessus du réseau croisé de la plaque de mesure. Pour réaliser la mesure, la plaque de montage est bridée côté pièce (par ex. sur la table de la machine s'il s'agit d'un centre d'usinage), puis ajustée. La tête captrice est installée côté outil sur la machine (par ex. dans la broche s'il s'agit d'un centre d'usinage) et, là encore, ajustée approximativement. Avec une cale de réglage, on mesure tout

d'abord la distance fonctionnelle de balayage ($0,5 \pm 0,05$ mm). Puis on parachève le réglage du KGM en tournant les vis situées sur la tête caprice jusqu'à l'optimisation des signaux de mesure affichés à l'aide du logiciel d'exploitation ACCOM.

Pour chacune des 2 directions d'axes perpendiculaires, le KGM délivre simultanément 2 signaux sinusoïdaux déphasés de 90° (période du signal de $4 \mu\text{m}$). Le traitement des signaux de mesure est effectué dans le PC. Les deux appareils peuvent subdiviser les signaux de mesure de forme sinusoïdale jusqu'à 4096 fois ; un pas de mesure d'environ 1nm est ainsi possible pour chaque axe. L'exploitation des valeurs de mesure selon la norme DIN ISO 230-4 est gérée par le logiciel ACCOM. La programmation de tests de formes circulaires et de formes libres est très simple pour le KGM. Le logiciel d'exploitation ACCOM demande tous les paramètres requis pour la mesure et crée le programme CN nécessaire. Celui-ci peut être transmis immédiatement dans la commande CNC via les interfaces (série ou Ethernet TCP/IP).

II-3-2 Spécification technique

	KGM 181	KGM 182	KGM 282	
Measuring standard	Two-coordinate TITANID phase grating			
Coefficient of linear expansion	$\alpha_{\text{therm}} \approx 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$			
Accuracy grade	$\pm 2 \mu\text{m}$		$\pm 1 \mu\text{m}$	
Measuring range	$\varnothing 140 \text{ mm}$	$\varnothing 230 \text{ mm}$		
Incremental signals	1 VPP			
Signal period	4 μm in measuring directions I and II			
Measuring step	$\geq 0.001 \mu\text{m}$ (with EIB 74x)			
Voltage supply	5 V ± 0.25 V/ ≤ 100 mA (per axis)			
Mount for scanning head	$\varnothing 20\text{h}7$			
Traversing speed	$\leq 80 \text{ m/min}$		$\leq 72 \text{ m/min}$	
Weight (approx.)	Grid plate	4.0 kg	3.1 kg	4.9 kg
	Scanning head	0.6 kg	0.6 kg	0.6 kg

Figure II-10 Tableau de Spécification technique de KGM.

II-4 Capteur de proximité CAPABILLE [15]

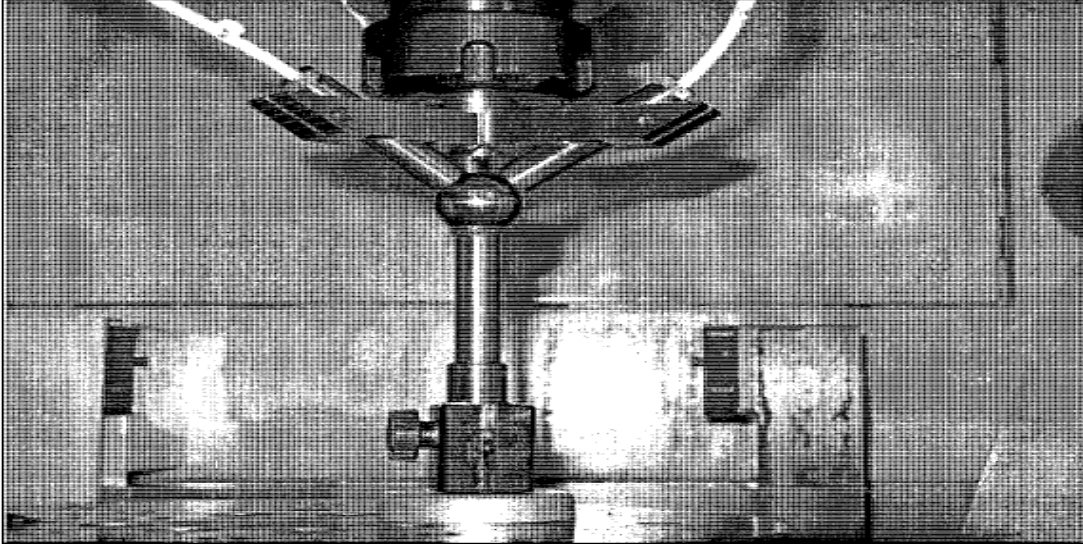


Figure II-11 Capteurs et bille en position engagée.

Les capteurs de proximités ont été utilisés pour mesurer la performance d'une machine dans une trajectoire linéaire en suivant une régie de référence avec 5 capteurs [16].

Comme les figures II-12 et II-13 les montres, le système CapaBille utilise trois capteurs capacitifs montés dans la broche, mesurant directement les déviations volumétriques par rapport à une bille montée sur la table. 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.

Le système CapaBille est constitué de trois éléments principaux (Figure II-12) :

1. les parties mécaniques (le porte capteur, le positionneur et une bille qui sert de cible de mesure) ;
2. les capteurs capacitifs ;
3. le système d'acquisition qui est composé d'un système d'acquisition permettant la conversion d'une grandeur capacitive en une grandeur voltaïque (conditionneur) et la carte d'acquisition installée sur un ordinateur portable.

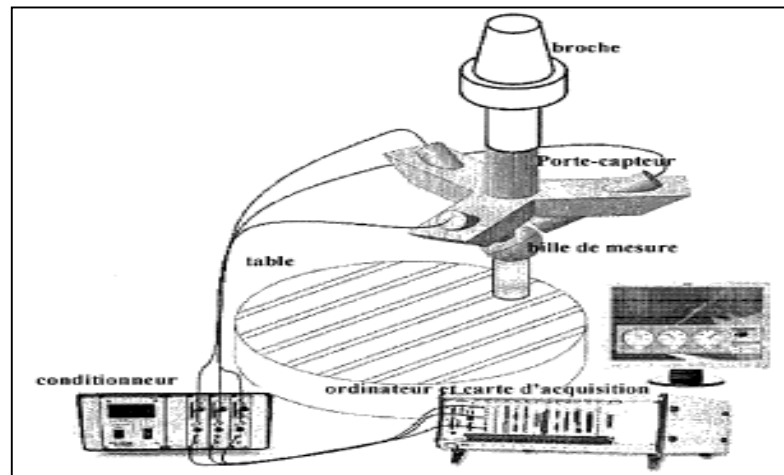


Figure II-12 système de CapaBille.

II-4-1 Parties mécaniques

II-4-1-1 Porte-captur

Le porte-captur est conçu pour permettre d'y intégrer les 3 capteurs capacitifs mutuellement orthogonaux. Il se monte avec les trois capteurs dans le porte-outil et puis dans la broche de la machine-outil pour prendre la mesure.

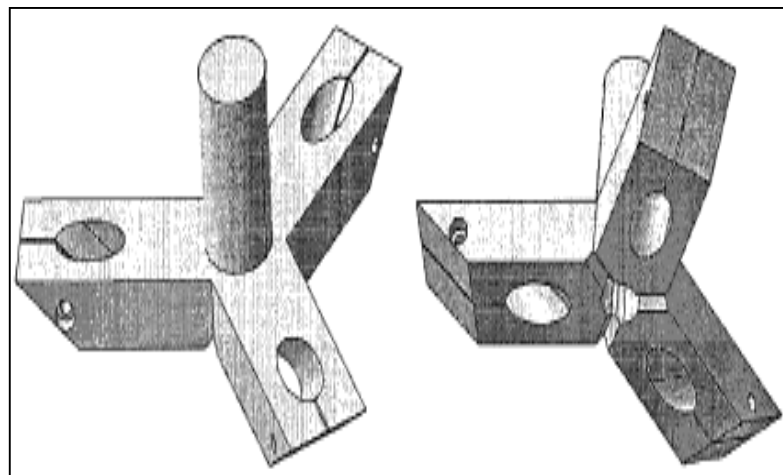


Figure II-13 porte-captur.

II-4-1-2 Positionneur

Pour pouvoir positionner la bille cible sur la table d'une façon centrée par rapport aux trois capteurs, un positionneur est conçu (Figure II-14). Le montage et le démontage du positionneur dans le porte-captur doivent se faire facilement.

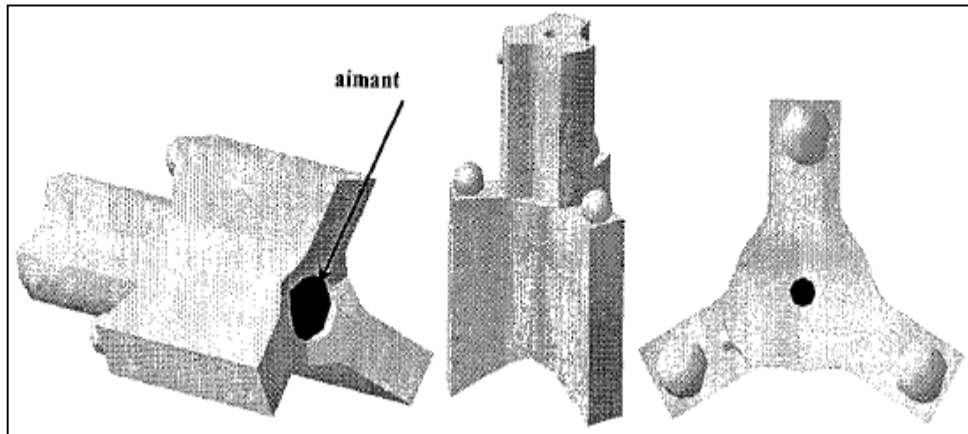


Figure II-14 positionneur.

Pour que le montage du positionneur dans le porte-captur ne soit ni sous-contraint ni sur-contraint, un contact isostatique avec trois petites sphères dans trois rainures est considéré (Figure II-15).

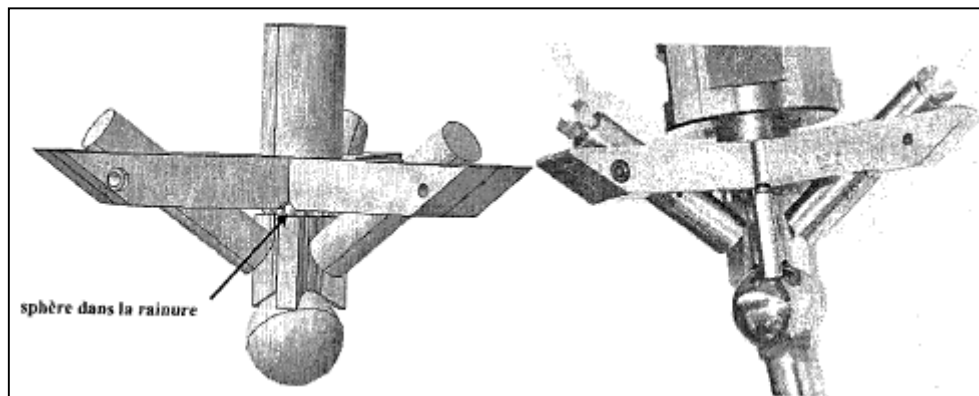


Figure II-15 Assemblage du positionneur dans le porte-outil pour positionner la bille.

II-4-1-3 Bille

La bille est collée sur une tige qui est tenue par un support central. Elle permet une certaine liberté à la bille pour bien se tirer vers le positionneur. La tige est conçue plus longue pour dégager assez d'espace afin de pouvoir serrer le support quand la bille est bien positionnée.



Figure II-16 Bille et support central.

II-4-2 Capteurs capacitifs

Les capteurs ont deux niveaux de sensibilité :

- sensibilité de base, la résolution est de 50 nm (nanomètre) et la plage de mesure de 250-1500 μm .
- haute sensibilité, la résolution est de 20 nm (nanomètre) et la plage de mesure de 250-750 μm .

Chaque capteur est connecté avec un fil de 1.8 mètre à un amplificateur (conditionneur).

II-4-3 Système d'acquisition

Les capteurs capacitifs sont connectés à un conditionneur qui convertit et amplifie les signaux provenant des capteurs. Les signaux à la sortie ont une plage de $\pm 10\text{V}$. Il est composé des cartes ou chaque carte est associée à un capteur. (Figure II-17) et est composé des cartes ou chaque carte est associée à un capteur.

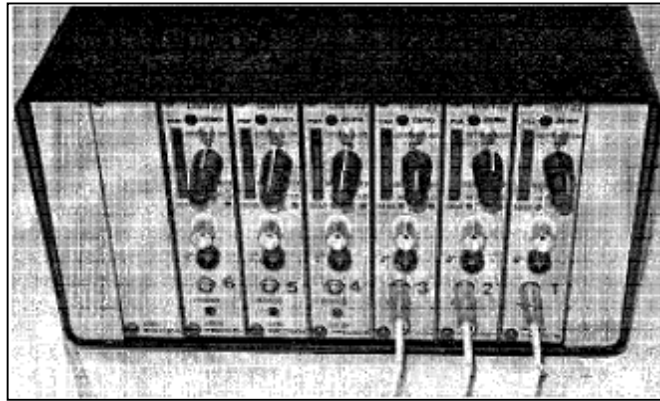


Figure II-17 Conditionneur de LionPrecision® avec 6 cartes.

Les sorties des cartes se connectent à une carte d'acquisition de données de National Instrument, sur un ordinateur portable avec une carte d'acquisition PCMCIA (Figure II-18).

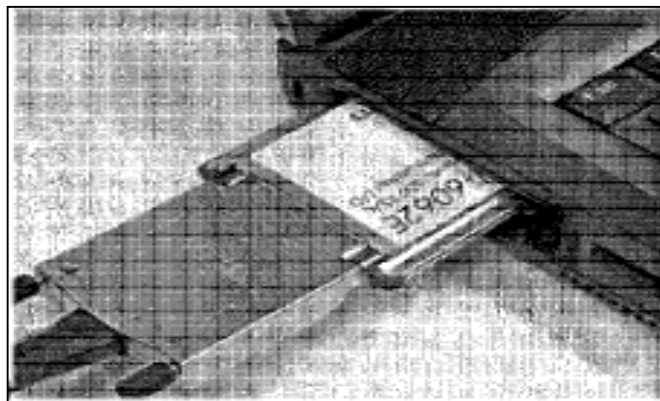


Figure II-18 Sortes d'acquisition sur ordinateur portable.

II-4-4 Logiciel

Un programme Lab. VIEW est utilisé avec la CapaBille (Figure II-19). Le programme se répète en boucle à chaque 0.1 seconde. Ce temps est nécessaire d'abord pour permettre au programme d'afficher les mesures et toute autre opération, déterminer la topologie de la machine-outil et aussi générer les codes G de la machine en fonction de la position de la pièce et de la Trajectoire désirée.

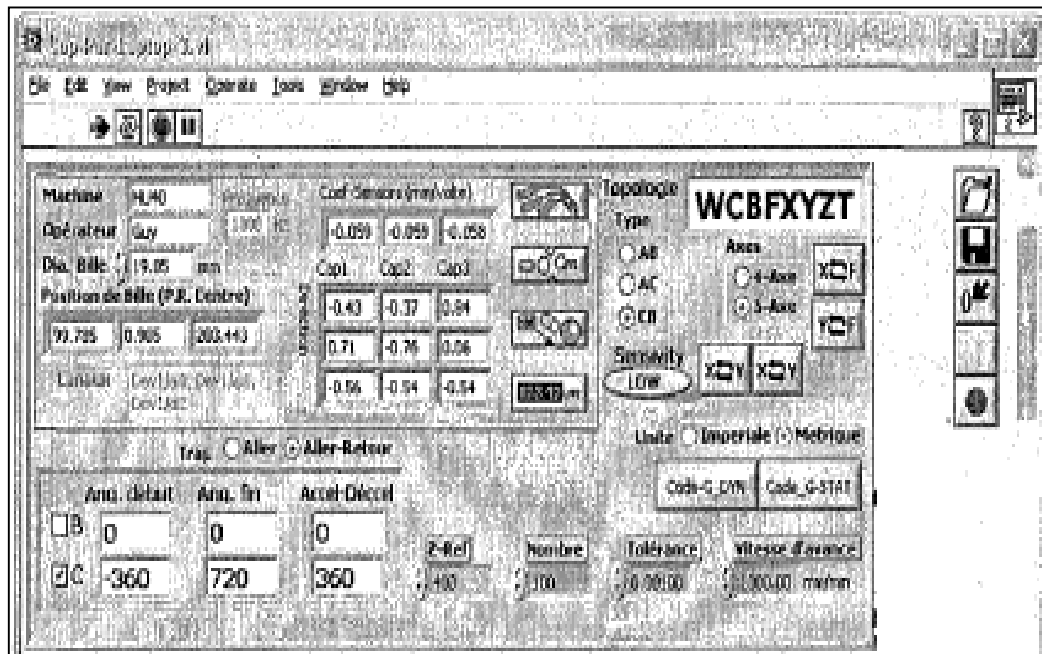


Figure II-19 Interface de programme Lab. VIEW développé pour CapaBille.

CHAPITRE III

DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE LASER

CHAPITRE III DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE LASER

Le système de mesure laser XL assure une calibration complète de machines-outils et d'autres systèmes sensibles à la précision des positions. En pouvant mesurer une large gamme de caractéristiques géométriques et dynamiques sur les machines, il trouve de nombreuses applications dans divers domaines des sciences et de la recherche technique. Le système est doté d'une architecture modulaire qui permet de sélectionner des composants parmi la gamme des produits en fonction des exigences de mesure spécifiques.

C'est un Systèmes de calibration laser depuis 1988. Non content d'être le système laser de calibration le plus répandu, son ML10 s'est imposé comme norme en matière de précision et de fiabilité. Le nouveau système XL se caractérise par une portabilité nettement supérieure. Ses fonctionnalités de mesure dynamique et sa facilité d'emploi pour les opérateurs sont en outre fortement améliorées.

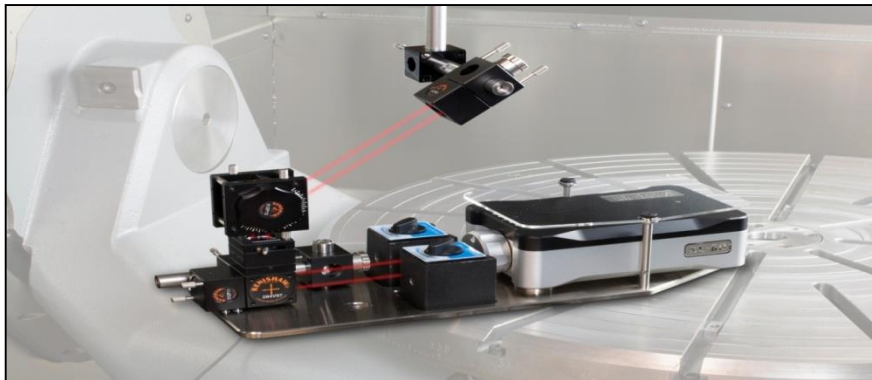


Figure III-1 système de l'interféromètre laser.

III-1 Principes d'interférométrie

III-1-1 L'interféromètre de Michelson

L'utilisation des principes de l'interférence lumineuse comme outil de mesure remonte aux années 1880 lorsqu'Albert Michelson développa l'interférométrie. L'interféromètre de Michelson est constitué d'une source lumineuse d'une simple longueur d'onde (monochromatique), d'un miroir semi-argenté et de deux miroirs, conformément à la (Figure III-2) ci-dessous :

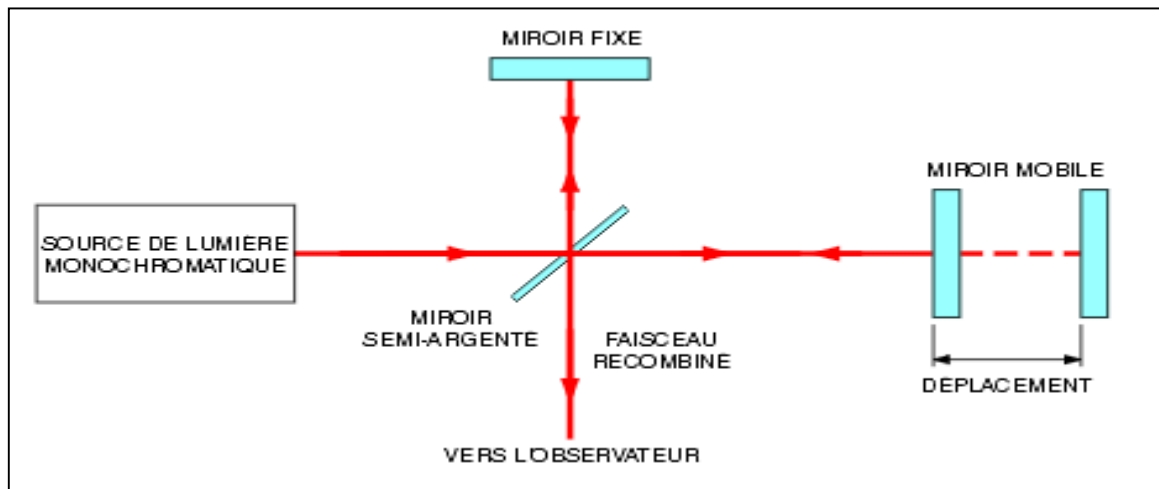


Figure III-2 Interféromètre de Michelson de base.

La source lumineuse est divisée au niveau de la surface du miroir semi-argenté, la moitié de la lumière étant réfléchiée à 90° vers un miroir à distance fixe, l'autre moitié étant autorisée à passer vers un miroir mobile. Les miroirs sont alignés de sorte que les faisceaux recombinés réfléchis des miroirs sont parallèles et qu'ils sont réfléchis en retour vers un observateur. Si chacun des miroirs est exactement à la même distance miroir semi-argenté, alors la lumière arrive à l'observateur et une interférence constructive (Figure III-3) se produit, entraînant une lumière vive. Si le miroir mobile est positionné plus loin, de sorte que sa position est déviée d'un quart de longueur d'onde, alors le faisceau est renvoyé à l'observateur déphasé de 180° et une interférence destructive (Figure III-4) se produit, entraînant l'obscurité. La distance parcourue par le miroir mobile peut donc être mesurée par l'observateur en comptant les éclairs lumineux à mesure que le miroir se déplace.

a) Interférence constructive

Les crêtes d'onde coïncident lorsque les deux formes d'onde lumineuses de la même longueur d'onde sont en phase (voir la figure III-3 ci-dessous), et on obtient ce qu'on appelle alors une 'interférence constructive'. Dans l'interférence constructive, l'amplitude de l'onde de sortie est égale à la somme des amplitudes des deux ondes d'entrée.

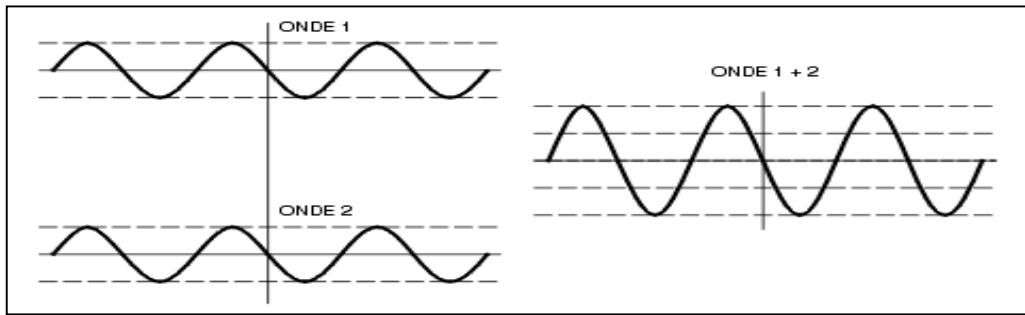


Figure III-3 Interférence constructive.

b) Interférence destructive

La crête d'une entrée coïncide avec un minimum de l'autre lorsque les deux formes d'onde lumineuse cohérentes sont déphasées de 180° (voir la Figure III-4), et on obtient ce qu'on appelle alors une 'interférence destructive'. Dans l'interférence destructive, les deux ondes d'entrée s'annulent entre elles, entraînant l'obscurité.

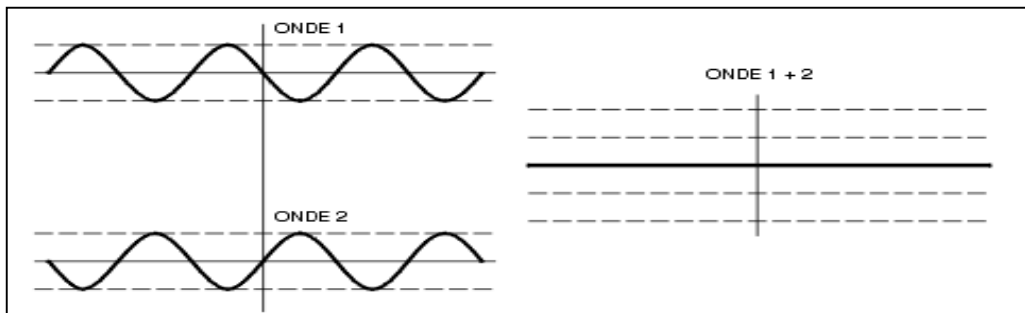


Figure III-4 Interférence destructive.

III-2 Composants de base

III-2-1 Laser XL-80



Figure III-5 Laser XL-80.

CHAPITRE III DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE LASER

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 °C à 40 °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. Comme l'interférométrie est à la base de toutes les options de mesure (pas seulement linéaire) du système XL, vous pouvez vous fier à la précision de toutes vos mesures. 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 voir la (figure III-5) 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.








État des diodes	État d'intensité du faisceau
	Faisceau interrompu - mesures impossibles, vérifier l'alignement laser
	Faisceau faible - précision réduite des mesures, danger d'interruption du faisceau
    	Intensité du faisceau OK. Une seule diode verte allumée indique un niveau minimum d'intensité de faisceau, cinq diodes allumées indiquent l'intensité maximale

Figure III-6 Tableau des diodes d'état du laser.

III-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 III-7 Compensateur XC-80 et ses capteurs.

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.

Les capteurs de température d'air et de matériau sont aussi « intelligents ». 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.

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.

III-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 III-8 Trépied.

Un mécanisme à blocage/déblocage 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).

III-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 (Figure III-9 à Figure III-12). 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.



Figure III-9 Mallette pour système complet (plateau retiré).

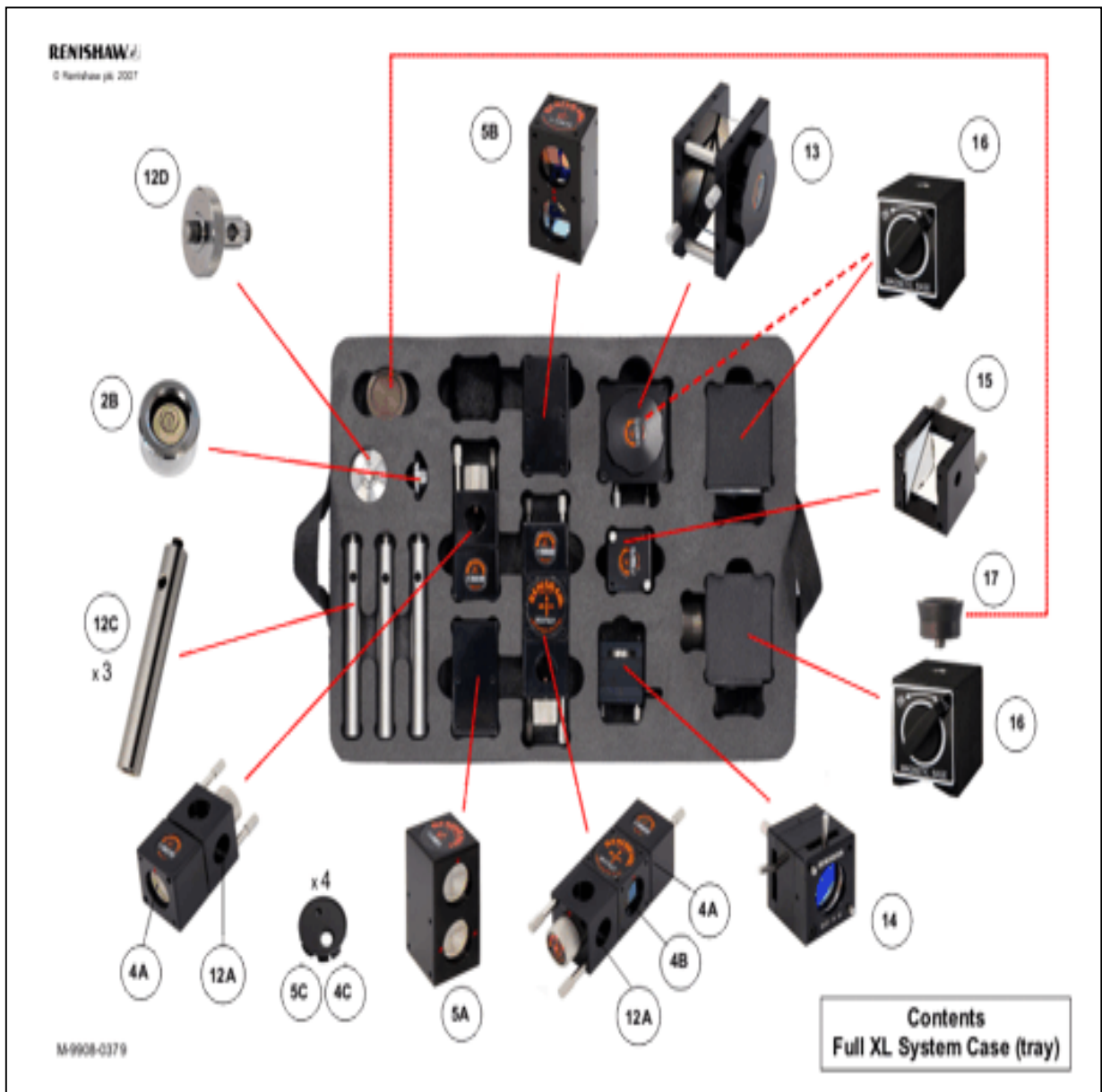


Figure III-10 Mallette système complet (plateau).

CHAPITRE III DESCRIPTION DE L'INTERFEROMETRE LASER

Index	Part number	Part name	Includes	Part number (qty 1)	Index
1	A-9908-0405	XL-80 laser kit	XL-80 laser		1A
			Universal power supply	A-9908-0299	1B
			USB cable	A-9908-0286	1C
			XL system support disk	A-9908-0303	not shown
			AUX I/O connector	A-9908-0329	not shown
2	A-9908-0700	Tripod stage kit	XL tripod stage		2A
			Spirit level circular	A-9908-0323	2B
			XL tripod stage adapter	A-9908-0770	not shown, fitted to tripod
3	A-9908-0510	XC-80 Compensator kit	XC-80 compensator		3A
			Material temperature sensor & cable	A-9908-0879	3B
			Air temperature sensor & cable	A-9908-0878	3C
			XC mounting plate	A-9908-0892	3D
			USB cable	A-9908-0286	3E
4	A-8003-0440	Linear measurement optics	Linear reflector (qty 2)	A-8003-0219	4A
			Linear interferometer	A-8003-0557	4B
			Alignment target (qty 2)	A-8003-0478	4C
5	A-8003-0441	Angular measurement optics	Angular interferometer	A-8003-0186	5A
			Angular reflector	A-8003-0181	5B
			Alignment target (qty 2)	A-8003-0478	5C
6	A-8003-0443	Straightness optics - short range (0-4m)	Short range straightness reflector	A-8003-0615	6A
			Wollaston short range	A-8003-0393	6B
7	A-8003-0444	Straightness optics long range (1-30m)	Long range straightness reflector	A-8003-0620	7A
			Wollaston long range	A-8003-0430	7B
8	A-8003-4259	Straightness accessory kit	Universal (straightness) shutter	A-8003-4209	8A
			Vertical turning mirror	A-8003-0560	8B
			Large straightness retro-reflector	A-8003-0604	8C
			Straightness base		8D
9	A-8003-0665	Squareness measurement optics	Optical square		9A
			Bracket squareness optic	M-8003-1680	9B
			Cap head screw (qty 4)		9C
			Hexagonal key		9E
10	A-8003-0442	Flatness measurement kit	Flatness mirror (qty 2)	A-8003-0630	10A
			Base (150 mm)	A-8003-0256	10B
			Base (100 mm)	A-8003-0257	10C
			Base (50 mm)	A-8003-0258	10D
11	A-8003-4270	Long range linear accessory kit	Long range retroreflector	A-8003-2061	11A
			Periscope	A-8003-2039	11B
			Long range target	M-8003-2081	11C
			Clamp screw (qty 2)	M-8003-0221	11D
12	A-8003-0447	Optics mounting kit	Clamp block (qty 2)	A-8003-0262	12A
			Base plate (qty 2)	A-8003-0522	12B
			Mounting pillar (qty 3)	M-8003-0470	12C
			M8 adaptor	A-8003-0979	12D
13	A-8003-1304	Swivel mirror			13
14	A-8003-3072	Laser beam steerer LS350			14
15	A-8003-1325	Fixed turning mirror			15
16	A-9908-0780	Magnetic base			16
17	A-9908-0760	XL mag-base adapter			17

Figure III-11 Tableau de contenu de la mallette pour système complet.



Figure III-12 Mallette système à poignées intégrées avec Mallette pour trépied.

III-3 Les optiques des mesures laser avec Kit de montage

III-3-1 Kit de montage optique

Le kit de montage optique permet d'adapter les composants optiques de mesure à une machine de mesure des coordonnées (CMM) ou à une machine-outil. Le système a été conçu de façon à pouvoir inter changer les différents éléments de l'optique de mesure sans recourir à un réalignement du laser.



Figure III-13 Kit de montage optique.

Le kit comprend les éléments suivants :

- 3 colonnes de montage (les colonnes sont munies de tiges filetées M8 qui se vissent dans les plaques de montage, les bases magnétiques standard)
- adaptateur M8 (pour la fixation aux bases magnétiques standard ou aux têtes de sondes de la machine de mesure des coordonnées)
- 2 plaques de montage

- 2 blocs de serrage et des vis de serrage (pour fixer les composants optiques aux colonnes de montage)

Le kit de montage optique ne comprend pas d'éléments de serrage pour fixer l'optique montée à la machine à tester ; la méthode préférée pour cette opération varie en effet selon la machine. Une disposition universelle utile consiste à fixer les plaques de montage en acier et/ou les colonnes de montage directement sur la machine en utilisant des blocs de serrage aimantés.

III-3-2 Optique de mesure linéaire



Figure III-14 Optique de mesure linéaire.

L'optique de mesure linéaire sert à mesurer la précision du positionnement linéaire. Le kit optique de mesure linéaire affiché dans la figure 1 comprend les éléments suivants :

- un diviseur de faisceau
- deux réflecteurs linéaires
- deux cibles pour faciliter l'alignement optique

Remarque : En combinant un diviseur de faisceau et un réflecteur linéaire, on obtient un interféromètre linéaire.

Pour effectuer des mesures linéaires, il est souvent utile de posséder un kit de montage optique et des brides appropriées pour fixer l'optique à la machine à calibrer.

III-3-3 Optiques de mesure angulaire

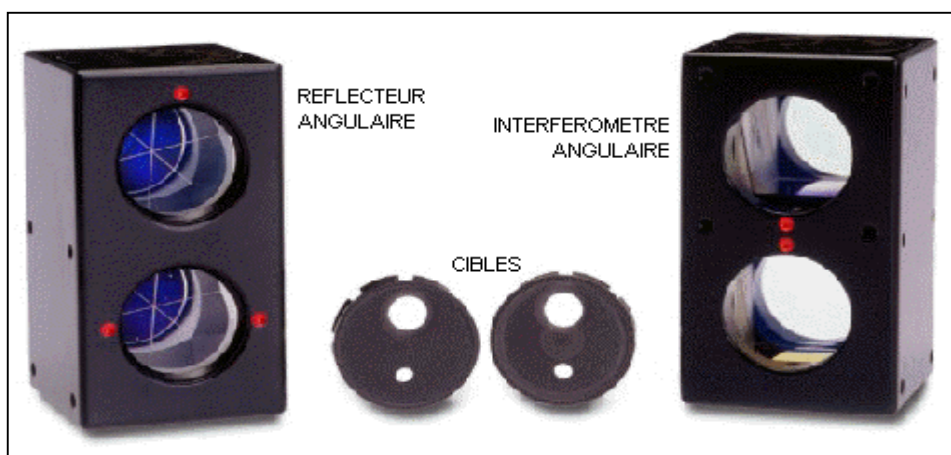


Figure III-15 Optiques de mesure angulaire.

Les optiques de mesure angulaire sont utilisées pour mesurer les déplacements angulaires, en particulier le tangage angulaire et le lacet angulaire le long de l'axe d'une machine-outil ou CMM. Le kit comporte :

- un interféromètre angulaire (diviseur de faisceau angulaire)
- un réflecteur angulaire
- deux cibles

Comme avec les déflecteurs du kit de mesure linéaire, les éléments optiques inclus dans le réflecteur angulaire sont des rétro-réflecteur qui facilitent l'alignement des optiques. Quand il faut mesurer les écarts angulaires le long de l'axe d'une machine, le kit de montage standard des optiques peut être utilisé pour adapter les optiques angulaires sur la machine.

III-3-4 Optique de mesure de rectitude



Figure III-16 Optique de mesure de rectitude.

L'optique de mesure de rectitude permet de mesurer les erreurs de rectitude suivant un axe linéaire. Les erreurs de rectitude sont des déplacements perpendiculaires à l'axe de course. Un kit comprend les éléments présentés dans la figure III-16 ci-dessus :

- interféromètre de rectitude
- réflecteur de rectitude

Le kit de mesure de rectitude est disponible en deux versions : à courte portée pour les mesures de 0,1 m jusqu'à 4 m et à longue portée pour les mesures entre 1 m et 30 m.

Remarque : À courte portée, ces distances renvoient à la séparation entre l'interféromètre de rectitude et le réflecteur de rectitude, c.-à-d. à la longueur de l'axe qui peut être testé. À longue portée, ces distances renvoient à la séparation entre la tête laser et le réflecteur de rectitude. Dans les deux cas, la plage de mesure de rectitude est de $\pm 2,5$ mm

L'interféromètre de rectitude et le réflecteur sont appariés. Vous ne pouvez donc pas inter changer les éléments avec ceux d'autres kits de rectitude. Chaque ensemble interféromètre de rectitude et réflecteur est identifié par un numéro de série unique. Le kit de montage optique standard peut être utilisé pour fixer l'optique à la machine. Pour la mesure de rectitude verticale dans un axe horizontal, ou de rectitude dans un axe vertical d'une machine, le kit accessoire de rectitude est également nécessaire.

III-3-4-1 Interféromètre de rectitude

L'interféromètre de rectitude est un prisme qui divise le faisceau laser en deux faisceaux divergents. Le faisceau en sortie et le faisceau de retour du réflecteur de rectitude traversent une ouverture de l'interféromètre de rectitude. Il y a aussi une cible circulaire blanche et une ouverture de petit diamètre pour assurer un alignement précis du faisceau. L'orientation de l'interféromètre de rectitude pour les mesures de déviation verticale et horizontale est représentée dans les figures ci-dessous (Figure III-14 et Figure III-15). L'orientation de l'interféromètre peut être modifiée en tournant la face de l'interféromètre.



Figure III-17 Orientation pour mesurer la déviation de rectitude horizontale.



Figure III-18 Orientation pour mesurer la déviation de rectitude verticale.

Le faisceau laser est renvoyé à travers l'ouverture inférieure de la tête laser pour les mesures de déviation horizontale et à travers l'ouverture gauche de la tête laser pour les mesures de déviation verticale.

III-3-4-2 Réflecteur de rectitude

Le réflecteur de rectitude renvoie les deux faisceaux divergents vers l'interféromètre de rectitude. Le réflecteur de rectitude représenté en figure ci-dessous est symétrique par rapport à son centre. Il doit être aligné perpendiculairement à l'axe de mesure, les deux faisceaux d'entrée divergents étant équidistants du centre et à environ 6 mm 'au-dessus' de la ligne

centrale indiquée. Le boîtier du réflecteur présente des repères de centrage pour faciliter l'alignement symétrique du faisceau.

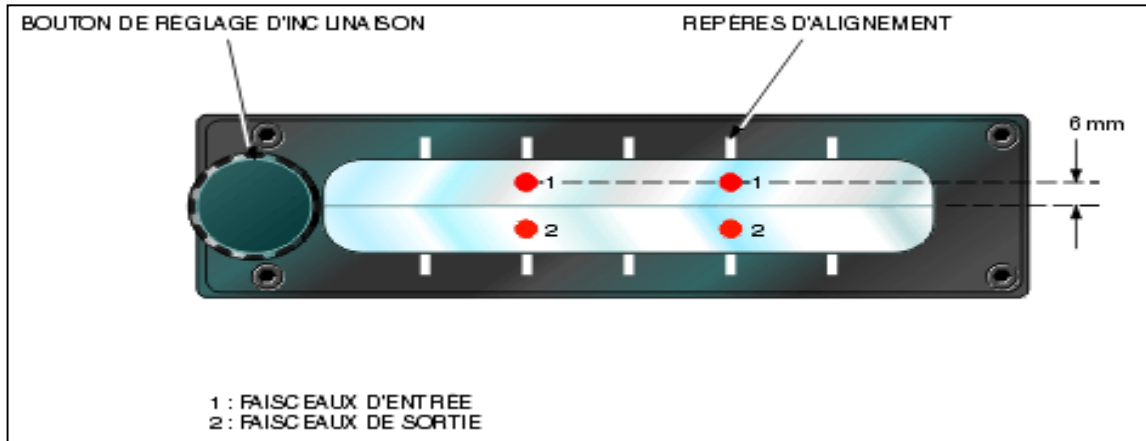


Figure III-19 Réflecteur de rectitude représentée dans l'orientation pour la mesure de la déviation horizontale.

L'ensemble optique dans le réflecteur de rectitude peut être incliné sur son axe 'longitudinal' en ajustant le bouton de réglage.

III-4 Accessoire des optiques des mesures

III-4-1 Miroir pivotant

Ce miroir peut s'utiliser comme accessoire d'alignement pour les mesures de diagonale (figure III-20). Il est également pratique pour mesurer les tours à banc incliné voir la figure III-18. Grâce aux vis fournies, le miroir se fixe très simplement aux optiques de mesure.



Figure III-20 Miroir pivotant

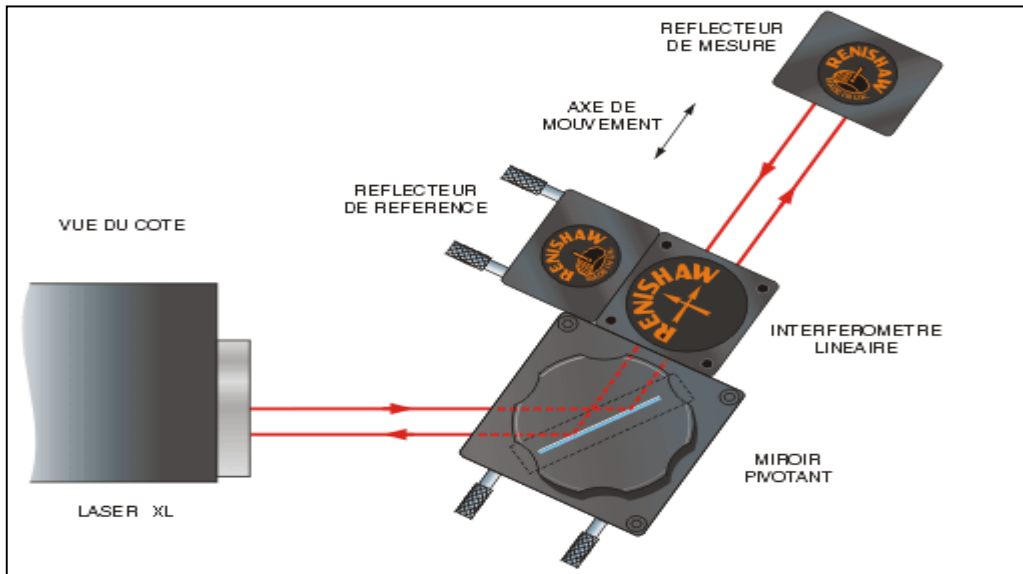


Figure III-21 Miroir pivotant utilisé avec des axes inclinés à un angle supérieur à 45° par rapport à l'horizontale.

III-4-2 Miroir de renvoi fixe

Ce miroir réfléchit le faisceau laser à 90° (figure III-19 et figure III-20). Comme pour le miroir pivotant, il se fixe aux optiques de mesure pour faciliter l'installation optique et sert surtout lorsque l'accès à l'axe de mesure requis est restreint.



Figure III-22 Miroir de renvoi fixe.

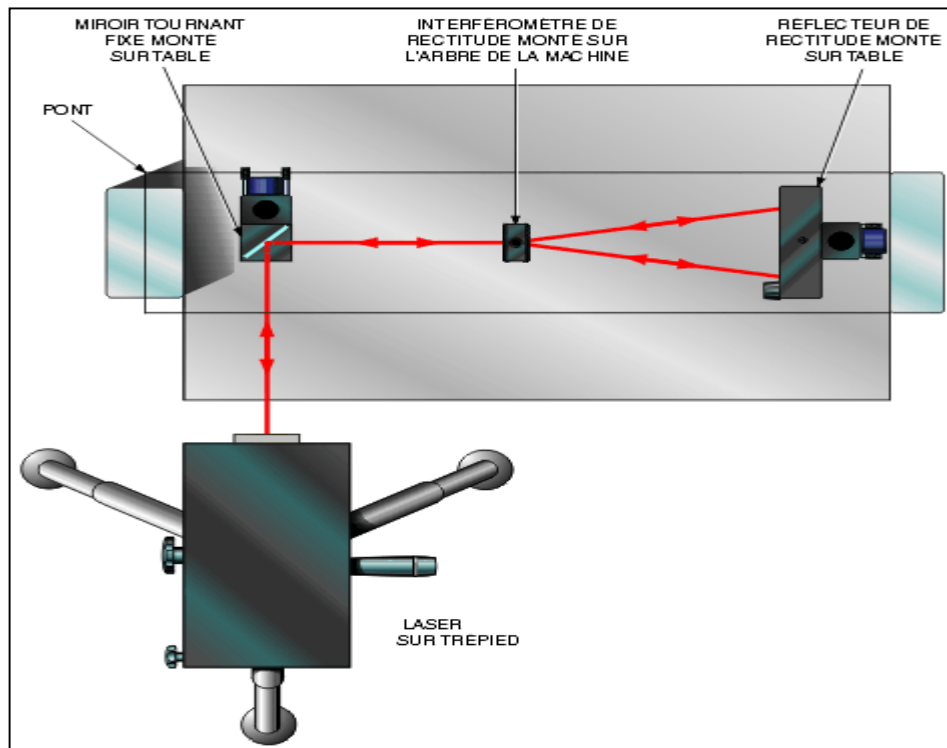


Figure III-23 Miroir tournant fixe – application typique.

III-5 Dimensions et poids

III-5-1 XL-80 laser



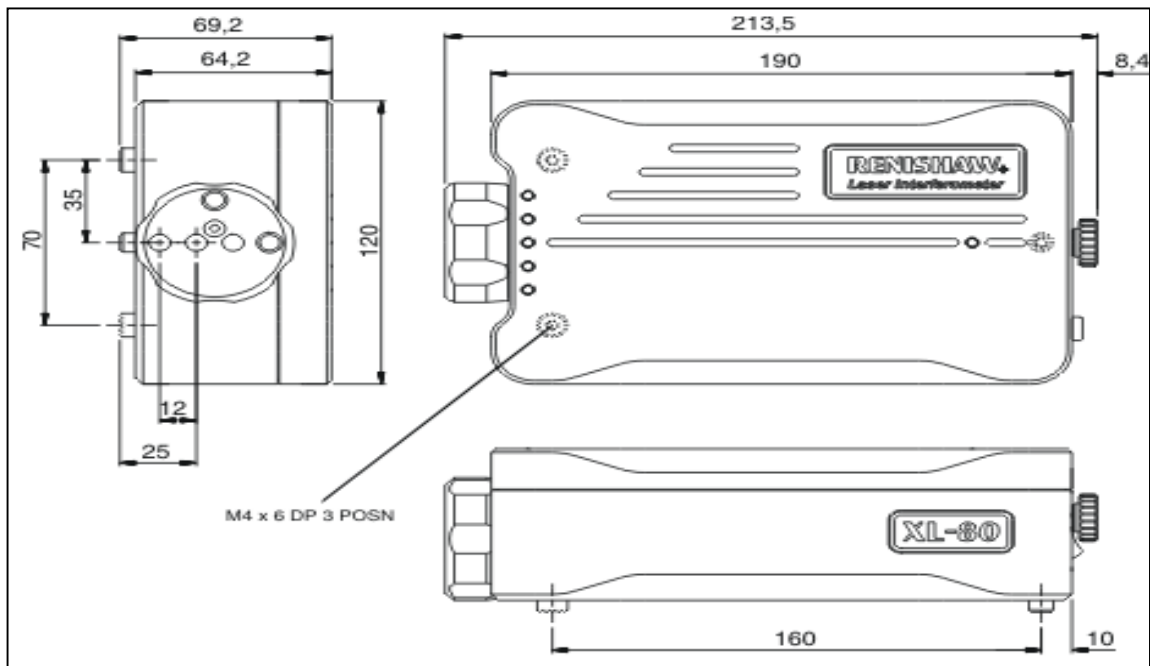


Figure III-24 Laser XL (dimensions en mm).

III-5-2 Unité de compensation d'environnement XC

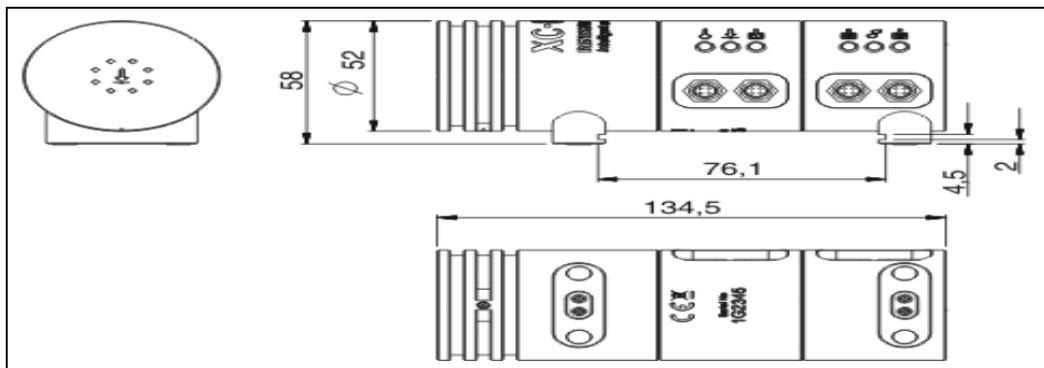


Figure III-25 Unité de compensation d'environnement XC (dimensions en mm).

III-5-3 Kit de montage optique

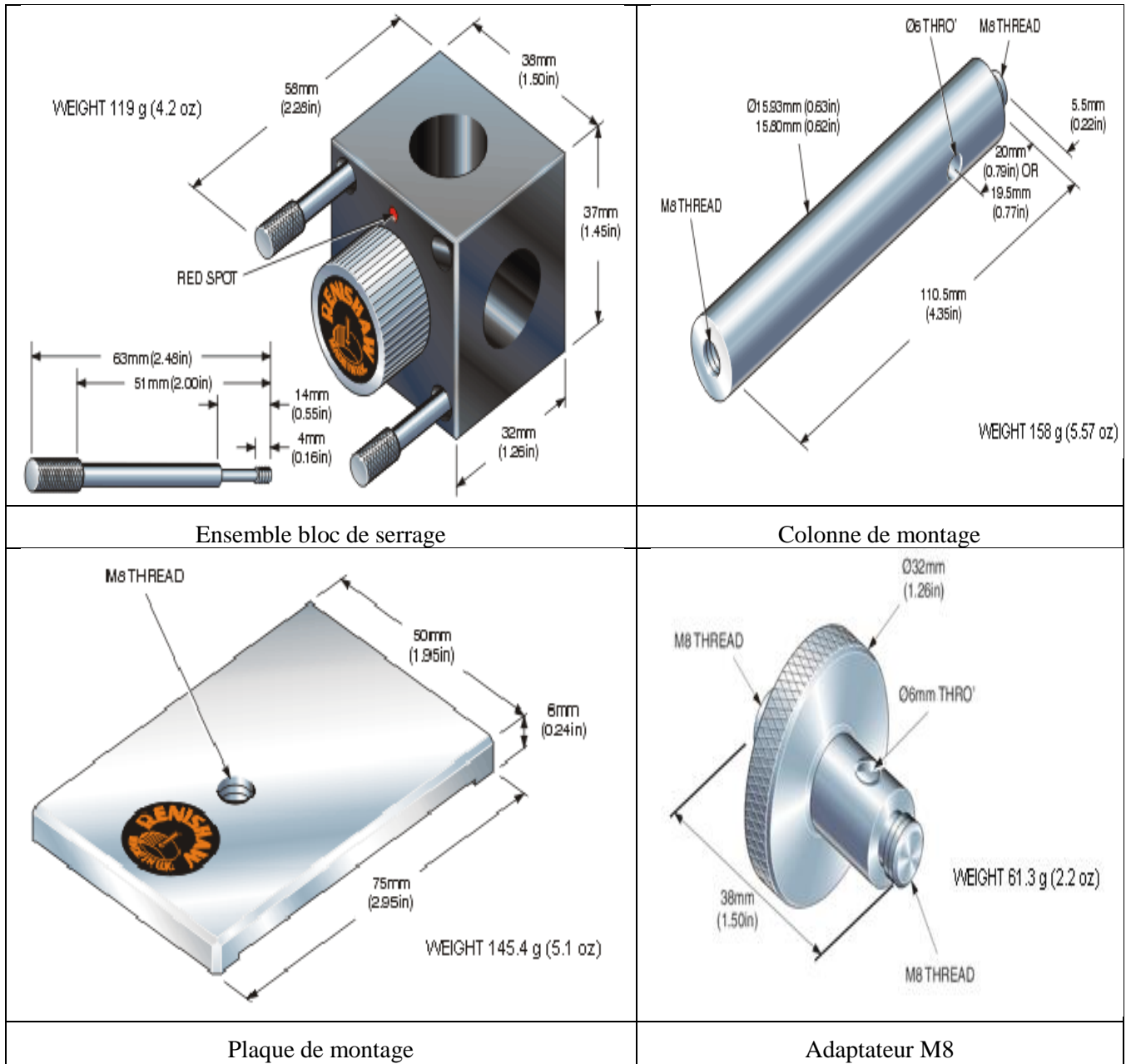


Figure III-26 Dimensions et poids Kit de montage optique.

III-5-4 Optique de mesure linéaire

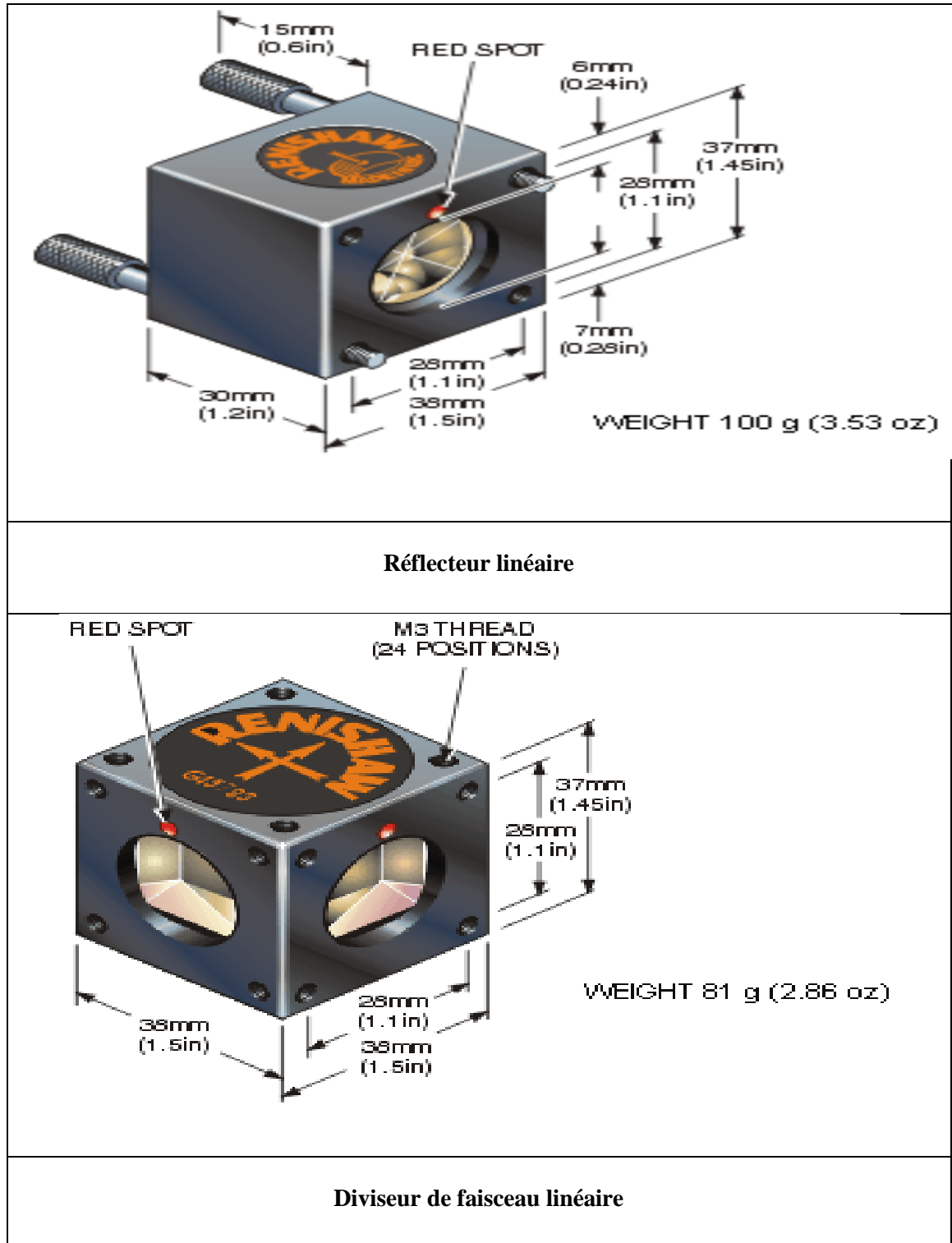


Figure III-27 Dimensions et poids Optique de mesure linéaire.

III-5-5 Optique de mesure angulaire

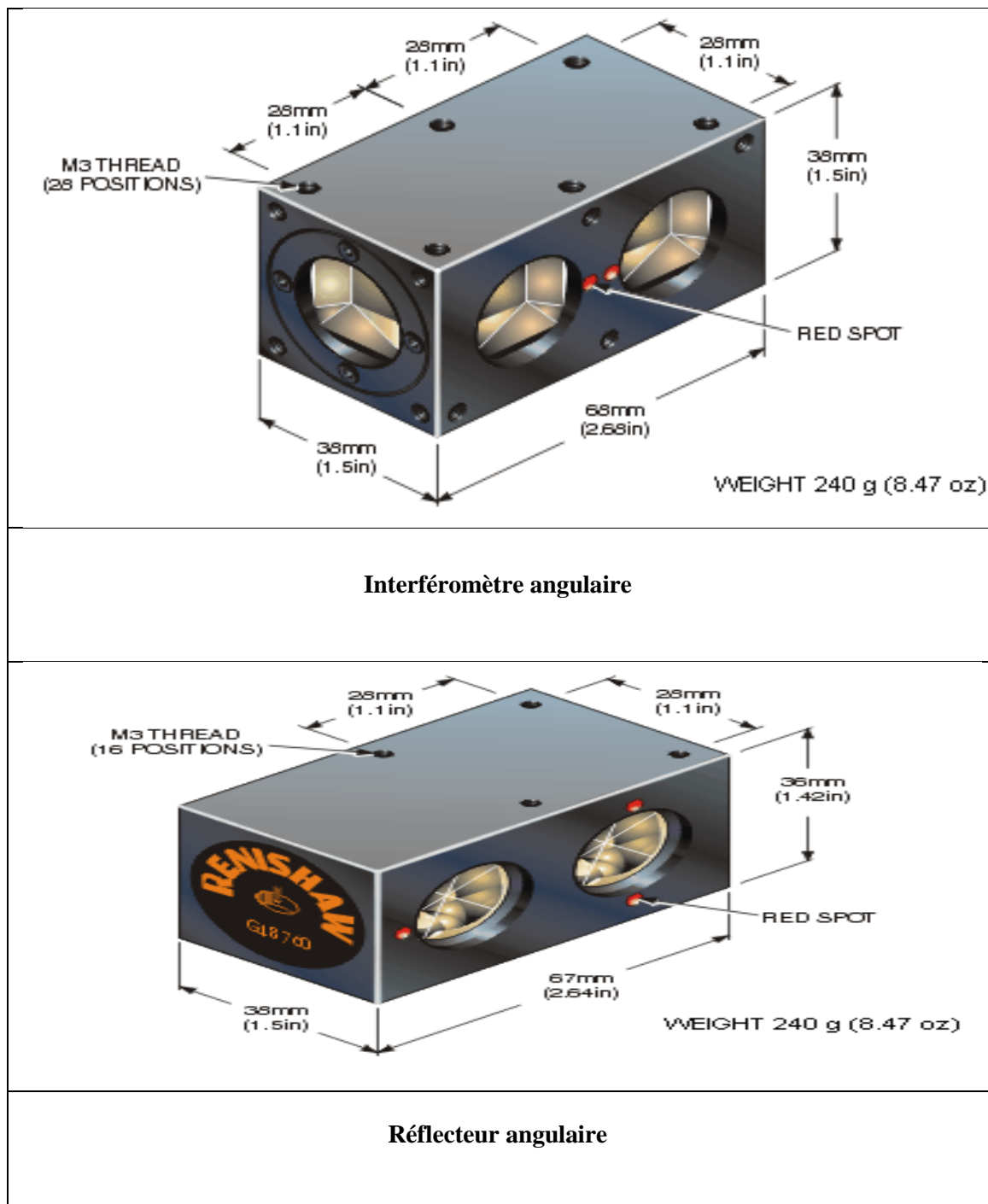


Figure III-28 Dimensions et poids Optique de mesure angulaire.

III-5-6 Optique de mesure de rectitude

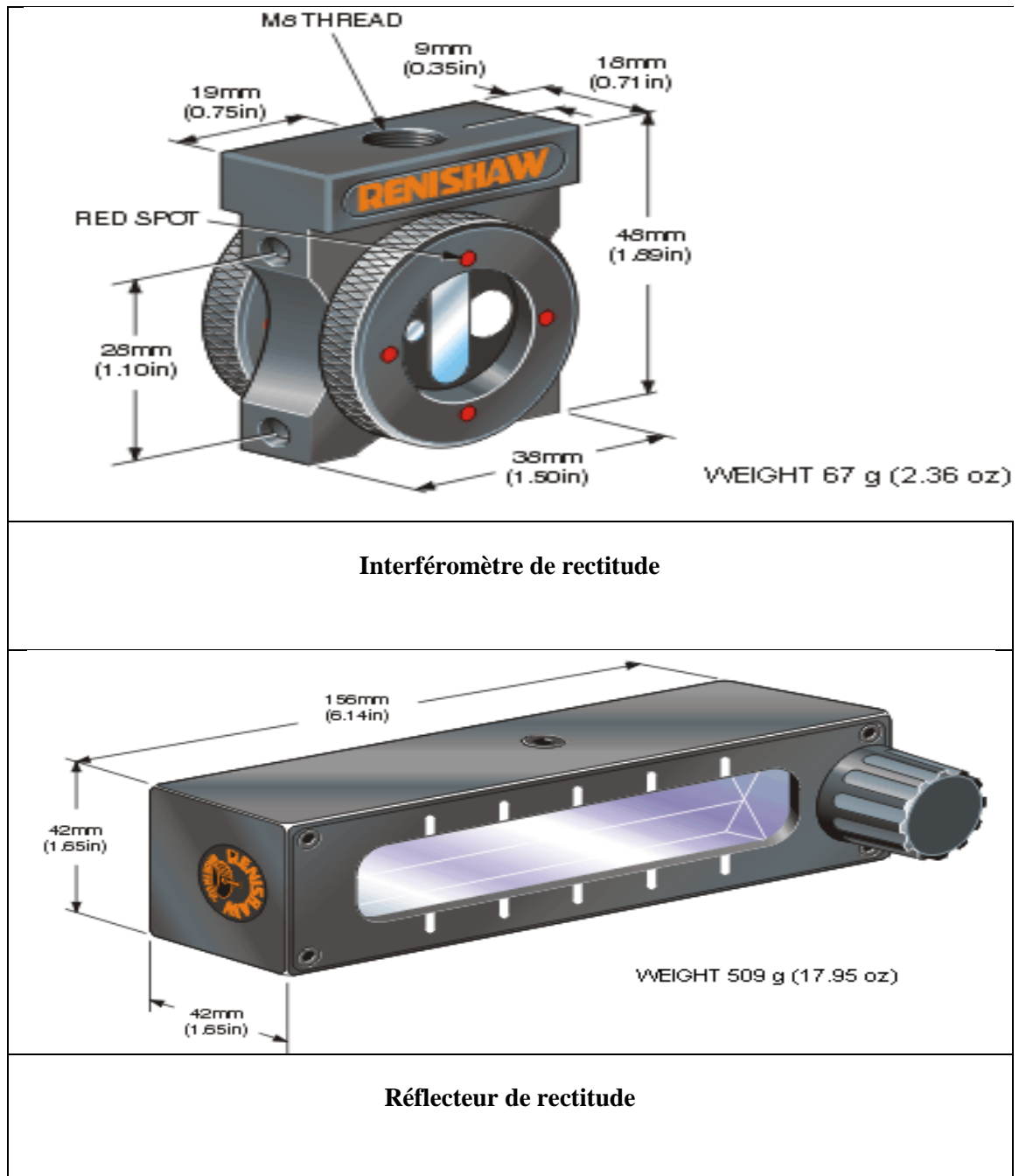


Figure III-29 Dimensions et poids Optique de mesure de rectitude.

III-5-7 Accessoires

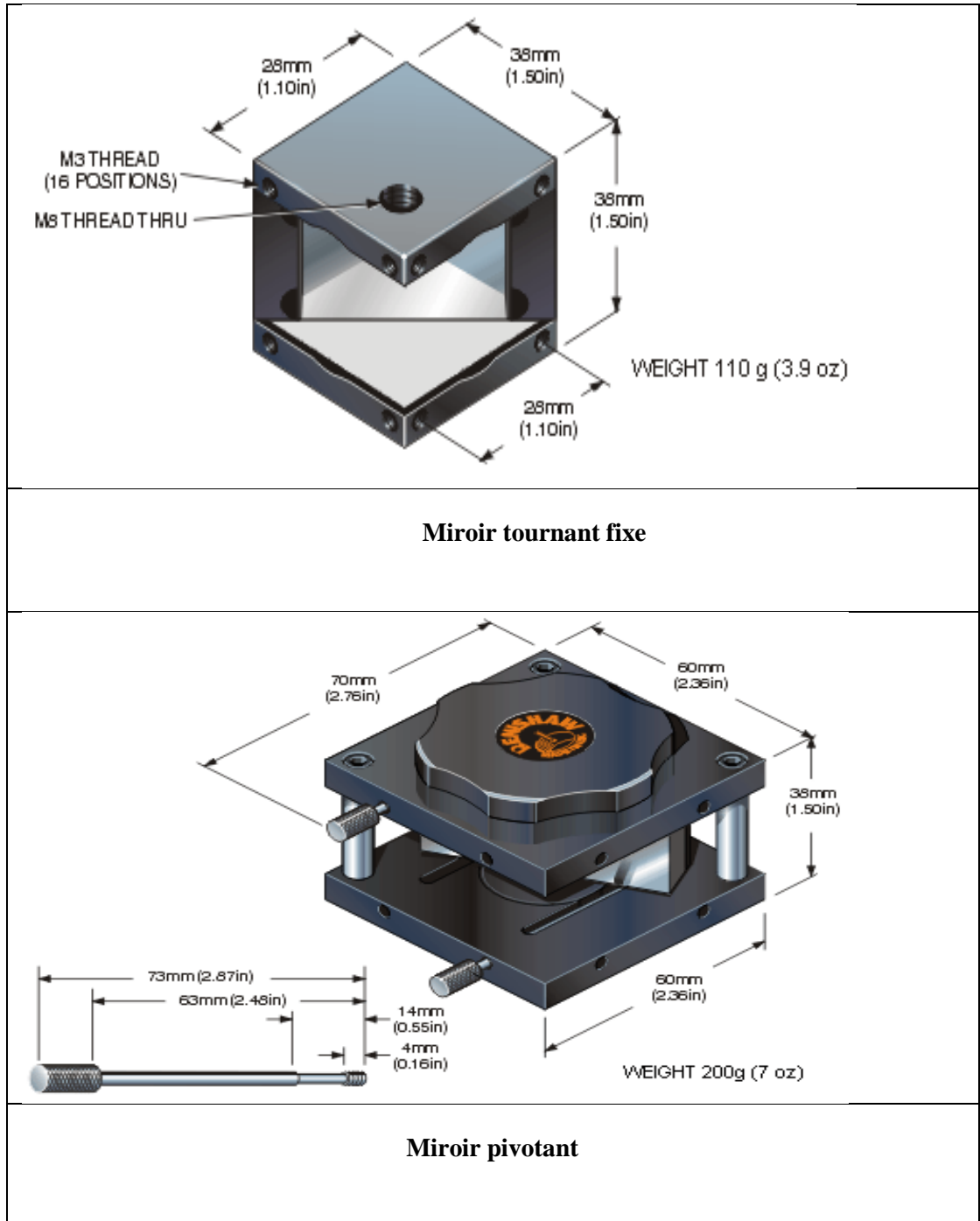


Figure III-30 Dimensions et poids accessoires miroir tournant fixe et miroir pivotant.

III-6 Logiciels

III-6-1 Logiciel Laser XL

Le logiciel Laser XL™ (Figure III-31) comprend des modules de mesure linéaire, angulaire, d'axe rotatif, de planéité, de rectitude et de perpendicularité, ainsi que des fonctionnalités de mesure dynamique. Les options de rapport standard sont conformes à de nombreuses normes de contrôle de performances machine telles que ISO, ASME, VDI, JIS et GB, et elles comprennent une analyse complète.

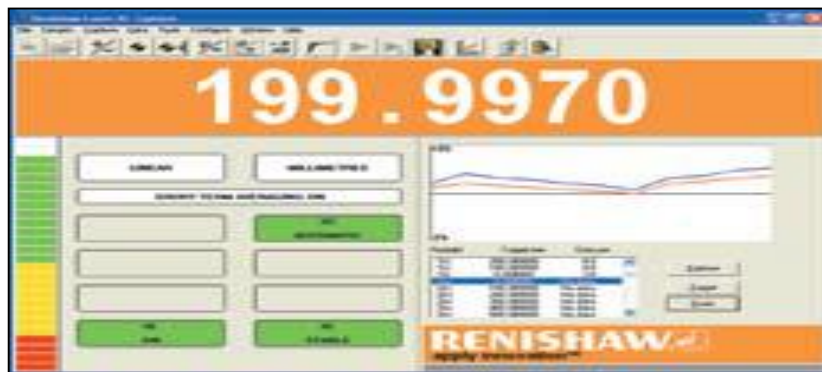


Figure III-31 Interface de Logiciel Laser XL.

La fonctionnalité de mesure dynamique permet de recueillir des données à des cadences de 10 Hz à 50 kHz (12 valeurs prédéfinies) et produit des données de déplacement, de vitesse et d'accélération. Pour l'analyse de fréquence, un logiciel FFT (Transformation rapide de Fourier) est également intégré. Avec les options logicielles de compensation d'erreur linéaire, les données obtenues par une calibration Laser XL™ peuvent créer des valeurs de compensation exploitables par la commande numérique de la machine-outil, ce qui améliore considérablement la précision de positionnement des machines. Des logiciels de compensation sont disponibles pour s'interfacer avec de nombreuses commandes numériques.

III-6-2 Quick View XL™

Affichage en direct et en temps réel des données de mesure laser pour l'analyse de déplacement, de vitesse et d'accélération. Quick View XL™ (Figure III-32) est l'outil idéal en Recherche et Développement, car il permet d'effectuer des inspections, examens et caractérisations rapides et faciles sur les systèmes de positionnement. Ces deux logiciels sont compatibles avec les systèmes d'exploitation Windows® XP (SP2) et Vista® (seulement 32

bits). Une spécification correcte du PC est indispensable pour garantir les performances du système.



Figure III-32 Interface de Logiciel Quick View XL™.

CHAPITRE VI

MESURE PAR L'INTERFEROMETRE
LASER

CHAPITRE IV MESURE PAR L'INTERFEROMETRE LASER

Une machine-outil 3 axes courante à 21 degrés de liberté (écarts par rapport à la norme tels que positionnement linéaire, tangage, lacet, rectitude, roulis et perpendicularité aux autres axes). Tous pouvant nuire à la précision globale du positionnement de la machine et à la précision des pièces usinées. ce chapitre explique les procédures d'installation et d'alignement utilisées pour la prise des données des 21 écarts cinématique articulaire d'une machine-outil à commande numérique en utilisant l'interféromètre laser Renishaw.

IV-1 Mesure linéaire

IV-1-1 Procédure pour effectuer une mesure linéaire

La mesure linéaire est la mesure la plus fréquente effectuée avec un laser. Le système laser affiche la répétabilité et la précision du positionnement linéaire en comparant la position sur l'axe affichée avec la position vraie mesurée par le système laser.

Les étapes requises pour la mesure linéaire sont les suivantes :

- Configurez le système laser pour effectuer les mesures linéaires.
- Alignez le faisceau laser avec l'axe de course de la machine.
- Activez ensuite la compensation d'environnement automatique et vérifiez que le coefficient de dilatation matérielle entré dans le logiciel est correct
- Mesurez et enregistrez les erreurs linéaires de la machine.
- Analysez les données saisies. Avant d'effectuer l'analyse en fonction de la norme internationale ou nationale choisie, examinez les données saisies avec un graphique de toutes les données (All Data Plot) pour rechercher les erreurs de mesure.

IV-1-2 Configuration de mesure linéaire

La (figure IV-1) représente une configuration type du système pour mesurer le positionnement linéaire.

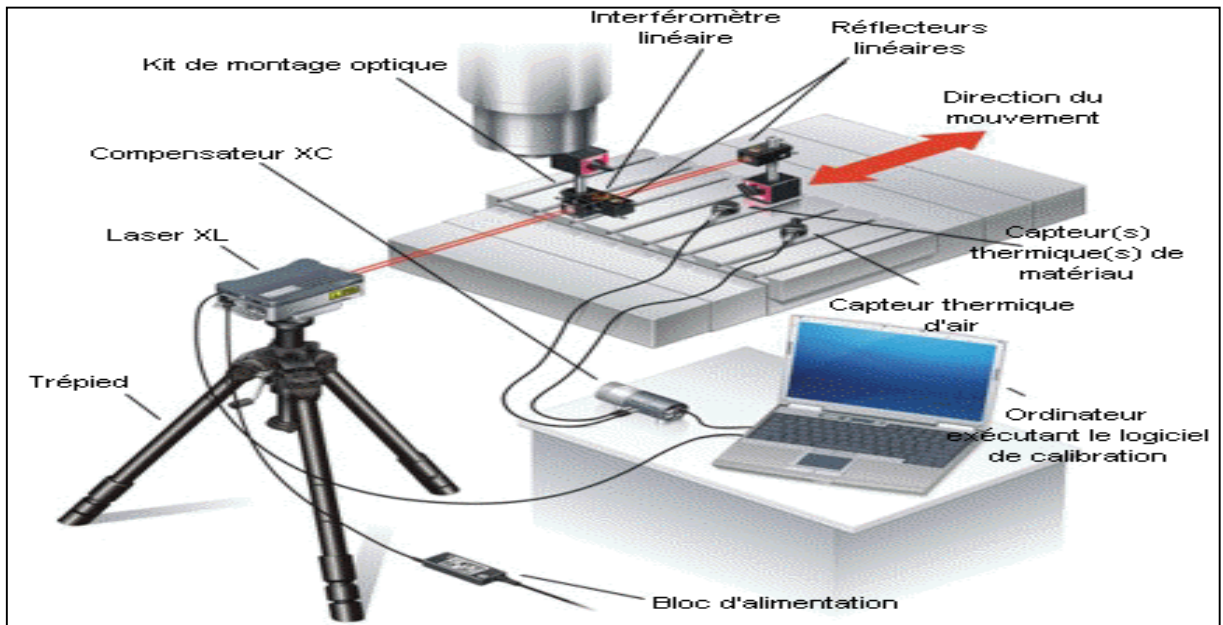


Figure IV-1 Configuration type du système pour mesurer une position.

Procédez de la façon suivante pour installer le système laser pour une mesure linéaire :

- installez le logiciel de calibration.
- Fixez les composants d'optique linéaire sur la machine à calibrer.
- Montez la tête laser XL sur le trépied.

Connectez le laser XL au PC par un cordon USB. Branchez une extrémité du cordon sur la prise USB située à l'arrière du laser XL et l'autre extrémité sur celle située à l'arrière du PC. Faites de même avec le compensateur XC.

- Branchez les capteurs d'environnement sur le compensateur XC.
- Placez les capteurs thermiques d'air du XC à une position appropriées sur ou autour de la machine.
- Placez les capteurs thermiques de matériau à des positions appropriées sur la machine.

Connectez l'alimentation du laser puis branchez-la sur le secteur. Le laser commencera son cycle de préchauffage qui dure environ 6 minutes.

- Exécutez le logiciel de saisie des données linéaires
- Alignez le faisceau laser avec l'axe de course de la machine

IV-1-3 Principes de mesure linéaire

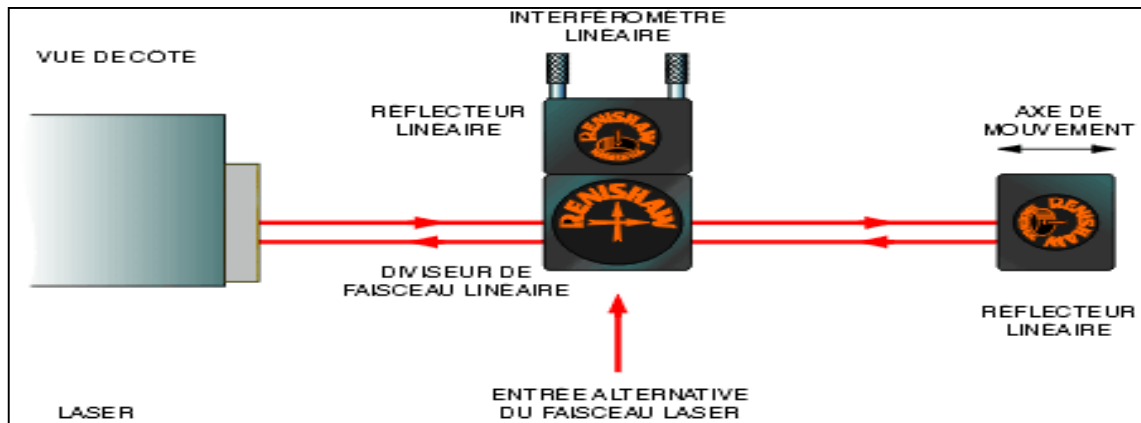


Figure IV-2 Configuration optique pour la mesure linéaire.

Pour une configuration de mesure linéaire, fixez l'un des réflecteurs linéaires au diviseur de faisceau à l'aide des deux vis imperdables fournies. Cet élément de la combinaison est appelé 'interféromètre linéaire' ; il constitue le trajet de référence pour le faisceau laser. Comme le montre la figure IV-2, l'interféromètre linéaire est positionné sur le trajet du faisceau entre le Laser XL et le réflecteur linéaire. Le carter du diviseur de faisceau est marqué de deux flèches montrant son orientation. Les têtes des flèches doivent pointer vers les deux réflecteurs comme cela est indiqué plus haut.

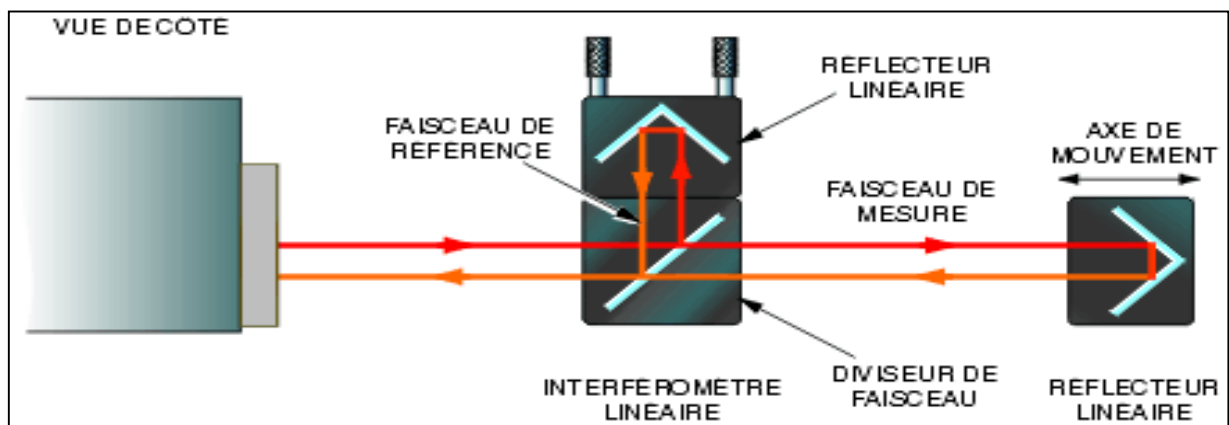


Figure IV-3 Principe de mesure.

Le faisceau du Laser XL pénètre dans l'interféromètre linéaire où il se divise en deux faisceaux. Un faisceau (appelé le faisceau de référence) est dirigé vers le réflecteur fixé au diviseur de faisceau, tandis que le deuxième faisceau (le faisceau de mesure) traverse le diviseur de faisceau vers le deuxième réflecteur. Les deux faisceaux sont ensuite réfléchis

vers le diviseur où ils sont recombinaés pour être dirigés en retour vers la tête laser où un détecteur incorporé à la tête surveille l'interférence entre les deux faisceaux.

Pendant les mesures linéaires, l'un des composants optiques reste stationnaire tandis que l'autre se déplace sur l'axe linéaire. On obtient la mesure de la position en surveillant le changement dans la différence du trajet optique entre les faisceaux de référence et de mesure (à noter qu'il s'agit d'une mesure différentielle entre les deux composants optiques, indépendante de la position du Laser XL). Cette mesure peut être comparée à la lecture d'échelle de la machine testée pour établir les erreurs de précision potentielles de la machine.

En règle générale, on installe le réflecteur comme composant optique mobile et l'interféromètre comme composant stationnaire comme le montre la figure IV-3. Ces rôles peuvent être inversés, mais cela réduit la plage maximale qui permet d'établir les mesures, de 40 m à 15 m. Par conséquent sur les longs axes, l'interféromètre linéaire est normalement maintenu à l'état stationnaire tandis que l'autre réflecteur se déplace pour prendre les mesures.

IV-1-4 Montage de l'optique linéaire

Pour monter l'optique linéaire, vous devez disposer d'un kit de montage optique et de brides adaptées pour fixer les composants optiques à la machine à tester. La figure IV-4 représente une configuration typique de montage de l'optique linéaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage.

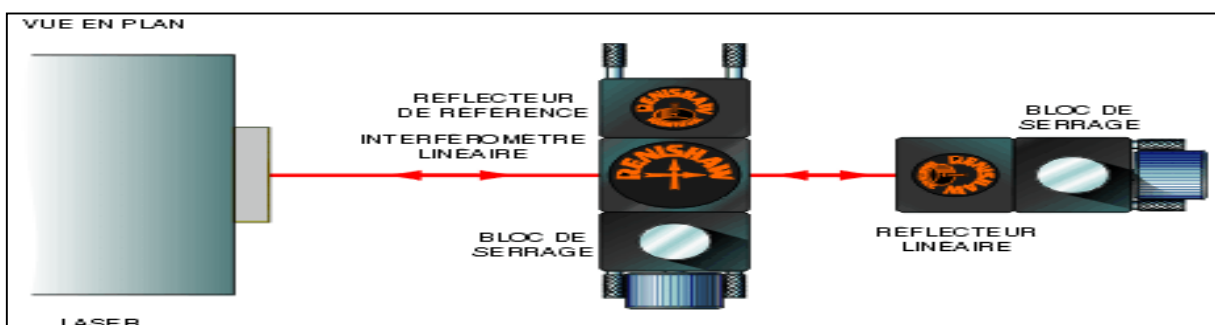


Figure IV-4 Montage de l'optique linéaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage.

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, essayez toujours de fixer rigidement l'interféromètre et le rétro-rélecteur sur la machine. Essayez aussi de disposer le laser et les composants optiques pour que l'interféromètre soit l'optique stationnaire. Cela évite les erreurs éventuelles, si une déviation de faisceau est introduite par l'interféromètre mobile. Un exemple de positionnement de l'interféromètre et du réflecteur sur un centre d'usinage et une machine CMM est représenté dans la figure IV-5.

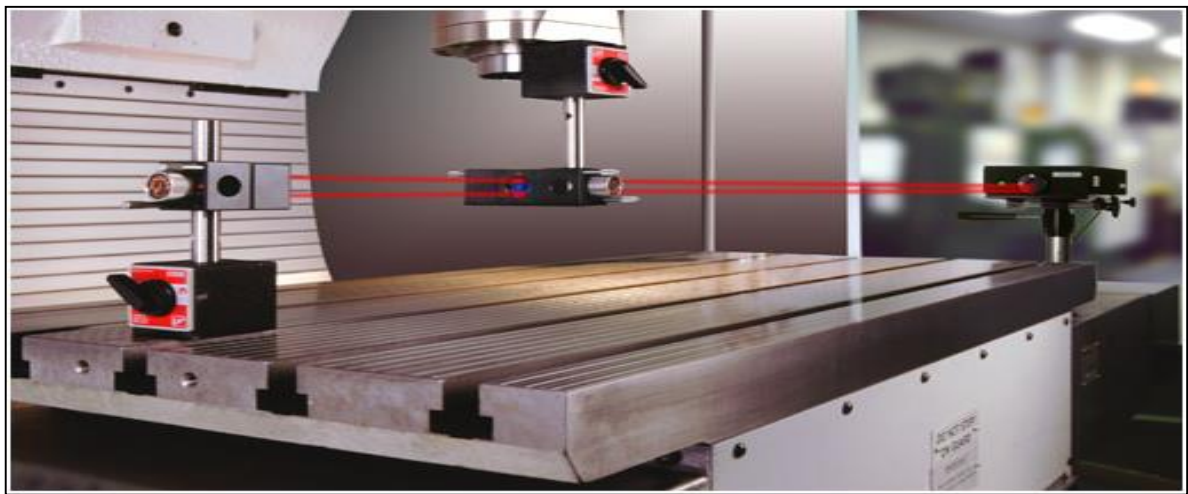


Figure IV-5 Mesure de positionnement linéaire de l'axe X sur un centre d'usinage vertical.

IV-1-5 Configurations les optiques des mesures linéaires

L'optique de mesure linéaire peut être installée selon plusieurs configurations. La configuration utilisée dépend du type de machine et de l'axe à calibrer. La plupart des configurations de mesure linéaire tombent dans l'une des figures suivantes :

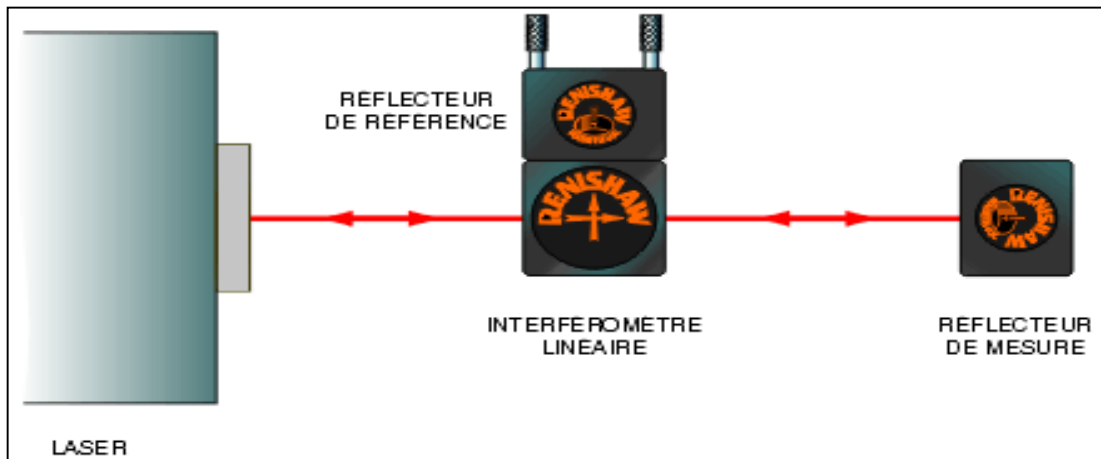


Figure IV-6 Axes horizontaux – interféromètre mobile ou réflecteur mobile.

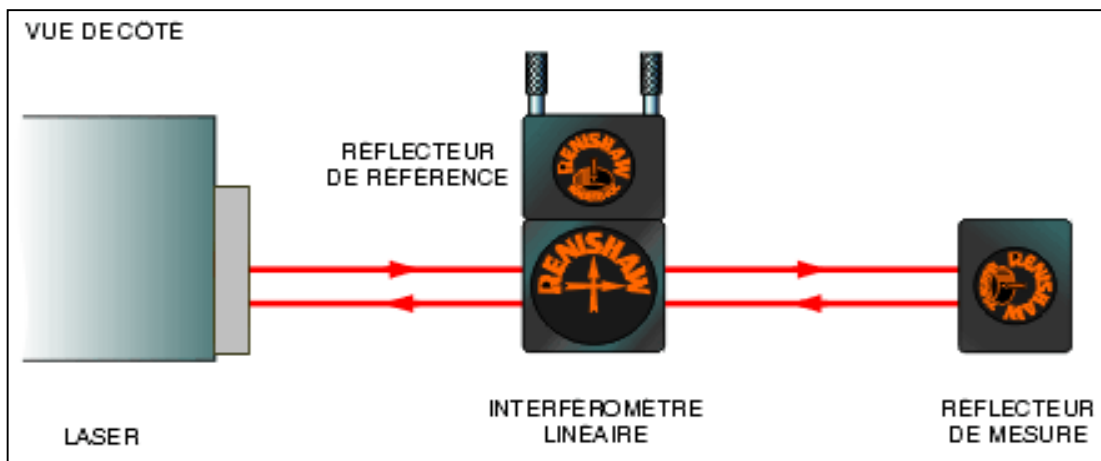


Figure IV-7 Axes horizontaux – interféromètre mobile ou réflecteur mobile avec bras de référence verticale.

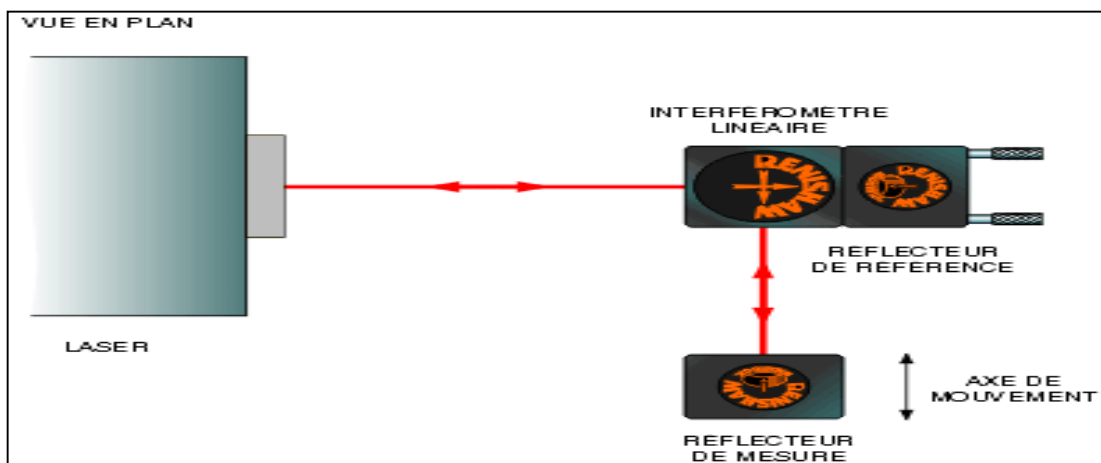


Figure IV-8 Axes horizontaux – à angle droit de la tête laser – réflecteur mobile.

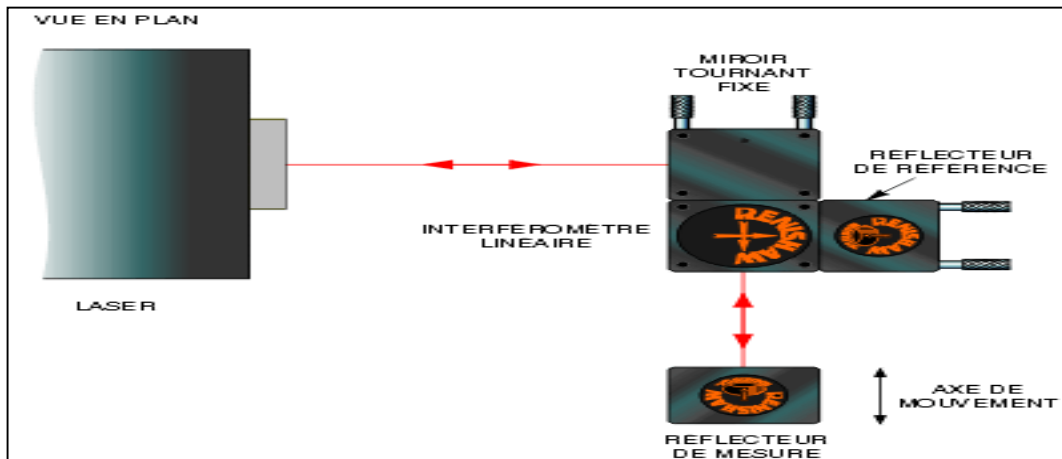


Figure IV-9 Axes horizontaux – à angle droit de la tête laser – miroir tournant et interféromètre stationnaires – réflecteur mobile.

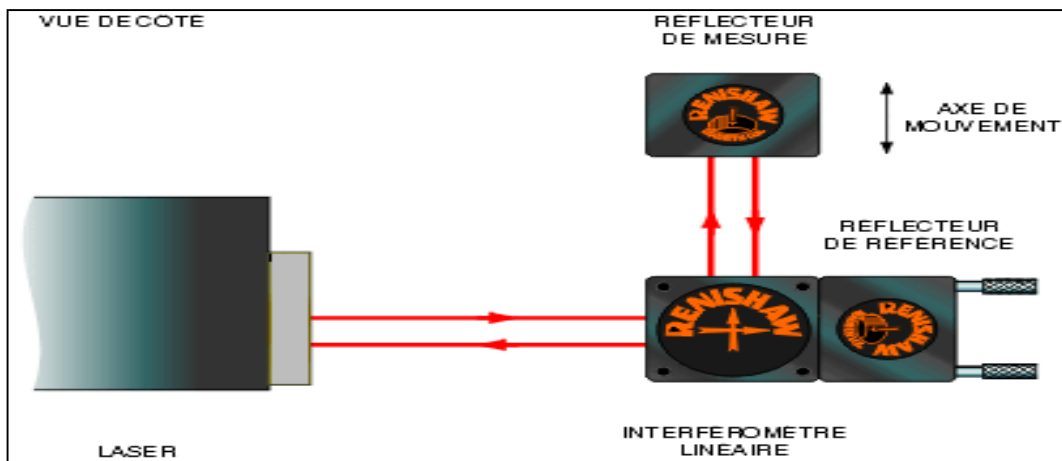


Figure IV-10 Axes verticaux – réflecteur mobile.

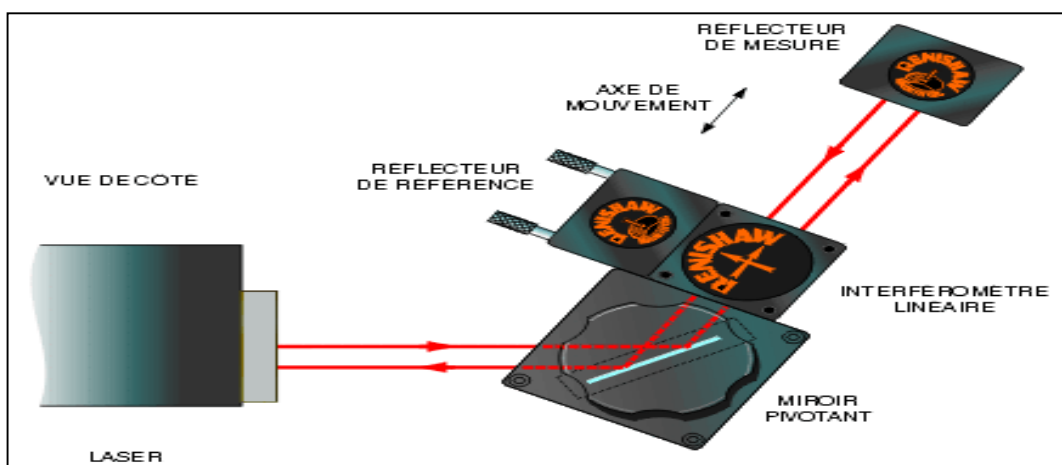


Figure IV-11 Axes inclinés – miroir pivotant et interféromètre stationnaires – réflecteur mobile.

IV-1-6 Alignement du faisceau linéaire

IV-1-6-1 Procédure d'alignement linéaire

1. Entraînez la machine le long de l'axe de course pour que le réflecteur s'éloigne de l'interféromètre (voir la figure 1).

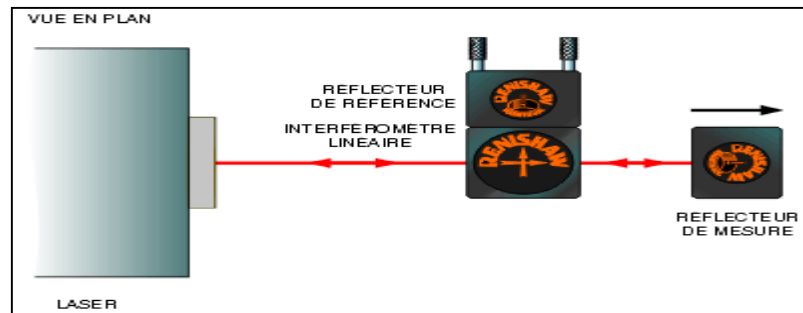


Figure 1.

2. Déplacez 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 qu'indiqué à la Figure 2.

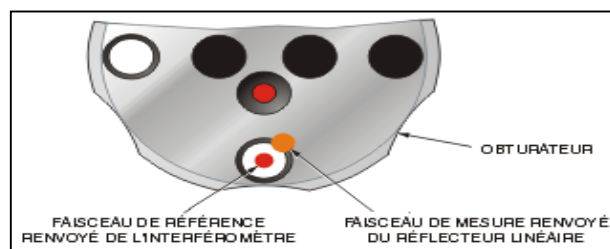


Figure 2.

IV-1-6-2 Réglage de faisceau vertical

3. Utilisez 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 voir la figure 3.



Figure 3.

- Utilisez maintenant 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 qu'indiqué à la Figure 4.

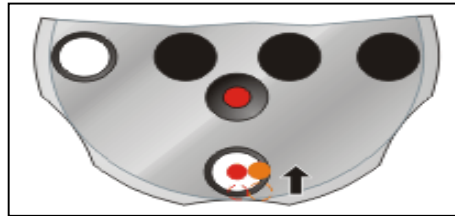


Figure 4.

IV-1-6-3 Réglage de faisceau horizontal

- A l'aide du petit bouton situé à l'arrière du côté gauche de la plate-forme du trépied, ajustez le lacet angulaire de la tête laser pour amener les deux faisceaux l'un au-dessus de l'autre voir la figure 5.

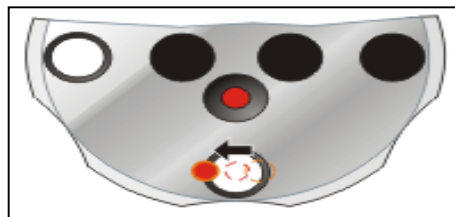


Figure 5.

- Ensuite, utilisez 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 qu'indiqué à la Figure 6.

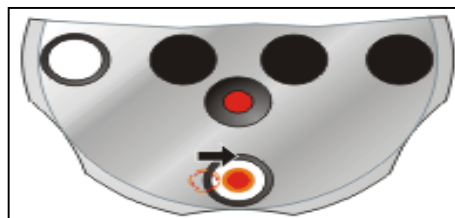


Figure 6.

- Reprenez 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.

8. Après avoir atteint la fin de l'axe, ramenez la machine vers l'arrière de façon à rapprocher le rétro-rélecteur et le réflecteur linéaire.
9. Refaites les étapes jusqu'à ce que les deux faisceaux restent au centre de la cible sur toute la course de l'axe.
10. Le faisceau laser est maintenant aligné avec l'axe de course. Mettez l'obturateur en position de mesure tel qu'indiqué à la figure 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 voir la figure 7.

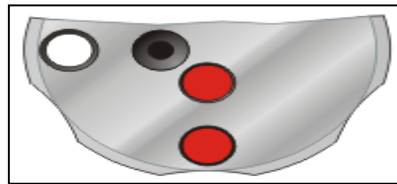


Figure 7.

11. Supprimez l'erreur d'obstruction de faisceau BEAM OBSTRUCT en définissant l'origine du laser.
12. Bloquez 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.
13. 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.

IV-1-7 Facteurs affectant la précision des mesures linéaires

IV-1-7-1 Erreur de parcours mort

L'erreur de parcours mort est une erreur associée à des changements d'environnement survenant pendant une mesure linéaire où une distance importante sépare l'optique de la position d'origine. En conditions normales, l'erreur de parcours mort est insignifiante et n'intervient que si l'environnement change après une prise d'origine ou pendant une mesure. L'erreur de parcours mort de la mesure laser du trajet L_2 est apparentée à la distance entre les deux éléments optiques lorsque l'origine du système est définie L_1 (voir la figure IV-12). S'il n'y a pas de mouvement entre l'interféromètre et le réflecteur et si les conditions

d'environnement du faisceau laser changent, la longueur d'onde (dans l'air) change sur tout le trajet ($L_1 + L_2$) mais le système de mesure laser n'est compensé que sur la distance L_2 . Une erreur de mesure de parcours mort sera donc introduite en raison de la non-compensation affectant le trajet de faisceau L_1 .

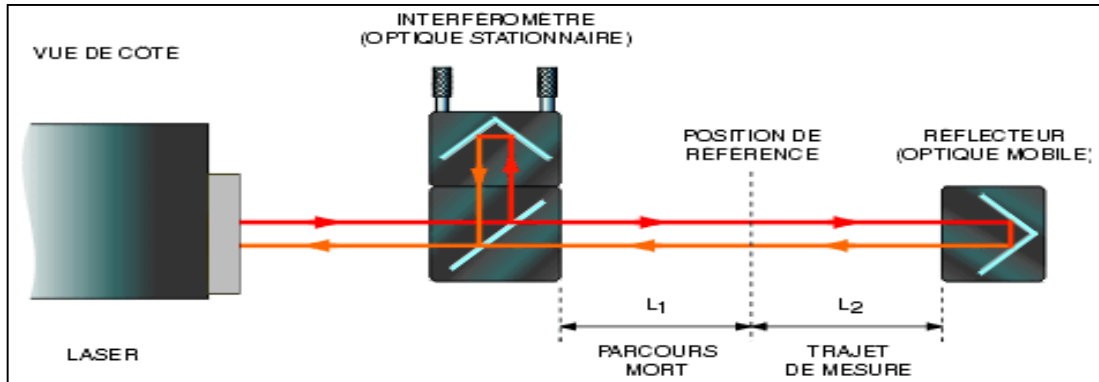


Figure IV-12 Erreur de parcours mort.

IV-1-7-2 Erreur cosinusoidale

Tout défaut d'alignement du trajet laser par rapport à l'axe de mouvement entraîne un écart entre la distance mesurée et la distance effective accomplie, conformément à la figure IV-13.

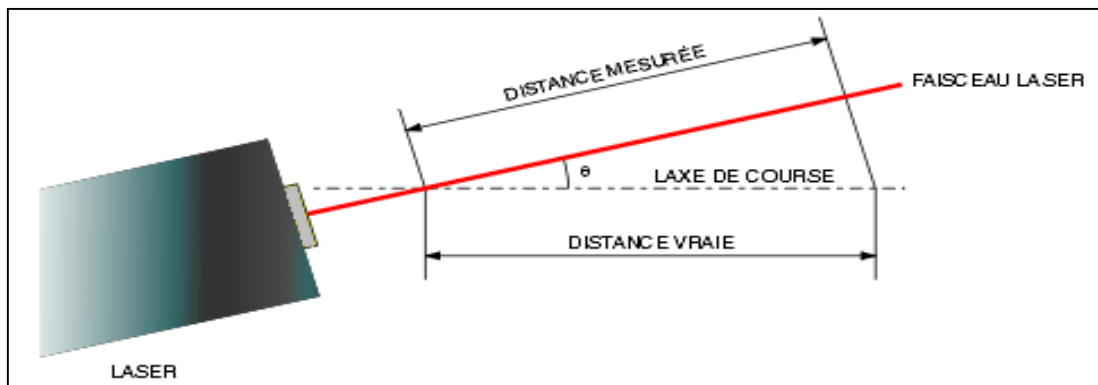


Figure IV-13 Erreur cosinusoidale.

Cette erreur d'alignement est souvent appelée erreur cosinusoidale. L'importance de cette erreur est liée à l'angle de désalignement entre le faisceau laser et l'axe de course indiqué par θ dans la figure IV-13. Lorsque le système de mesure laser est désaligné par rapport à l'axe de course, la distance mesurée est plus courte que la distance réelle en raison de l'erreur cosinusoidale. L'erreur augmente sensiblement à mesure que le désalignement angulaire augmente, comme la montre la figure suivant :

Angle θ (mm/mètre)	Angle θ (minutes)	Erreur (ppm)
0.45	1.53	0.1
1.00	3.43	0.5
1.40	4.87	1.0
3.20	10.87	5.0
4.50	15.39	10.0
10.00	35.39	50.0

Figure IV-14 Tableau d'augmentation l'erreur cosinusoidale.

Pour minimiser l'erreur cosinusoidale, le faisceau laser de mesure doit être aligné de façon à être parallèle à l'axe de course.

IV-1-7-3 Erreur de décalage d'Abbe

Lorsqu'on établit une mesure avec le faisceau aligné parallèlement, mais décalé par rapport à l'axe de calibrage défini, les erreurs angulaires de la machine (le tangage ou le lacet par exemple) peuvent introduire une erreur de mesure de décalage d'Abbe (voir la figure IV-15).

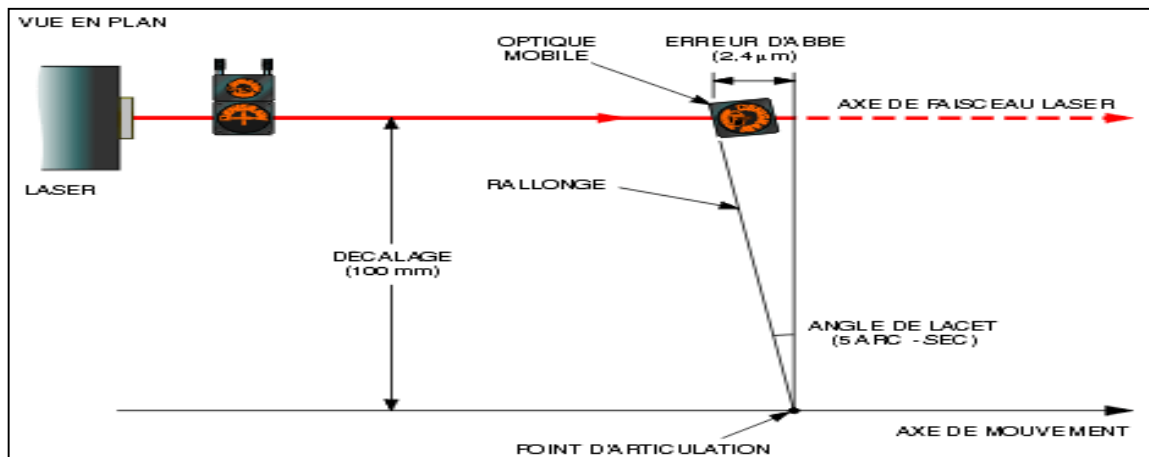


Figure IV-15 Erreur de décalage d'Abbe.

Pour minimiser l'effet de cette erreur de décalage, le faisceau de mesure laser doit coïncider avec (ou en être le plus près possible) la ligne le long de laquelle le calibrage est requis. Ainsi, pour calibrer la précision du positionnement linéaire de l'axe Z sur un tour, le faisceau de mesure laser doit être aligné près de la ligne médiane de la broche. Cela permet de minimiser la contamination des mesures linéaires par les erreurs angulaires de tangage et de lacet de la machine.

Pour chaque seconde de mouvement angulaire, l'erreur introduite est d'environ 0,005 $\mu\text{m}/\text{mm}$ de décalage. Le tableau suivant fournit des exemples d'erreurs en microns provoqués par des écarts grandissants de lacet ou de tangage :

Angle (<u>secondes</u>)	Distances de décalage (<u>mm</u>)				
	5	10	50	100	500
1	0.024	0.048	0.24	0.48	2.40
2	0.048	0.097	0.48	0.97	4.80
5	0.120	0.240	1.20	* 2.40	12.00
10	0.240	0.480	2.40	4.80	24.00
20	0.480	0.970	4.80	9.70	48.00
60	1.450	2.900	14.50	29.00	145.00
120	2.900	5.800	29.00	58.00	290.00

Figure IV-16 Tableau d'exemples d'erreurs en microns provoqués par des écarts grandissants.

L'angle est constant, cela n'entraîne pas d'erreur d'Abbe puisque l'optique mobile entraîne (ou retarde) alors le 'point pivot' par une distance constante et le fonctionnement du système est basé sur une mesure différentielle (c.-à-d. à partir du point de référence). La machine à tester peut elle-même être sujette à une erreur d'Abbe. Dans ce cas, la position de l'axe de mesure par rapport à l'axe de l'échelle de la machine affecte la mesure.

IV-1-7-4 Erreur de parcours mort du matériau

Pour les mesures linéaires, la compensation de dilatation matérielle n'est normalement appliquée qu'à la longueur de trajet de matériau égale à la distance laser mesurée. Si la boucle de mesure inclut des structures supplémentaires, alors la contraction ou dilatation thermique de ce 'parcours mort du matériau' ou la déviation sous la charge entraîne des erreurs de mesure. Pour minimiser ces erreurs, montez les composants optiques directement aux points entre lesquels les mesures sont effectuées.

IV-1-8 Positionnement correct de l'optique pour minimiser les erreurs de mesure

Prenez les facteurs suivants en considération lors du montage des composants optiques pour simplifier la configuration et minimiser les risques d'erreur de mesure.

- Minimisez l'erreur de décalage d'Abbe
- Fixez les éléments optiques directement aux points intéressants
- Fixez les éléments optiques de façon rigide
- Rassemblez les éléments optiques à une extrémité du parcours de l'axe
- Évitez les sources thermiques localisées
- Minimisez l'erreur de parcours mort du matériau
- Utilisez des miroirs tournants
- Propreté des composants optiques

IV-1-9 Spécifications

Mesure linéaire	
	Métrique
Plage standard	0 à 80 μm
Précision (avec compensateur XC)	$\pm 0,5 \text{ ppm}^*$
Résolution	0,001 μm
Vitesse maximum	240 m/mn (4 m/s)

Figure IV-17 Tableau de Spécifications de mesure linéaires.

Remarque : Les valeurs de précision ne comprennent pas les erreurs associées à la normalisation des lectures à une température de matériau de 20 °C. k=2 (95 % de confiance) EA-4/02, ISO.

IV-2 Mesure angulaire

IV-2-1 Procédure pour effectuer une mesure angulaire

Les erreurs d'angle de tangage et de lacet comptent parmi les facteurs les plus importants contribuant à l'imprécision du positionnement sur les machines-outils et aux erreurs de précision de mesure sur les MMT. Les erreurs de lacet peuvent être causées par le mouvement d'une machine sur des guides desserrés, tandis que les erreurs de tangage peuvent venir d'effets de courbure dans ces guides. Le système laser mesure la précision et la répétabilité du positionnement d'angle de tangage et de lacet à des positions cibles le long de l'axe de parcours de la machine.

Les étapes requises pour la mesure angulaire sont les suivantes :

- Configurez le laser XL et l'optique angulaire.
- Alignez le faisceau laser avec l'axe de parcours de la machine.
- Saisissez les données angulaires. Si des angles supérieurs à $\pm 1^\circ$ sont mesurés, assurez-vous que la correction sinus d'arc est activée.
- Analysez les données angulaires. Avant d'effectuer l'analyse en fonction de la norme internationale ou nationale choisie, examinez les données saisies avec un graphique "Toutes données" (All Data Plot) pour rechercher les erreurs de mesure.

IV-2-2 Configuration de mesure angulaire

Une configuration type de système pour mesurer des erreurs angulaires de lacet et de tangage est illustrée à la Figure IV-18.

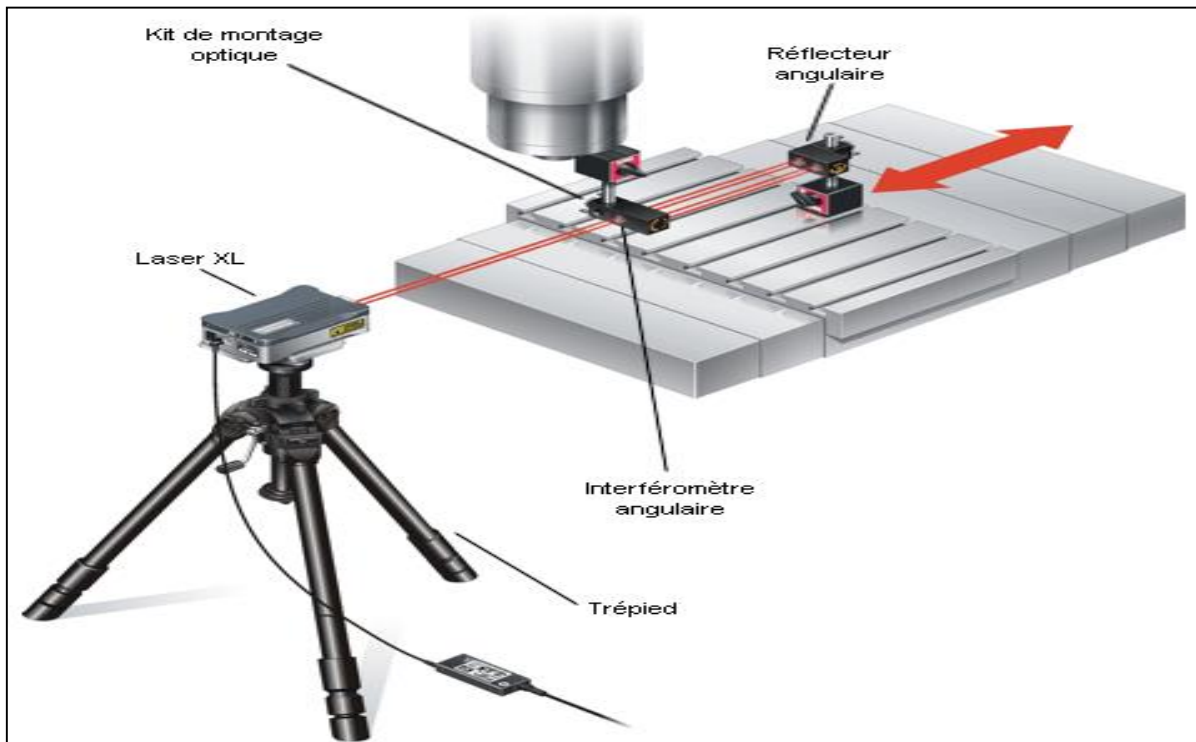


Figure IV-18 Configuration système type pour mesure d'angle de tangage et de lacet.

Pour installer le système laser en vue d'une mesure angulaire, procédez ainsi :

- Installez le logiciel de calibration.
- Fixez les composants d'optique angulaire sur la machine à calibrer.
- Montez la tête laser XL sur le trépied.

Branchez le laser XL sur le PC par un cordon USB. Branchez une extrémité du cordon sur la prise USB située à l'arrière du laser XL et l'autre extrémité sur celle située à l'arrière du PC.

- Connectez l'alimentation C.C. du laser XL puis branchez celle-ci sur le secteur et mettez sous tension. Le laser commencera un cycle de préchauffage qui dure environ 6 minutes.
- Exécutez le logiciel de saisie de données angulaires
- Alignez le faisceau laser avec l'axe de parcours de la machine.

IV-2-3 Principes de la mesure angulaire

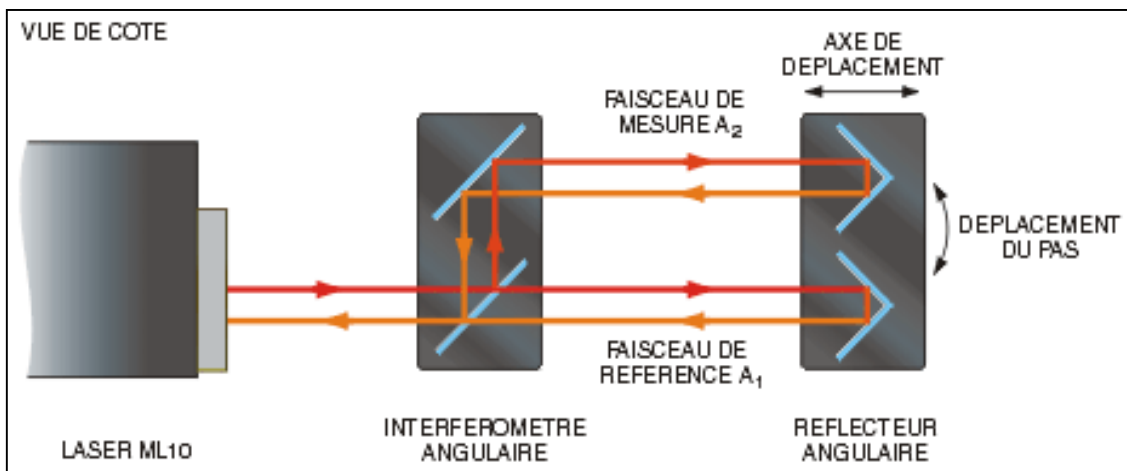


Figure IV-19 Configuration optique pour la mesure angulaire.

Pour qu'une mesure angulaire ait lieu, il faut qu'il y ait une rotation d'un composant optique (le réflecteur angulaire) par rapport à l'autre (l'interféromètre angulaire). Ceci produit un changement dans la différence de parcours entre les deux faisceaux de mesure, ainsi qu'indiqué ci-après. Ce changement de différence de parcours est déterminé par le circuit de numération de franges dans le laser XL, et le logiciel le convertit en mesure angulaire ou en erreur angulaire. L'interféromètre angulaire est placé dans le faisceau entre la tête laser et le réflecteur angulaire, ainsi qu'indiqué à la Figure IV-19. Le côté de l'interféromètre angulaire avec deux faces optiques doit être tourné dans l'autre sens que la tête du laser, c'est-à-dire vers le réflecteur. Pour des mesures de tangage le long d'un axe horizontal, les deux composants optiques sont montés à la verticale ; pour les mesures de lacet, ils sont tous deux à l'horizontale.

Le faisceau laser est divisé en deux par le diviseur intégré à l'interféromètre angulaire. Une partie du faisceau (A_1) traverse directement l'interféromètre et est réfléchié par une moitié du réflecteur angulaire vers la tête du laser. L'autre faisceau (A_2) traverse le périscope de l'interféromètre angulaire vers l'autre moitié du réflecteur angulaire, lequel le renvoie par l'interféromètre à la tête laser. Les mesures angulaires sont réalisées par comparaison de la différence de parcours entre les faisceaux A_1 et A_2 . Autrement dit, la mesure est indépendante tant de la distance entre le laser et l'interféromètre angulaire que de la distance entre l'interféromètre angulaire et le réflecteur angulaire.

IV-2-4 Montage de l'optique angulaire

Pour monter l'optique angulaire sur la machine à calibrer, vous devez disposer d'un kit de montage d'optique et de brides adaptées pour fixer les composants optiques à la machine. La figure IV-20 représente une configuration type de montage d'optique angulaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage pour mesurer le lacet angulaire sur un axe horizontal.

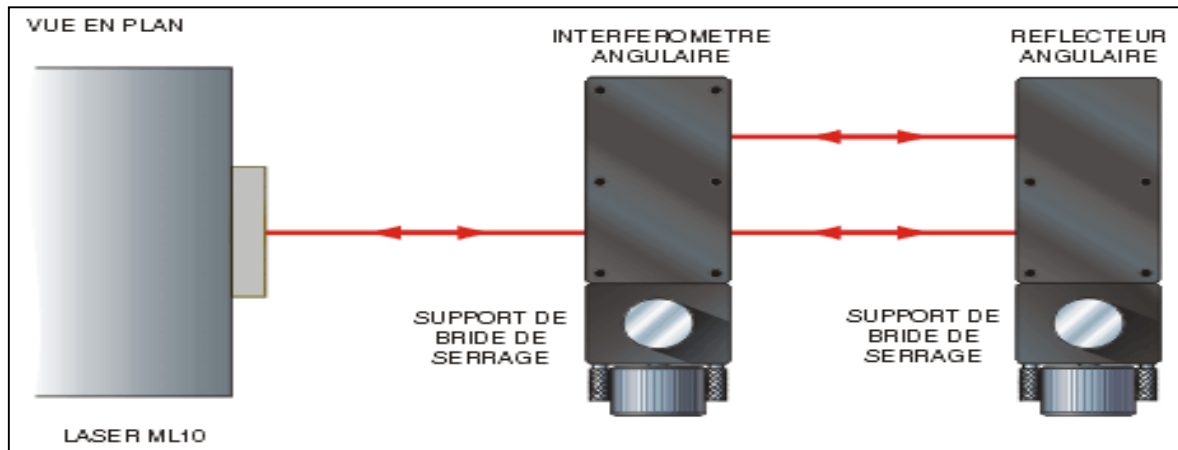


Figure IV-20 Montage de l'optique angulaire aux blocs de serrage et aux colonnes de montage.

Les colonnes de montage sont fixées à la machine au moyen de blocs de serrage aimantés et/ou de plaques d'appui en acier. Les composants optiques doivent être montés de façon que tout changement d'angle respecte précisément le changement d'angle de la machine à calibrer, et qu'une contamination par d'autres erreurs soit évitée.

Pour minimiser les erreurs de mesure, fixez l'optique directement aux points entre lesquels la mesure doit être effectuée. L'une des optiques est normalement fixée au support de pièce, l'autre optique étant fixée à l'outil ou au support de palpeur. Les mesures du laser reflètent alors correctement les erreurs qui se produisent entre la pièce à usiner et l'outil ou le palpeur. Même si les couvercles et protections rendent l'accès à la machine difficile, essayez toujours de fixer l'interféromètre et le rétro-réflecteur sur la machine. Essayez de disposer le laser et les optiques pour que l'interféromètre soit l'optique stationnaire. Ceci évite une induction d'erreurs par déplacement de l'interféromètre. Lors de la calibration d'un axe où la position de l'outil ou du palpeur change, le réflecteur doit être placé à la position de l'outil/du palpeur et l'interféromètre sur le lit de la machine ou sur la table tel qu'indiqué à la Figure IV-21.

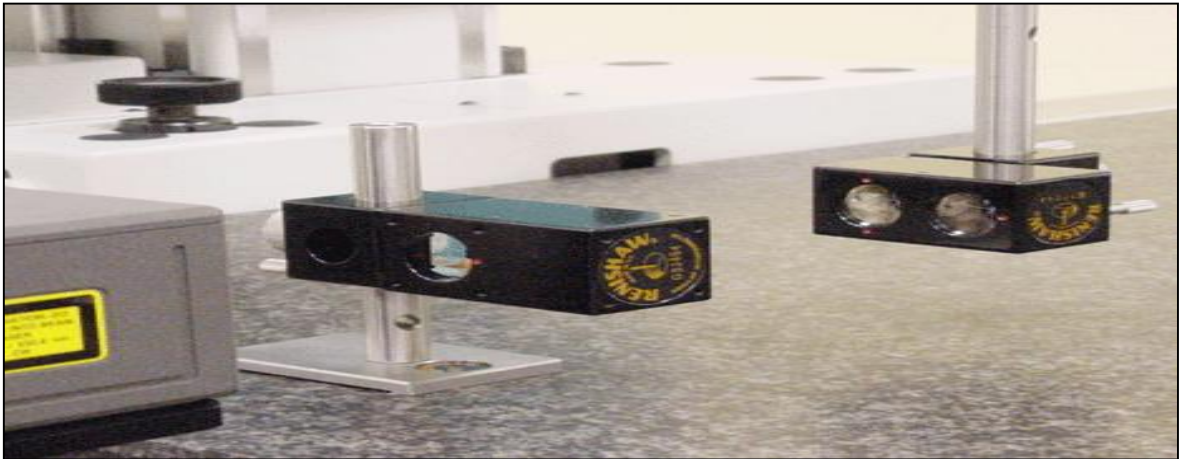


Figure IV-21 Optique angulaire montée sur machine à mesurer tridimensionnelle.

Pour la calibration d'un axe où le lit se déplace, l'interféromètre devrait être placé à la position de l'outil stationnaire et le réflecteur sur le lit tel qu'indiqué à la Figure IV-22.

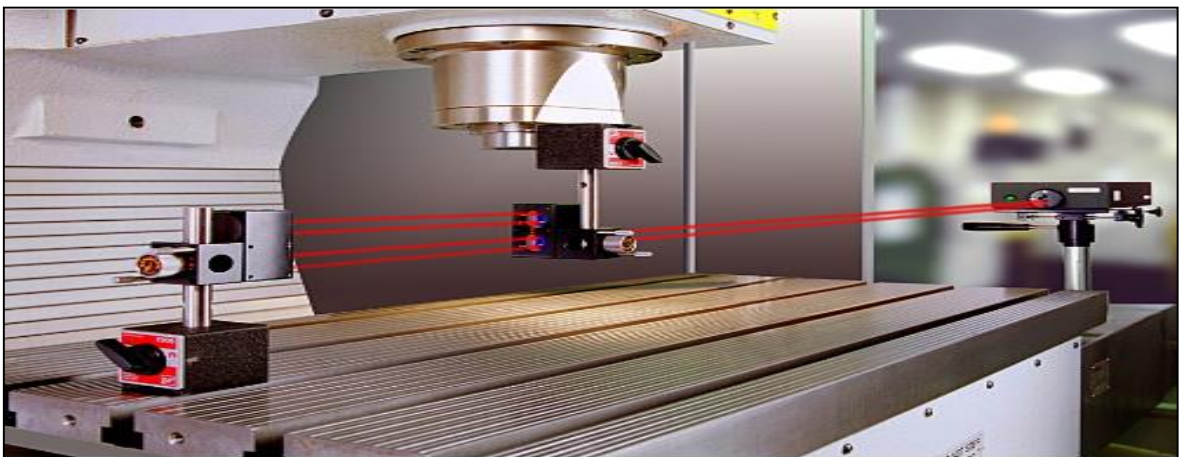


Figure IV-22 Mesure de tangage en axe X sur un centre d'usinage vertical à lit mobile.

IV-2-5 Configurations les optiques de mesure angulaire

Les optiques angulaires peuvent être installées suivant différentes configurations. La configuration utilisée dépendra de la mesure à effectuer (lacet ou tangage), du type de machine et de l'axe à calibrer. La plupart des configurations de mesures angulaires tombent dans l'une des figures suivantes :

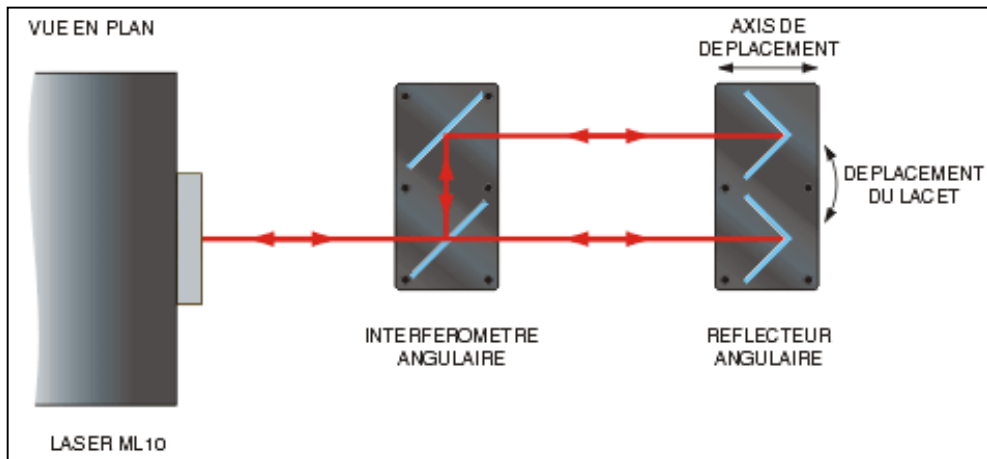


Figure IV-23 Mesure d'erreur de lacet - axe horizontal.

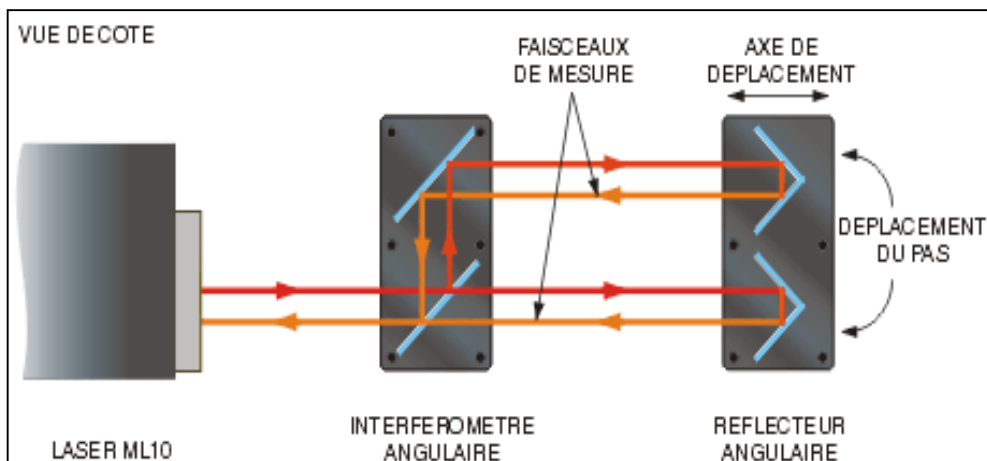


Figure IV-24 Mesure d'erreur de tangage - axe horizontal.

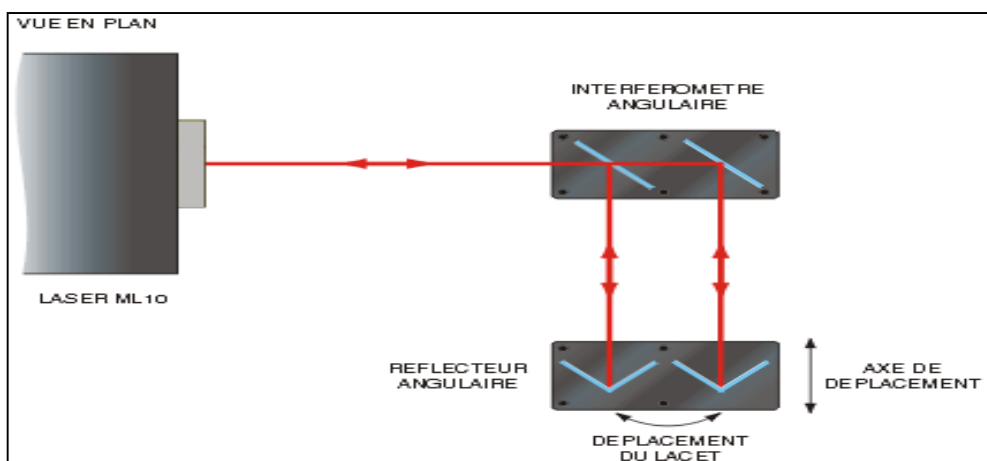


Figure IV-25 Mesure d'erreur de lacet - axe horizontal - à angle droit de la tête laser.

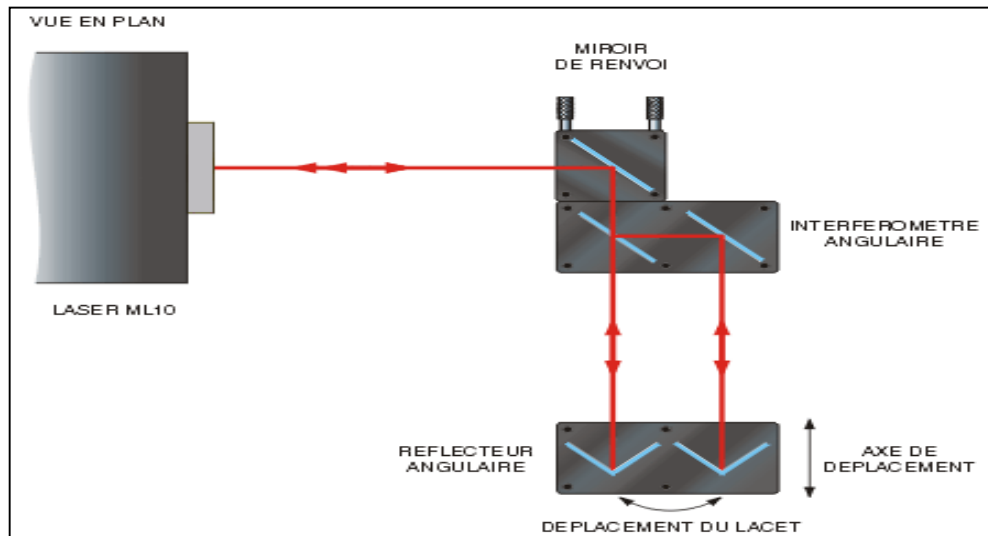


Figure IV-26 Mesure d'erreur de lacet à l'aide d'un miroir tournant fixe.

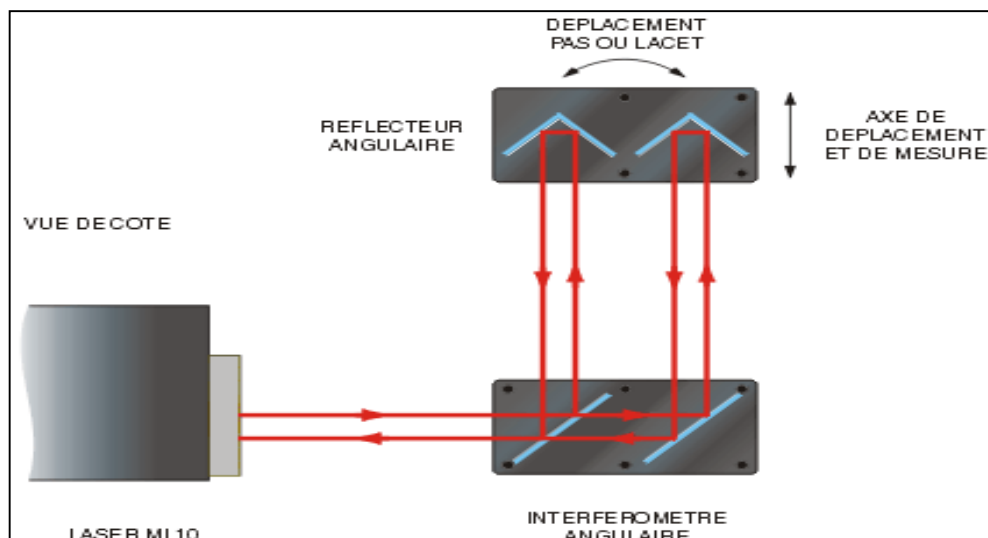


Figure IV-27 Mesure d'erreur de tangage ou de lacet - axe vertical.

IV-2-6 Procédure d'alignement de l'angle du faisceau

1. Fixez l'interféromètre angulaire et le réflecteur sur la machine.
2. Installez le laser XL sur le trépied et la plate-forme.
3. Tournez l'obturateur laser pour que le laser produise un faisceau à diamètre réduit conformément à la figure1. Un faisceau de diamètre réduit facilite la visualisation des éventuelles erreurs d'alignement.

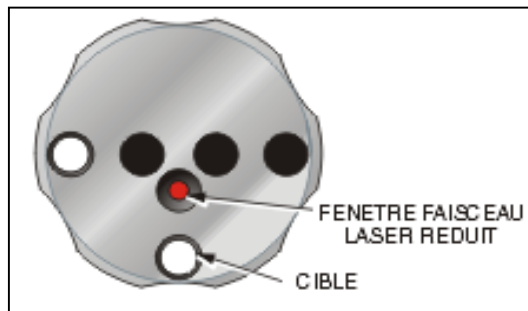


Figure 1.

4. Positionnez le réflecteur angulaire le plus près possible du laser, et vérifiez sa perpendicularité à la machine.
5. Mettez une cible à l'avant par le réflecteur dans l'ouverture avec deux points rouge tel qu'indiqué à la Figure2. La cible doit être orientée avec le point blanc au sommet. Effectuez une translation du laser ou de la machine jusqu'à ce que le faisceau tombe sur le point blanc sur la cible.

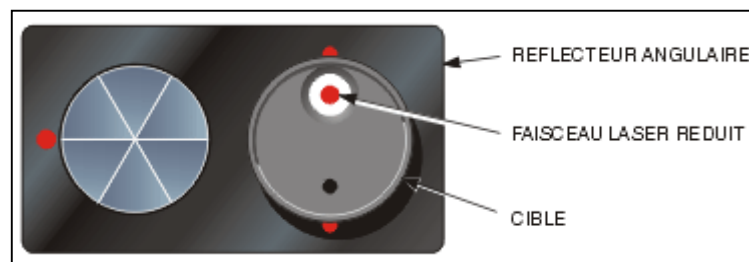


Figure 2.

6. Retirez la cible et assurez-vous 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, effectuez la translation du laser ou de la machine jusqu'à ce que le faisceau tombe sur le centre de la cible.

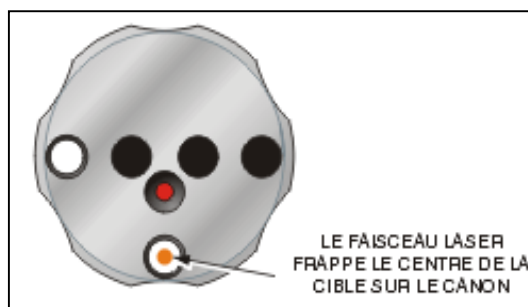


Figure 3.

7. Positionnez l'interféromètre le plus près possible du réflecteur. S'ils sont près l'un de l'autre, le reste de l'alignement peut être effectué en ajustant simplement la tête laser.

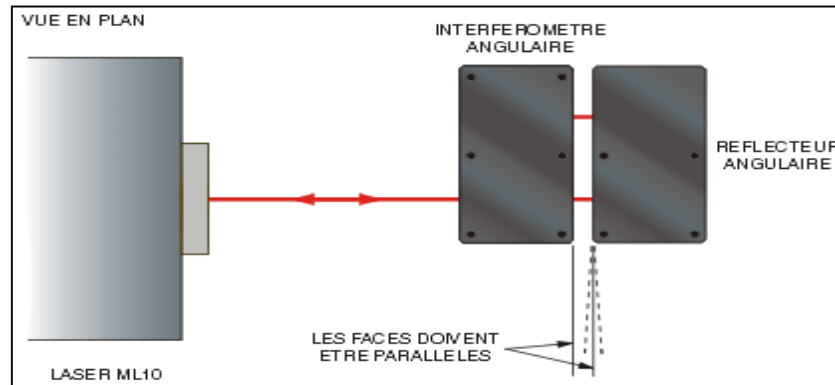


Figure 4.

8. Les faces extérieures de l'interféromètre et du réflecteur doivent être perpendiculaires à la machine et alignées entre elles. Une erreur d'alignement par roulis entre les deux optiques empêchera les deux faisceaux renvoyés de se chevaucher.
9. Installez une cible sur l'ouverture d'entrée de l'interféromètre, et effectuez la translation verticale et horizontale de l'interféromètre pour que le faisceau tombe sur la cible.

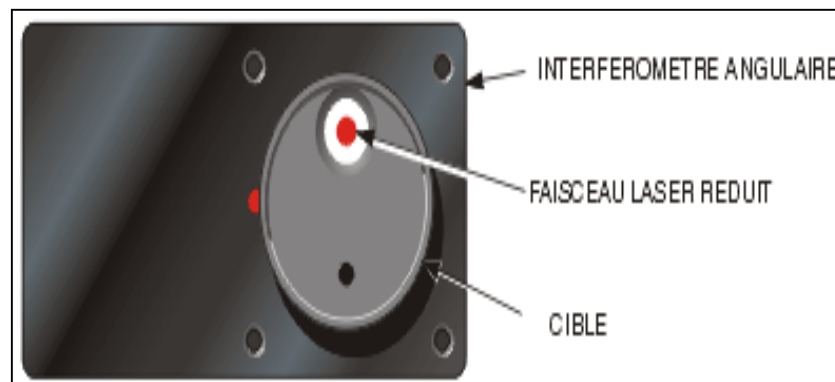


Figure 5.

10. Retirez la cible de l'interféromètre linéaire. Le faisceau laser sortant est désormais divisé en deux faisceaux de mesure dans l'interféromètre lesquels sont renvoyés à la cible sur l'obturateur du laser XL par le réflecteur angulaire, tel qu'indiqué à la Figure 6.

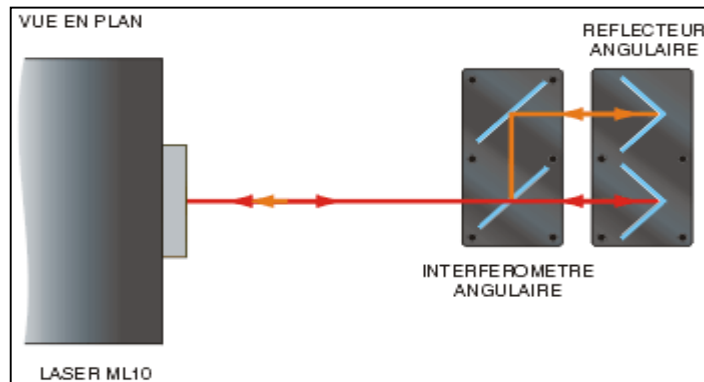


Figure 6.

11. Effectuez une translation verticale et une translation horizontale de la tête du laser XL pour que les deux faisceaux tombent sur le centre de la cible sur l'obturateur. Si les deux faisceaux renvoyés ne sont pas l'un sur l'autre, vérifiez l'alignement de roulis du réflecteur et de l'interféromètre. Remarque : Il peut être utile de bloquer l'un des faisceaux de mesure pour les distinguer l'un de l'autre.

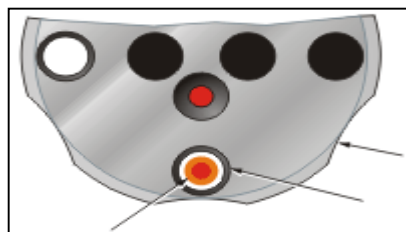


Figure 7.

12. Déplacez la machine sur une courte distance le long de l'axe calibré pour pouvoir installer la cible sur le réflecteur, la cible blanche étant au-dessus.

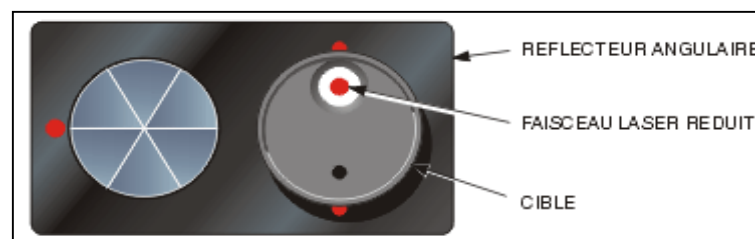


Figure 8.

13. Alignez le laser pour que le faisceau laser tombe sur le centre de la cible sur la longueur du parcours de l'axe.

14. Retirez la cible du réflecteur linéaire et, si nécessaire, effectuez une translation horizontale de la tête laser pour que les faisceaux renvoyés par l'interféromètre linéaire et le rétro-réfecteur tombent sur la ligne centrale horizontale de la cible de l'obturateur.

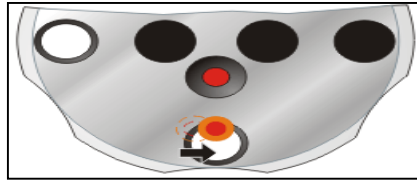


Figure 9.

15. Effectuez une translation verticale de la tête laser pour ramener le faisceau sur le centre de la cible tel qu'indiqué à la Figure10.

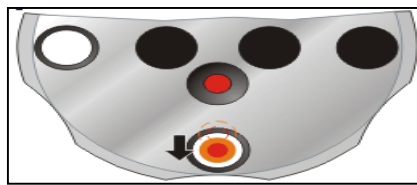


Figure 10.

16. Assurez-vous que les deux faisceaux renvoyés restent alignés au centre de la cible de l'obturateur sur tout le parcours de l'axe.
17. Le faisceau laser est désormais aligné sur l'axe du parcours. Mettez l'obturateur en position de mesure tel qu'indiqué à la figure11. Vérifiez la puissance du signal affichée dans le logiciel de saisie de données angulaires et en haut du laser XL-80 à mesure que le rétro-réfecteur est déplacé sur le parcours complet de la machine.

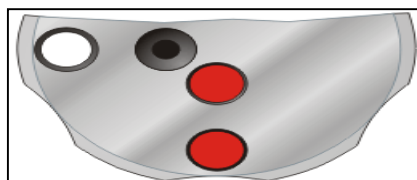


Figure 11.

18. Supprimez l'erreur d'obstruction de faisceau BEAM OBSTRUCT en prenant la référence du laser.

19. Bloquez l'un des faisceaux laser entre l'interféromètre et le réflecteur, et vérifiez si le voyant BEAM OBSTRUCT s'allume dans le logiciel de calibration.
20. Avant de saisir les données, vérifiez si le logiciel est correctement configuré.
21. Saisissez les données angulaires.

IV-2-7 Facteurs affectant la précision des mesures angulaires

Les facteurs suivants peuvent affecter la précision des mesures :

IV-2-7-1 Erreur d'alignement

Le réflecteur angulaire devrait être aligné perpendiculairement au faisceau incident et parallèlement à l'interféromètre angulaire lors de la prise de référence du système.

IV-2-7-2 Erreur d'optique angulaire

Les mesures angulaires sont obtenues à partir de la distance entre les deux rétro-réflecteurs dans le réflecteur angulaire. Le terme de précision de $\pm 0,6 \%$ dans les spécifications angulaires et les spécifications de planéité s'appuient sur la tolérance de la distance "centre à centre" entre les deux rétro-réflecteurs.

La distance de séparation dépendra aussi de la dilatation thermique de l'interféromètre angulaire et des logements des réflecteurs angulaires. Ceci a été pris en compte en partie dans la spécification du système, mais il est conseillé de minimiser les variations de température en évitant une manipulation excessive des composants optiques et en faisant en sorte que le composant optique non-stationnaire ne soit pas déplacé au-dessus de surfaces chauffées ou refroidies ou qu'il traverse des masses d'air chauffées ou refroidies.

IV-2-7-3 Calcul arc-sinus

Le système tire ses mesures angulaires de l'approximation des petits angles. À mesure que l'angle augmente, cette approximation devient de plus en plus inexacte.

Angle θ			Valeurs d'affichage avec calcul arc-sinus ? DÉSACTIVÉ		% Erreur
Degrés	sec. d'arc	mrad	sec. d'arc	mrad	
0.5°	1799.98	8.727	1800	8.727	0.0013
1.0°	3599.82	17.452	3600	17.453	0.005
1.5°	5399.38	26.177	5400	26.180	0.011
2.0°	7198.54	34.899	7200	34.907	0.020
2.5°	8997.14	43.619	9000	43.633	0.032
3.0°	10795.07	52.336	10800	52.360	0.046
3.5°	12592.17	61.048	12600	61.087	0.062
4.0°	14388.31	69.756	14400	69.813	0.081
4.5°	16183.35	78.459	16200	78.540	0.103
5.0°	17977.16	87.156	18000	87.266	0.127
5.5°	19769.61	95.846	19800	95.993	0.154
6.0°	21560.54	104.528	21600	104.720	0.183
6.5°	23349.84	113.203	23400	113.446	0.214
7.0°	25137.35	121.869	25200	122.173	0.249
7.5°	26922.96	130.526	27000	130.900	0.285
8.0°	28706.51	139.173	28800	139.626	0.325
8.5°	30487.88	147.809	30600	148.353	0.366
9.0°	32266.92	156.434	32400	157.080	0.411
9.5°	34043.51	165.048	34200	165.806	0.458
10.0°	35817.51	173.648	36000	174.533	0.507
11.0°	39357.18	190.809	39600	191.986	0.613
12.0°	42884.86	207.912	43200	209.440	0.730

Figure IV-28 Tableau des Erreurs Sin theta.

Remarque : Les valeurs dans le tableau qui précède ne comprennent pas le terme d'erreur d'optique angulaire de $\pm 0,6 \%$.

En mesurant des angles supérieurs à $\pm 1^\circ$, laissez la fonction de calcul Sinus d'arc obtenir une mesure de lecture angulaire plus précise. Désactivez (Calc. sinus d'arc) pour les mesures de petits angles, les mesures de tangage et de lacet, par exemple.

L'approximation de petit angle est :

$$\phi \approx \sin \phi = \frac{D}{S}$$

D : représente en temps réel la différence de longueur des deux faisceaux qui constituent les deux bras de l'interféromètre.

S : est la séparation nominale connue du couple de rétro-rélecteurs dans le réflecteur angulaire.

IV-2-8 Positionnement de l'optique pour minimiser les erreurs de mesure

- Fixez les éléments optiques directement aux points intéressants
- Fixez les éléments optiques de façon rigide
- Rassemblez les éléments optiques à une extrémité du parcours de l'axe
- Évitez les sources thermiques localisées
- Utilisez des miroirs tournants
- Fluage mécanique et thermique

IV-2-9 Spécification

Mesure angulaire		Métrique
Gamme axiale		0 à 15 m
Plage de mesure angulaire		± 175 mm/m
Précision angulaire	Optique angulaire haute précision	± 0,2% ± 0,5 ± 0,1M μm/m
	Optique angulaire à précision standard	± 0,6% ± 0,5 ± 0,1M μm/m
Résolution		0,1 μm/m
<i>Où :</i> <i>M = distance de mesure en mètres</i> <i>F = distance de mesure en pieds</i> <i>% = pourcentage d'angle calculé</i>		

Figure IV-29 Tableau de Spécification de la mesure angulaire.

CHAPITRE V

Partie expérimentale

Analyse des résultats de :

Okafor et Ertekin

(Université de Missouri-Rolla, USA)

CHAPITRE V PARTIE EXPERIMENTALE [17]

V-1 Les erreurs de position linéaires

Cette partie présente les résultats d'une caractérisation de précision d'un centre d'usinage vertical (VMC) sous la forme d'erreurs linéaires et variation de température, en utilisant le système laser avec unité de contrôle de l'environnement. La machine étudiée est un centre d'usinage à trois axes VMC Cincinnati Milacron Sabre 750 (Figure V-1) avec un contrôleur d'architecture ouverte Acramatic2100.



Figure V-1 Milacron Sabre 750.

V-1-1 Procédures expérimentales

Les données requises pour l'estimation et la compensation des erreurs paramétriques de la machine-outil nécessitent le développement d'une base de données empirique qui combine la position commandée et la position absolue de la machine-outil, l'état thermique de la machine et les conditions environnementales. La position commandée de la machine est la position de l'axe nominal, qui est déterminée par le programme de la 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 commandé par un ordinateur.

L'état thermique de la machine-outil est les conditions environnementales sont lues par des capteurs situés sur la machine. Un schéma de la machine Sabre 750 et les emplacements des détecteurs de la température sont illustrés à la (figure V-2).

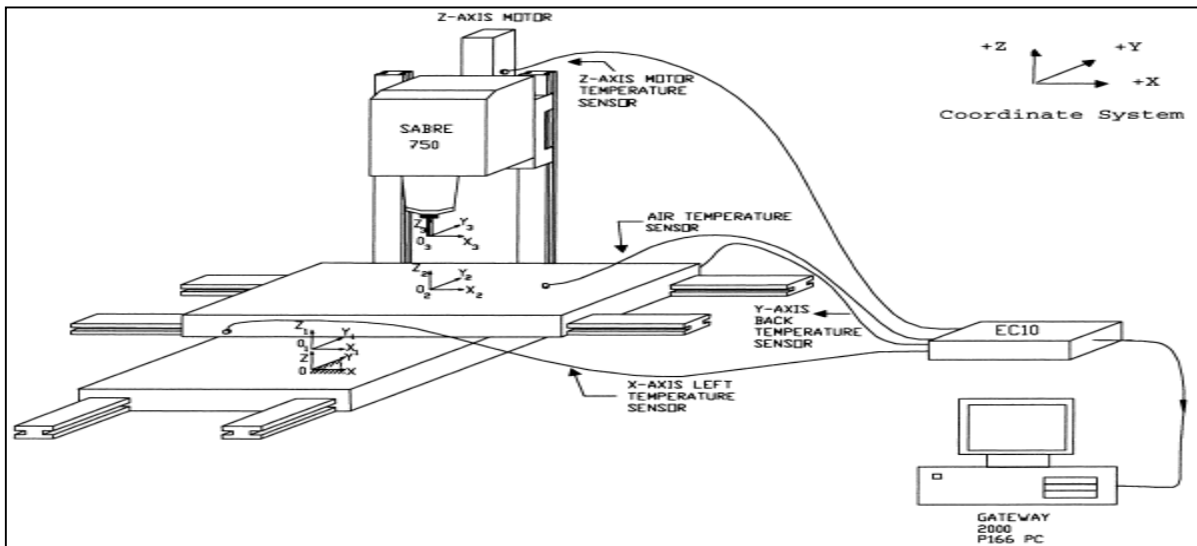


Figure V-2 Schéma de l'emplacement des capteurs de température sur la machine Sabre 750 [okafor].

Trois capteurs pour mesurer la dilatation thermique du matériau ont été magnétiquement fixés sur les guides de l'axe X (côté gauche), de l'axe Y (arrière) et sur le carter du moteur de l'axe Z, respectivement. En plus des trois capteurs de température du matériau, un capteur de température de l'air a été fixé magnétiquement à la table de la machine ainsi que des capteurs de pression et d'humidité de l'air ont été aussi utilisés pour surveiller les effets sur l'environnement.

Un schéma de configuration d'interféromètre laser pour mesurer les erreurs de déplacement linéaire est donné à la (Figure V-3).

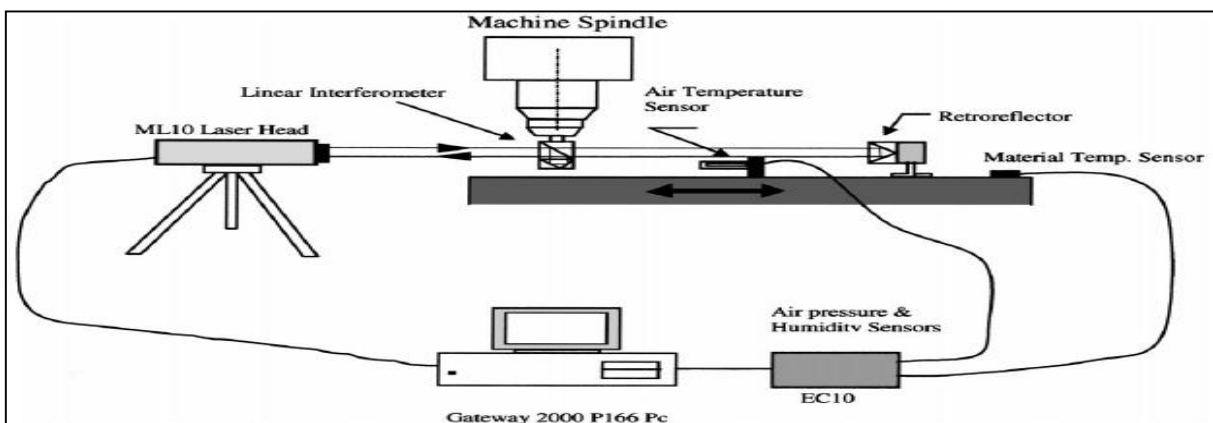


Figure V-3 Schéma d'interféromètre laser pour mesurer les erreurs de déplacement linéaire [Okafor].

Avant de commencer les tests et pour simuler un processus de coupe réelle, une période d'échauffement a été réalisée. Pour cela, la machine CNC a été programmée pour se déplacer dans les trois axes simultanément avec une vitesse d'avance programmée de 7620 mm/min sans rotation de la broche pendant environ 1 heure. Pendant le cycle d'échauffement, les trois capteurs de la température du matériau mesurent la distribution de température de la structure de la machine-outil.

Après l'échauffement de la machine, un programme en code G a été utilisé pour déplacer la machine d'une position à une autre selon la course disponible, faisant une pause pendant quelques secondes à chaque position. Des mesures sont prises pendant chaque pause le long de l'axe sous essai (f). Quand le point final est atteint, le programme CNC renverse la direction de la course de machine (r), puis arrête à chaque point de mesure pour permettre au programme laser de lire les données de la direction opposée. Quand le point initial est atteint, la première course est accomplie. La machine doit alors dépasser le premier point de mesure pour commencer la prochaine course. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les courses aient été accomplies (figure V- 4).

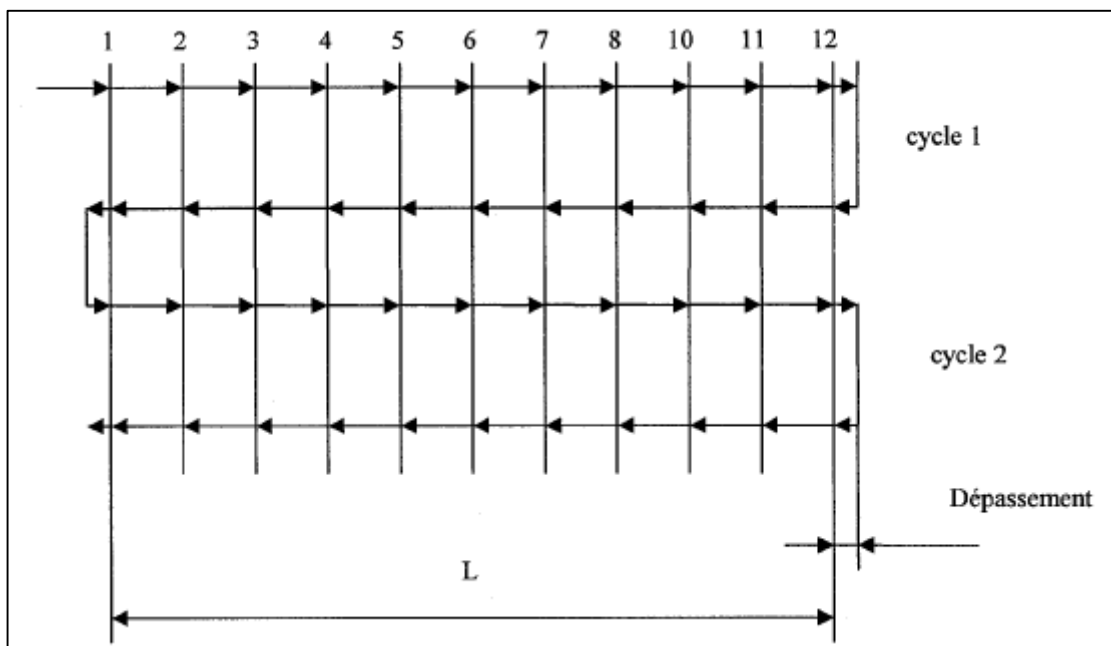


Figure V-4 Schéma des déplacements de la table avec distance de dépassement.

Le cycle d'échauffement et le cycle d'essai de mesure d'erreur ont été répétés pour une période de 8 h. Le programme de cycle d'échauffement et de mesure pour l'axe Y est présenté dans la Figure V-5.

N0010T11M6G90G70				
N0020G1X0Y0Z0F100	N0380G4 F4	N0740G4 F4	N1100G4 F4	N1460G4 F4
N0030(DFS, "WARM")	N0390Y7.7500	N0750Y16.7500	N1110Y11.7500	N1470Y2.7500
N0040G1X28.5Y20Z18.5F300	N0400G4 F4	N0760G4 F4	N1120G4 F4	N1480G4 F4
N0050X0Y0Z0	N0410Y8.2500	N0770Y17.2500	N1130Y11.2500	N1490Y2.2500
N0060(ENS)	N0420G4 F4	N0780G4 F4	N1140G4 F4	N1500G4 F4
N0070 (DFS, "YLASER")	N0430Y8.7500	N0790Y17.7500	N1150Y10.7500	N1510Y1.7500
N0080G0X0.Y0.Z0.	N0440G4 F4	N0800G4 F4	N1160G4 F4	N1520G4 F4
N0090Y0.2500	N0450Y9.2500	N0810Y18.2500	N1170Y10.2500	N1530Y1.2500
N0100G4 F4	N0460G4 F4	N0820G4 F4	N1180G4 F4	N1540G4 F4
N0110Y0.7500	N0470Y9.7500	N0830Y18.5000	N1190Y9.7500	N1550Y0.7500
N0120G4 F4	N0480G4 F4	N0840G4 F4	N1200G4 F4	N1560G4 F4
N0130Y1.2500	N0490Y10.2500	N0850Y18.2500	N1210Y9.2500	N1570Y0.2500
N0140G4 F4	N0500G4 F4	N0860G4 F4	N1220G4 F4	N1580G4 F4
N0150Y1.7500	N0510Y10.7500	N0870Y17.7500	N1230Y8.7500	N1590Y0.
N0160G4 F4	N0520G4 F4	N0880G4 F4	N1240G4 F4	N1600 (ENS)
N0170Y2.2500	N0530Y11.2500	N0890Y17.2500	N1250Y8.2500	N1610 (DFS, "MAIN")
N0180G4 F4	N0540G4 F4	N0900G4 F4	N1260G4 F4	N1620 (CLS, "YLASER", 1)
N0190Y2.7500	N0550Y11.7500	N0910Y16.7500	N1270Y7.7500	N1630(CLS, "WARM", 220)
N0200G4 F4	N0560G4 F4	N0920G4 F4	N1280G4 F4	N1640 G4 F120
N0210Y3.2500	N0570Y12.2500	N0930Y16.2500	N1290Y7.2500	N1650 (ENS)
N0220G4 F4	N0580G4 F4	N0940G4 F4	N1300G4 F4	N1660 (CLS, "MAIN", 8)
N0230Y3.7500	N0590Y12.7500	N0950Y15.7500	N1310Y6.7500	N1670M2
N0240G4 F4	N0600G4 F4	N0960G4 F4	N1320G4 F4	
N0250Y4.2500	N0610Y13.2500	N0970Y15.2500	N1330Y6.2500	
N0260G4 F4	N0620G4 F4	N0980G4 F4	N1340G4 F4	
N0270Y4.7500	N0630Y13.7500	N0990Y14.7500	N1350Y5.7500	
N0280G4 F4	N0640G4 F4	N1000G4 F4	N1360G4 F4	
N0290Y5.2500	N0650Y14.2500	N1010Y14.2500	N1370Y5.2500	
N0300G4 F4	N0660G4 F4	N1020G4 F4	N1380G4 F4	
N0310Y5.7500	N0670Y14.7500	N1030Y13.7500	N1390Y4.7500	
N0320G4 F4	N0680G4 F4	N1040G4 F4	N1400G4 F4	
N0330Y6.2500	N0690Y15.2500	N1050Y13.2500	N1410Y4.2500	
N0340G4 F4	N0700G4 F4	N1060G4 F4	N1420G4 F4	
N0350Y6.7500	N0710Y15.7500	N1070Y12.7500	N1430Y3.7500	
N0360G4 F4	N0720G4 F4	N1080G4 F4	N1440G4 F4	
N0370Y7.2500	N0730Y16.2500	N1090Y12.2500	N1450Y3.2500	

Figure V-5 Programme CNC l'axe Y [Okafor].

V-1-2 Résultats expérimentaux

Théoriquement, les 21 composantes d'erreur paramétriques sont tous soumis à des effets thermiques. En pratique, Chaque machine a ses propres problèmes thermiques spéciaux en fonction de sa configuration et sa construction. Donc, une étude préliminaire de la façon dont la structure de la machine répond à la hausse des températures est nécessaire. Pour découvrir les sources d'erreurs thermiques importantes et identifier les endroits les plus sensibles du capteur de température, la machine a été programmée pour se déplacer dans les trois axes simultanément.

La Figure V-6 montre que les gradients de température les plus élevées sont obtenus en localisant les capteurs de température sur les guide de l'axe X (côté gauche), les guides de l'axe Y (face arrière) et le carter d'entraînement du moteur sur l'axe Z.

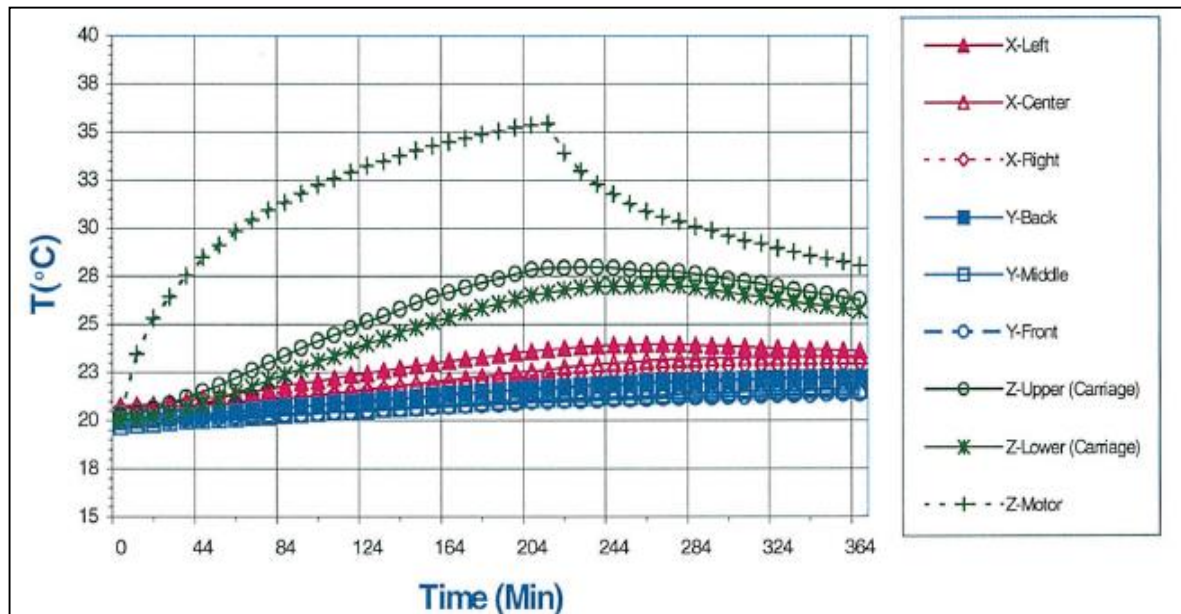


Figure V-6 Distribution de la température pour les axes X, Y et Z.

Le même type de test a été répété pour vérifier la même conclusion (figure V-7).

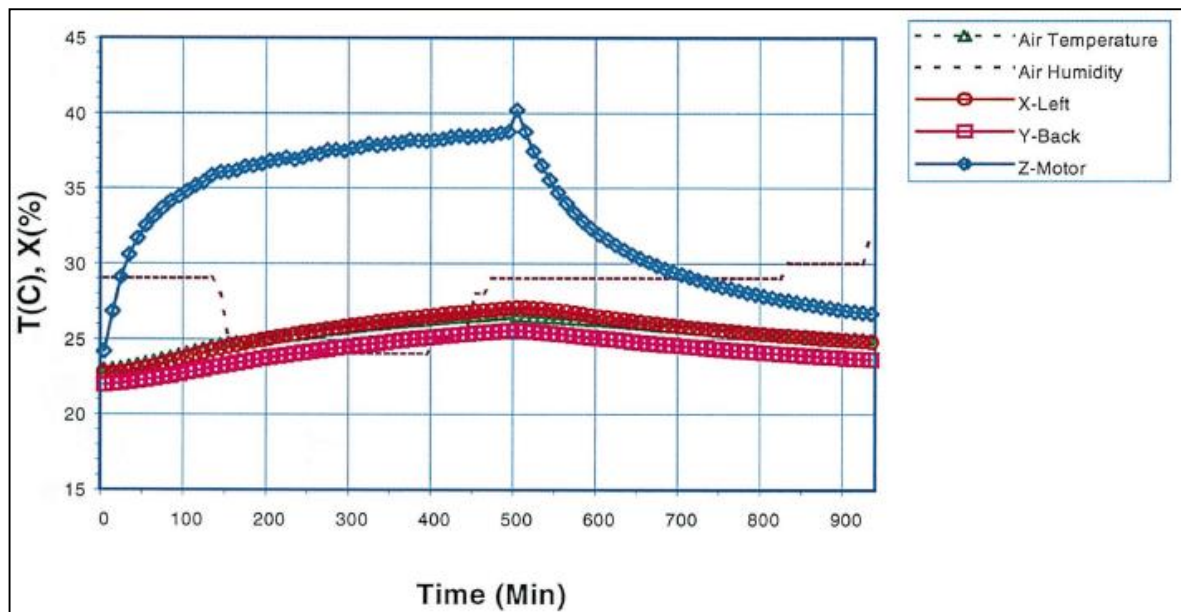


Figure V-7 La réponse Finale de la température et de l'humidité de l'air.

Plus les capteurs de température sont proches au moteur d'entraînement d'axe plus les lectures de température sont plus élevés. Par conséquent, les axes de moteurs d'entraînement sont identifiés comme la source de chaleur principale pour la machine testée.

V-1-2-1 Erreur de L'axe X

La courbe des erreurs de déplacement linéaire de l'axe X est montrée à la Figure V-8. Dans la légende du graphe d'erreur, les erreurs (0-f) et (0-r) indique que les erreurs ont été mesurées lorsque la machine était dans un état froid (0 heures de fonctionnement) pour la direction aller (f) et la direction retour (R), respectivement. Les tracés d'erreurs indiquent que les erreurs de position sont généralement plus faibles au début de déplacement d'axe (position d'origine) et tendent à s'accroître linéairement. Avec l'augmentation de la position nominale de l'axe.

On a constaté malgré que les erreurs de déplacement linéaire du coulisseau d'axe X varie avec la température (fonctionnement de la machine heure), leurs profils de base le long de l'axe n'a pas changé de manière drastique.

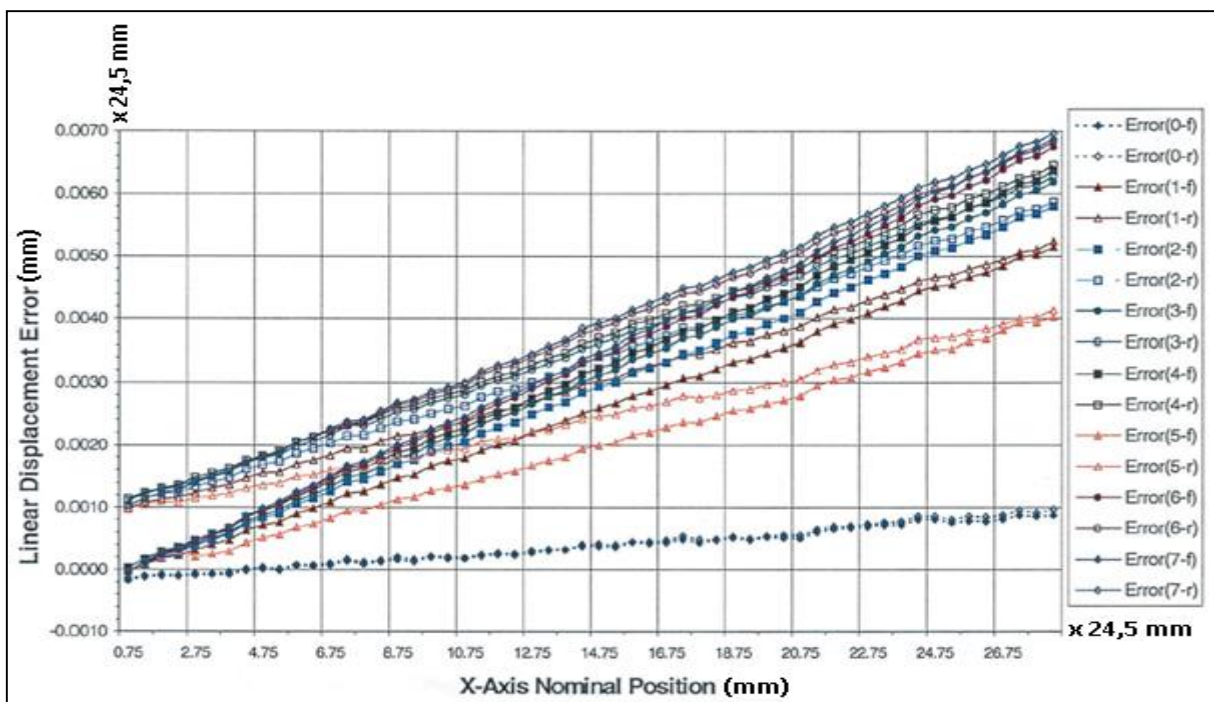


Figure V-8 Erreur de déplacement linéaire pour l'axe X.

Les résultats d'Okafor présentés dans la figure V-8 montrent que l'ampleur des erreurs augmente progressivement en fonction de l'échauffement de la machine. Dans les conditions de démarrage à froid, seul les erreurs stationnaires de type géométriques existent et affectent la précision de la machine testée. Pendant le cycle d'échauffement, une pente induite par la chaleur est ajoutée aux erreurs géométriques. Lorsque la machine est en état froid, l'erreur maximale de déplacement linéaire est de l'ordre de 0,0254 mm. Après 1 h d'échauffement,

l'erreur soulève immédiatement à 0,127 mm. Le jeu d'inversion (backlash) maximale est d'environ 0 mm. Lorsque la machine est en état froid et après 1 h d'échauffement, le jeu d'inversion augmente légèrement jusqu'à atteindre 0,0254 mm, et reste constante tout au long de l'essai. L'erreur de déplacement linéaire maximale de l'axe X est survenue après 7 h de test, sa grandeur d'erreur était d'environ 0,1778 mm.

V-1-2-2 Erreur de l'axe Y

L'erreur de déplacement linéaire de l'axe Y (Figure V-9) montre une tendance linéaire similaire à celle de l'axe X.

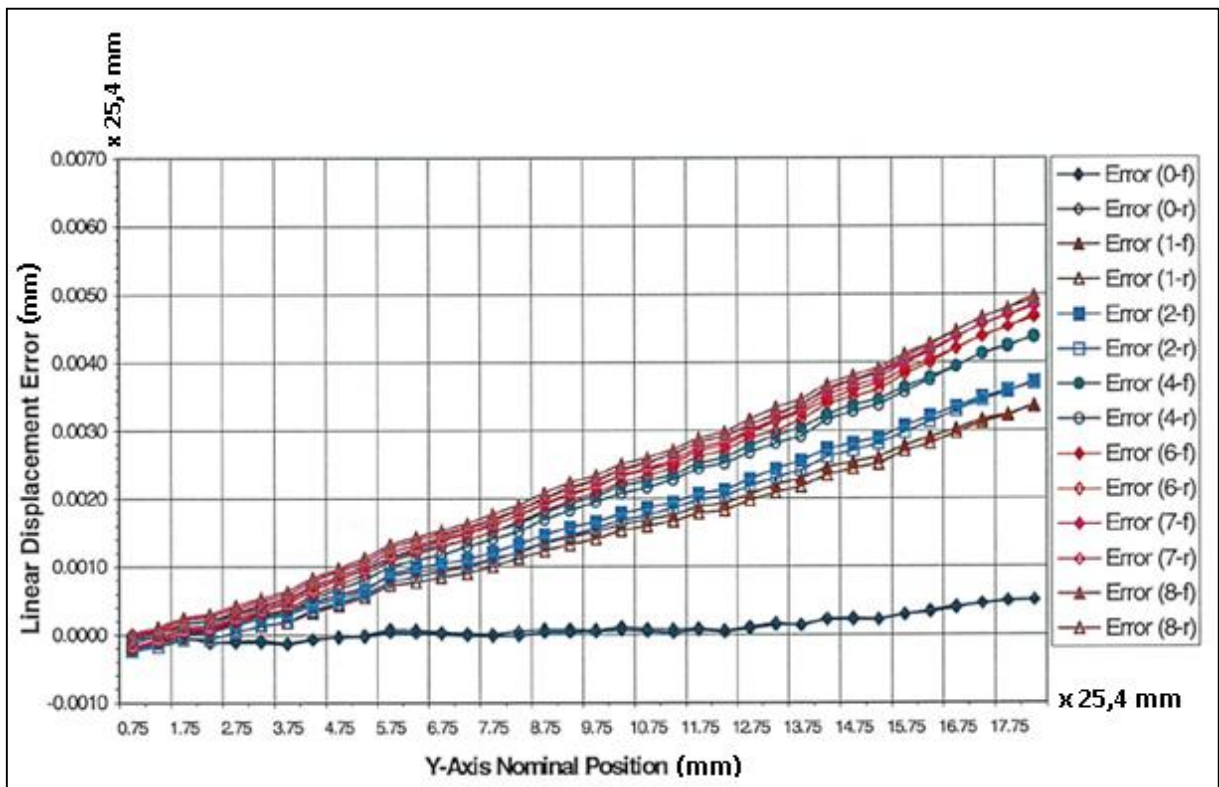


Figure V-9 Erreur d'axe Y de déplacement linéaire.

Les profils de base des courbes d'erreur le long du déplacement de l'axe n'ont pas changé de manière drastique. Cependant, l'amplitude des erreurs est plus petite en comparaison avec les résultats de l'axe X. L'erreur de déplacement était plus faible lorsque la machine est en état froid et augmenté avec l'échauffement de la machine. L'erreur du jeu d'inversion de l'axe Y est la plus petite parmi les trois axes testés, son amplitude est à peu près constante tout au long des essais. Après 8h de travail, l'erreur maximale de déplacement linéaire obtenue était de l'ordre de 0,127 mm, et était légèrement inférieure à celle de l'axe X.

V-1-2-3 Erreur de L'axe Z

Les erreurs linéaires de déplacement de l'axe Z sont représentées à la Figure (V-10). La courbe d'erreur montrent une même tendance linéaire avec les axes X et Y. La pente de la ligne d'erreur est plus petite lorsque la machine est en état froid et augmente au fur et à mesure que la machine réchauffe progressivement. La valeur maximale de l'erreur a été enregistrée à la fin du test, elle est de l'ordre de 0,13716 mm. Le jeu d'inversion de l'axe Z a été trouvé légèrement supérieur à celui de l'axe Y et inférieur à celui de l'axe X.

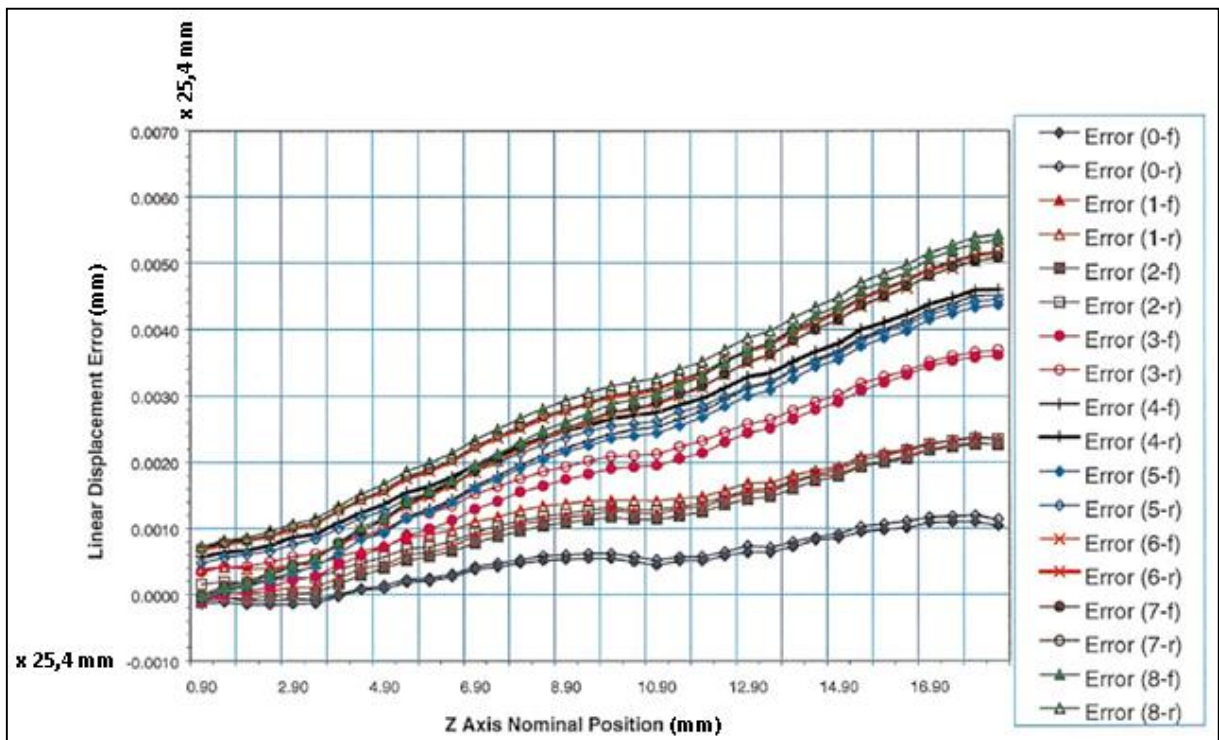


Figure V-10 Erreur de déplacement linéaire de l'axe Z.

La Figure V-11 résume la précision de déplacement linéaire (LDA) et les jeux d'inversion maximale (MRE) pour les trois axes testés. Les résultats montrent que l'axe X avait la pire précision le pire jeu d'inversion suivi par l'axe Z.

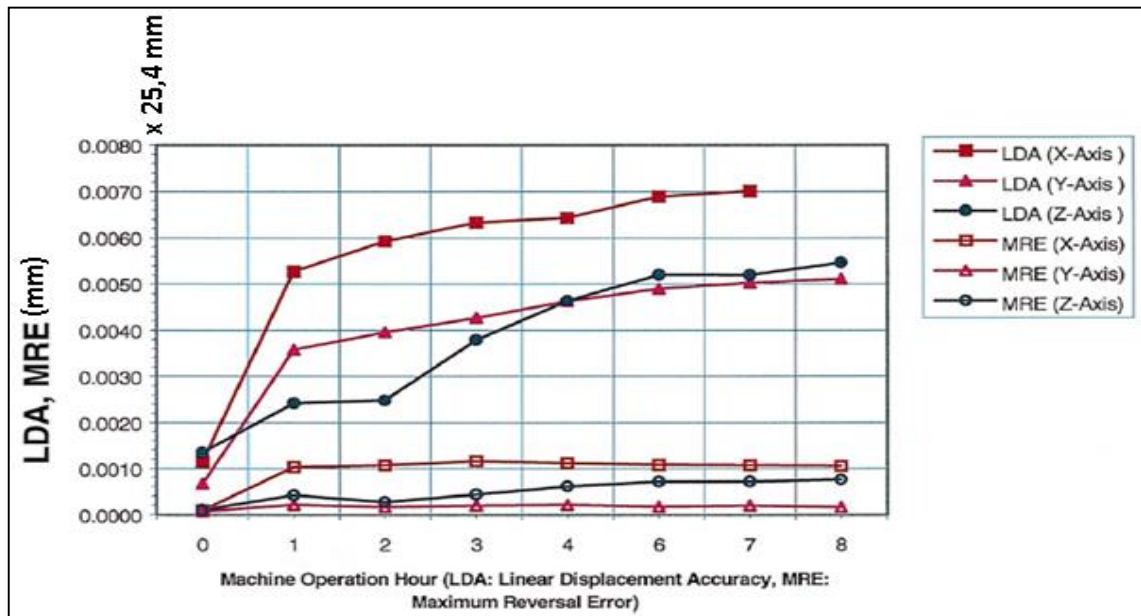


Figure V-11 Précision du déplacement linéaire et jeu d'inversion max (ASME B5.54).

V-1-2-4 Variations de la température avec la pression d'air et la variation relative de l'humidité pour les axes X, Y, Z.

La variation de Température de la machine pendant les mesures linéaires pour les axes X, Y et Z sont représentés sur la figure. V-12, V-13 et V- 14, respectivement.

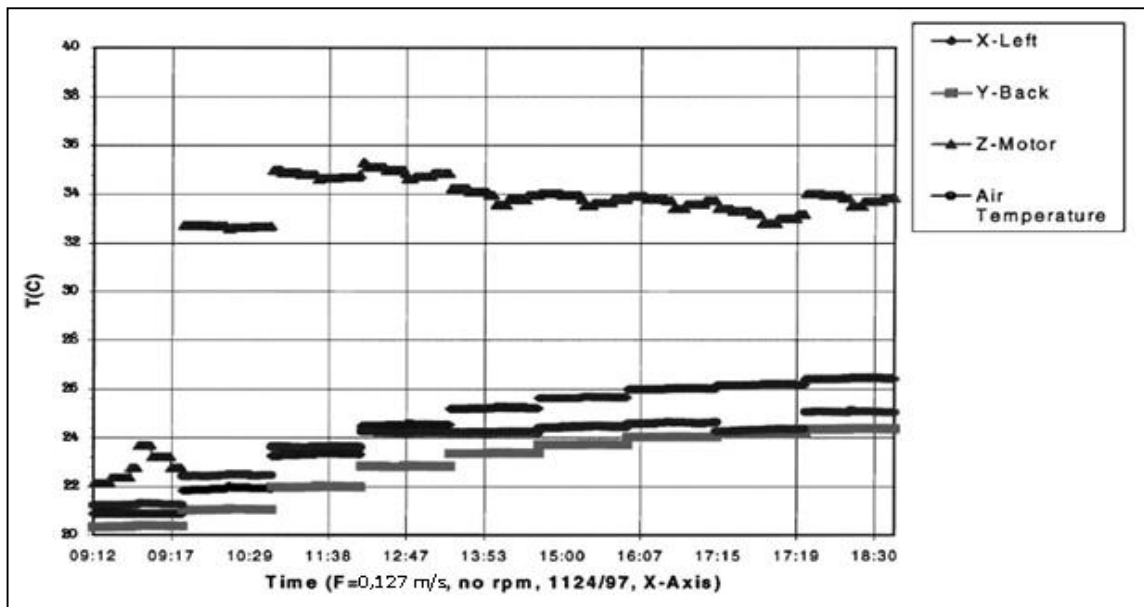


Figure V-12 Variation de la température pour l'axe X.

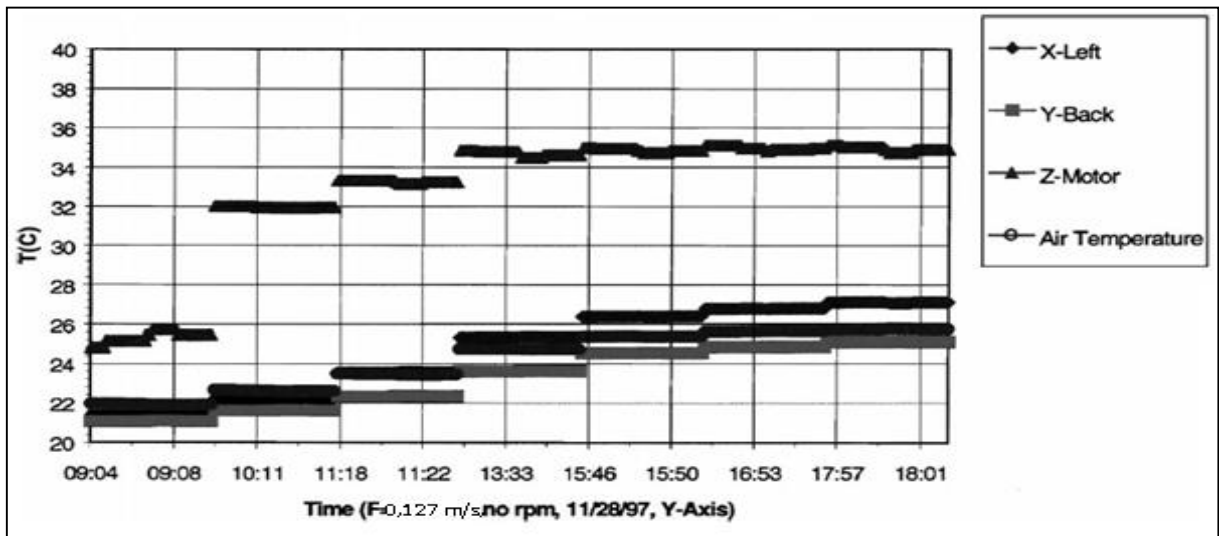


Figure V-13 Variation de la température pour l'axe Y.

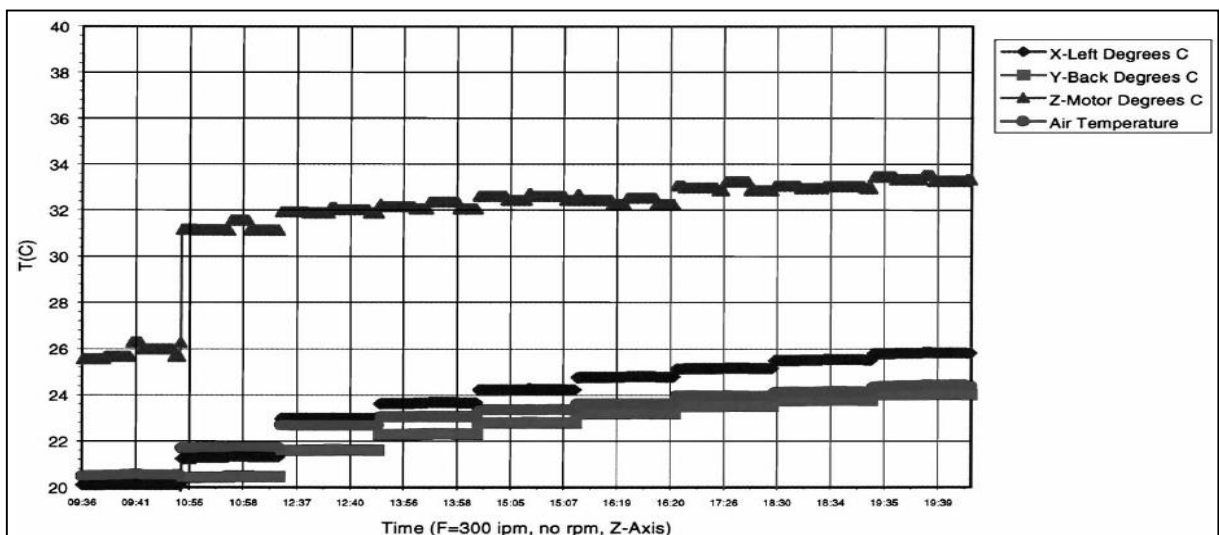


Figure V-14 Variation de la température pour l'axe Z.

Toutes les courbes de température indiquent des tendances similaires. Généralement, les capteurs de température placée à côté du moteur de l'axe Z enregistre la température la plus élevée suivie par les lectures des capteurs des axes X et Y, respectivement. Les Figures. V-15, V-16 et V-17 indiquent la pression de l'air et la variation de l'humidité de l'air pendant les mesures des erreurs. Les trois courbes montrent que la pression de l'air est restée stable durant les tests.

L'approche de modèle empirique, qui antérieure calibré. La relation entre les erreurs géométriques et thermiques (températures) mesurées en relation avec des données de position

d'axe est utilisée pour prédire et à compenser les erreurs de machines-outils géométriques et thermiques.

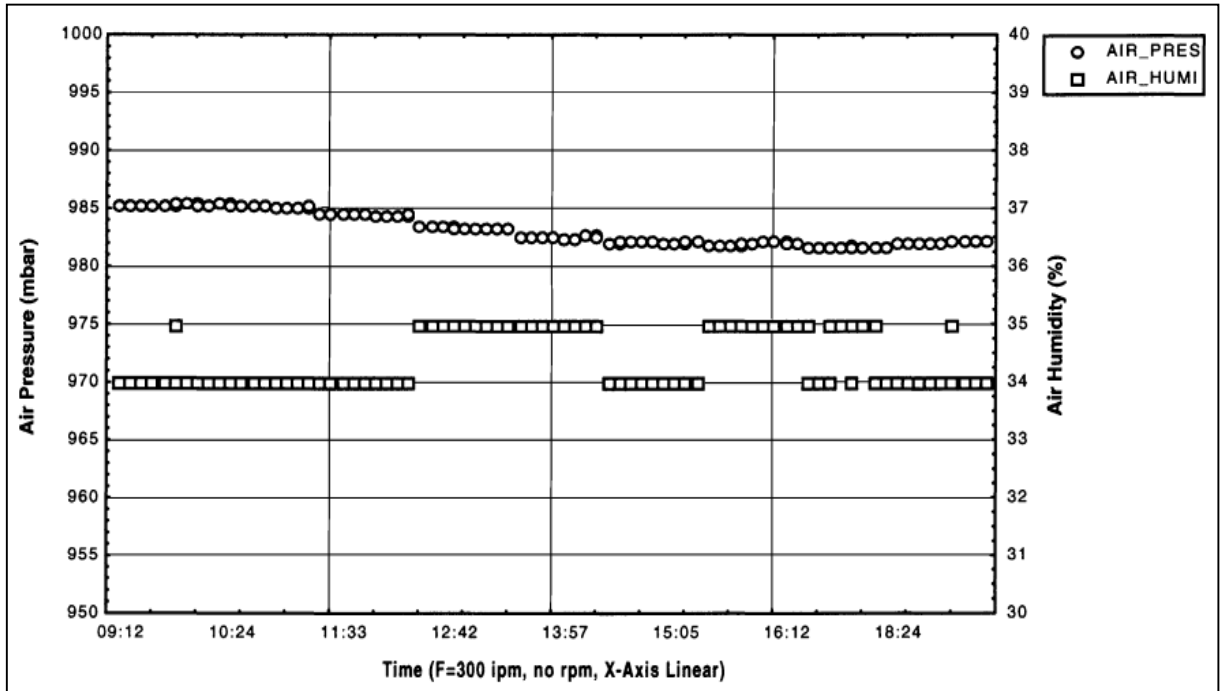


Figure V-15 Pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe X.

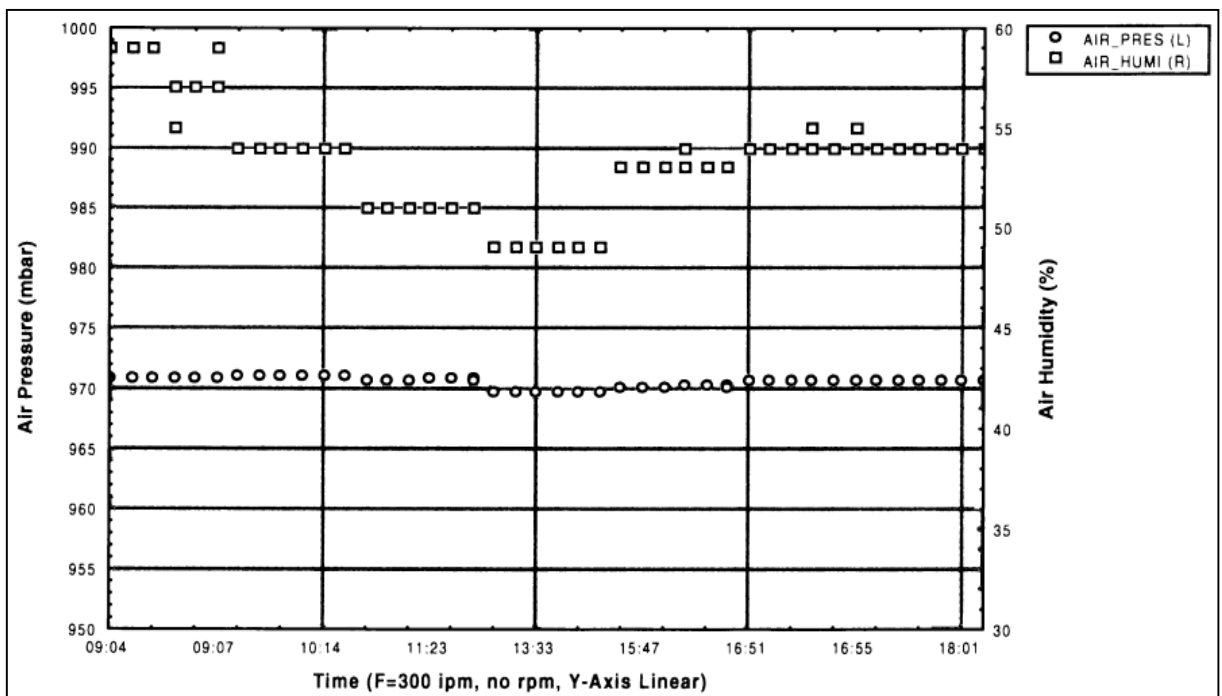


Figure V-16 Pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe Y.

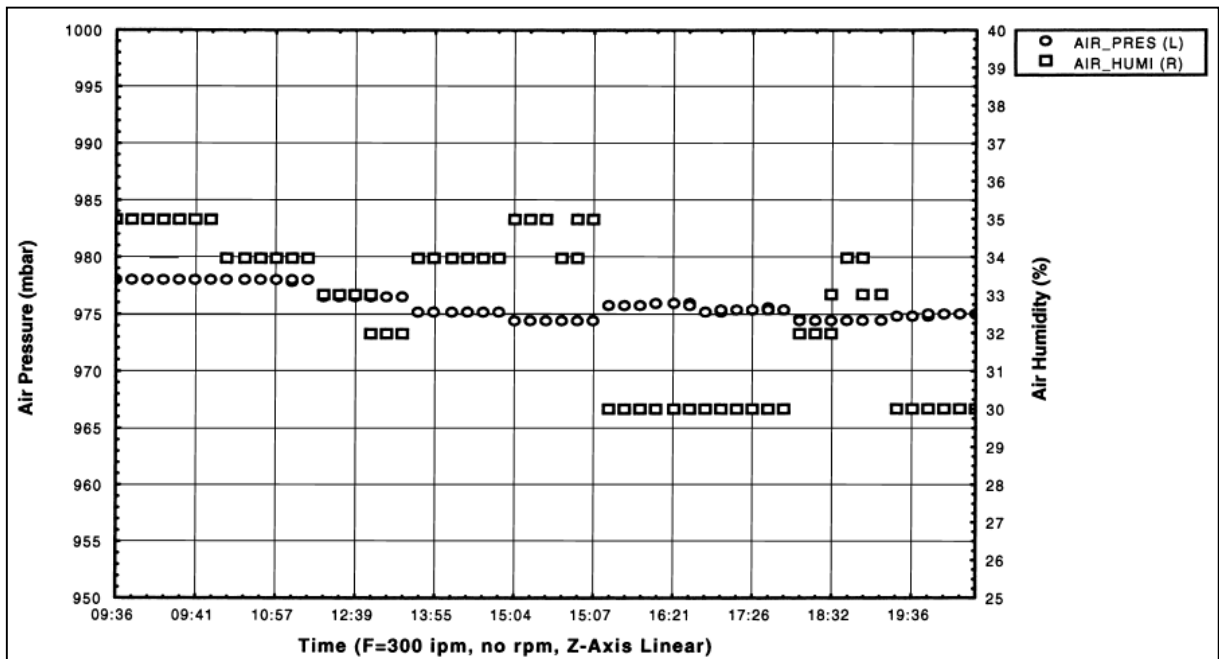


Figure V-17 Pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe Z.

V-2 Les erreurs angulaires

Cette partie présente l'analyse des résultats des mesures des erreurs angulaires (tangage et lacet) et la variation de température durant ces mesures pour les trois axes de la même machine.

V-2-1 Résultats de l'axe X

a) Erreur de tangage de l'axe X

L'erreur de tangage de l'axe X est donnée à la figure V-18. Comme indiqué à la légende, les erreurs de tangage 0-f et 0-r sont mesurés lorsque la machine était à l'état froid (0), direction allé(f) et direction retour (R), respectivement. Il est à noter que les erreurs de tangage de l'axe X sont toutes de nature sinusoïdale avec une longueur d'onde approximative de 101.6mm. Ceci peut être expliqué par le fait que le diamètre de la vis à billes pour l'axe X est de 31,8 mm, avec un pas de 12 mm, et dans une révolution, un point sur la vis à billes parcourt une distance de 99,9 mm.

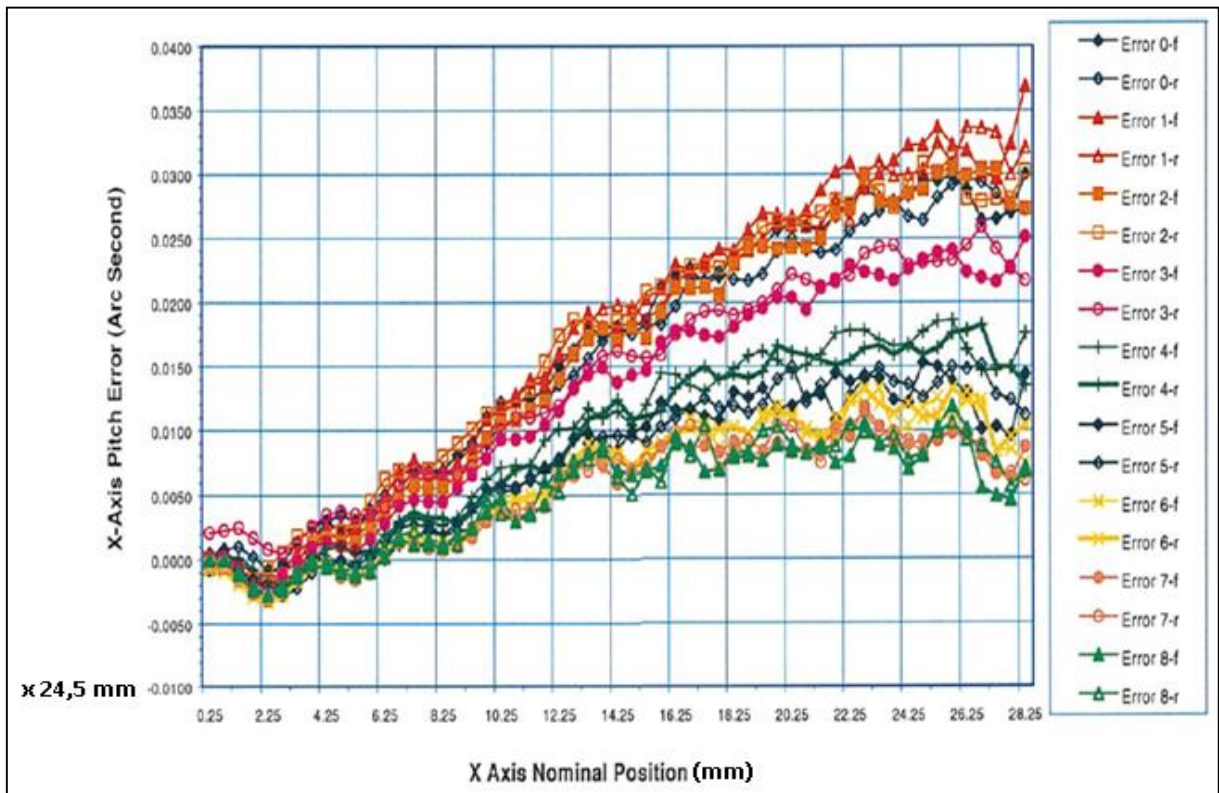


Figure V-18 axe X erreur de tangage.

Donc, tout défaut d'alignement entre la vis à billes et l'écrou ou tout défaut de fabrication (l'erreur maximale en guidage est donnée à $\pm 0,025/300$, la qualité de surface est de 32 microns) est répétée après environ chaque 100 mm. Les courbes montrent aussi une tendance croissante avec l'augmentation de la position de l'axe X pour les deux directions aller et retour. Les résultats montrent que généralement, l'erreur de tangage de l'axe X est petite au début de déplacement, Les erreurs diminuent progressivement à mesure que la machine se réchauffe. Par conséquent, plus la structure de la machine est froide plus l'ordre de l'amplitude de l'erreur de tangage de l'axe est élevée.

b) Erreur de lacet de l'axe X

Les erreurs de lacet de l'axe X illustrées à la Figure V-19 montrent une tendance linéaire similaire à celle du tangage mais avec une pente négative. Dans ce cas, pendant l'état froid de la machine, les erreurs de lacet était beaucoup plus faible en amplitude. Pour les trois premières heures de fonctionnement de la machine, l'augmentation de l'erreur de lacet est plus dramatique que les cinq dernières heures de préchauffage. L'amplitude de l'erreur de lacet était de 0,018 arc/seconde à la fin du test (8 h de fonctionnement).

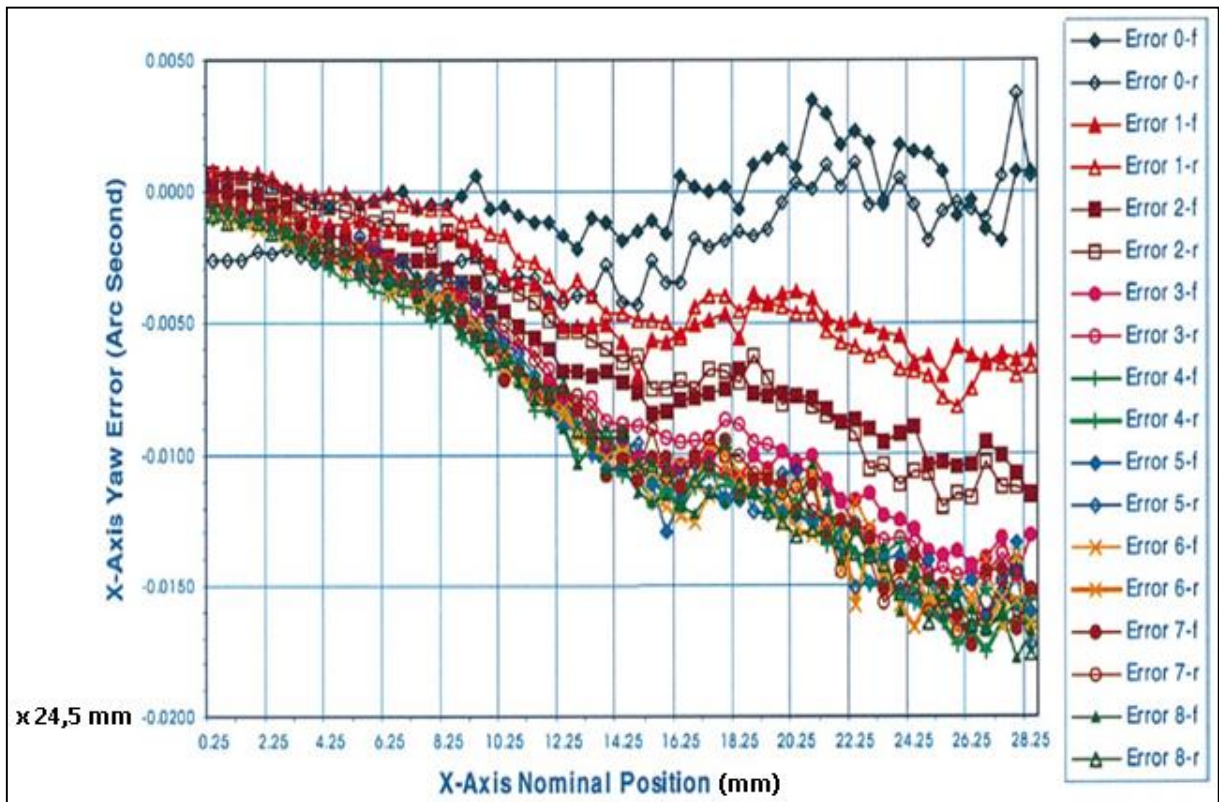


Figure V-19 axe X erreur de lacet.

V-2-2 Résultats de l'axe Y

a) Erreurs de tangage d'axe Y

Les erreurs de tangage de l'axe Y par rapport à la position nominale sont représentées à la Figure V-20. Les résultats montrent que ces erreurs sont de nature sinusoïdale avec une longueur d'onde approximative de 101mm. L'explication donnée pour les erreurs de tangage de l'axe X est encore valable pour l'axe Y. Le diamètre de la vis à billes de l'axe Y est égal à 31,75mm, c.-à-d. que dans une révolution, un point sur la vis à billes parcourt une distance de 99,822 mm. Donc, tout défaut d'alignement entre la vis à billes et l'écrou ou tout défaut de fabrication est répété après chaque 99,822mm. Les courbes montrent aussi que les erreurs de tangage présentent des tendances non-linéaires en fonction de la position de l'axe Y. Dans les deux premières heures de fonctionnement de la machine, les erreurs augmentent négativement, puis ils diminuent en fonction de la position.

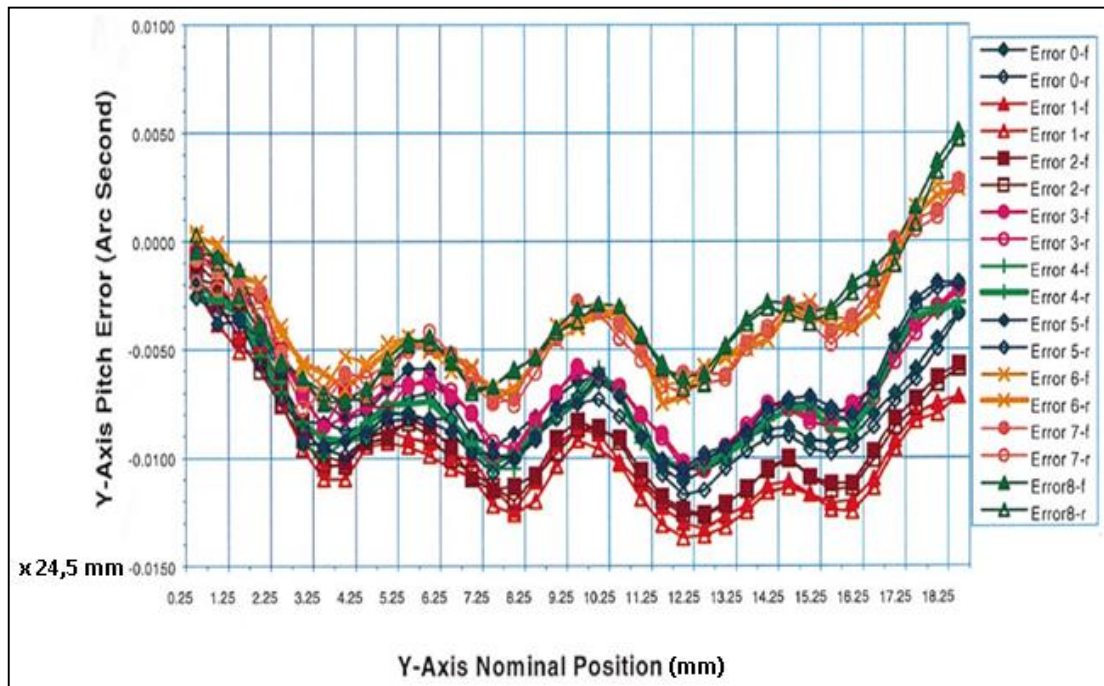


Figure V-20 Erreur de tangage de l'axe Y.

b) Erreurs de lacet de l'axe Y

La Figure V-21 montre que l'erreur de lacet de l'axe Y augmente en fonction de la position nominale. L'ampleur de l'erreur ne change pas considérablement avec le temps de fonctionnement de la machine (température) et demeure à peu près la même entre l'état froid et après 8 h de réchauffement.

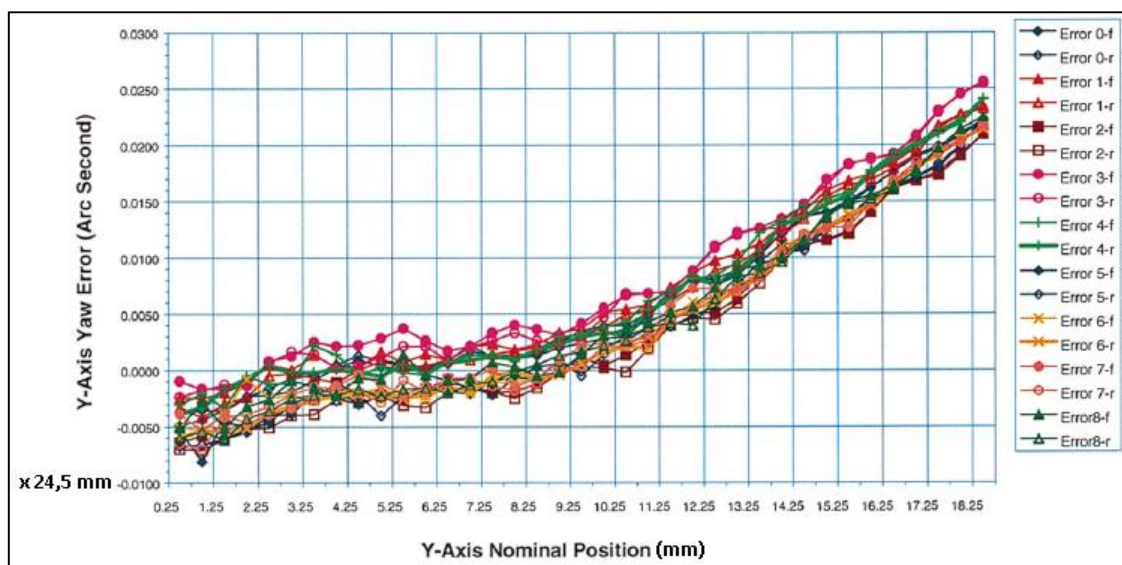


Figure V-21 Erreur de lacet de l'axe Y.

V-2-3 Résultats de l'axe Z

Les erreurs de tangage et lacet de l'axe Z

Les erreurs de tangage et lacet de l'axe Z sont représentées graphiquement sur les Figures V-22 et V-23, respectivement. Les erreurs de tangage de l'axe Z montrent également une variation sinusoïdale en fonction de la position nominale avec une longueur d'onde approximative de 101,6 mm, ce qui concorde avec les résultats trouvés pour les erreurs de tangage de l'axe X et Y. Le diamètre de la vis à billes pour l'axe Z est égal à 25,4mm. Dans une révolution complète de la vis à billes, un point sur la vis à billes parcourt une distance de 99,822 mm. Dans un premier temps, l'erreur de tangage de l'axe Z est positif et varie non linéairement avec la position nominale et est de nature cyclique. Comme la machine se réchauffe, les erreurs deviennent négatives et ont une tendance à la hausse négativement.

L'erreur de lacet de l'axe Z est importante à l'état froid de la machine et commence à diminuer à mesure que la machine se réchauffe. Elles présentent également une variation non-linéaire en fonction de la position nominale de l'axe Z.

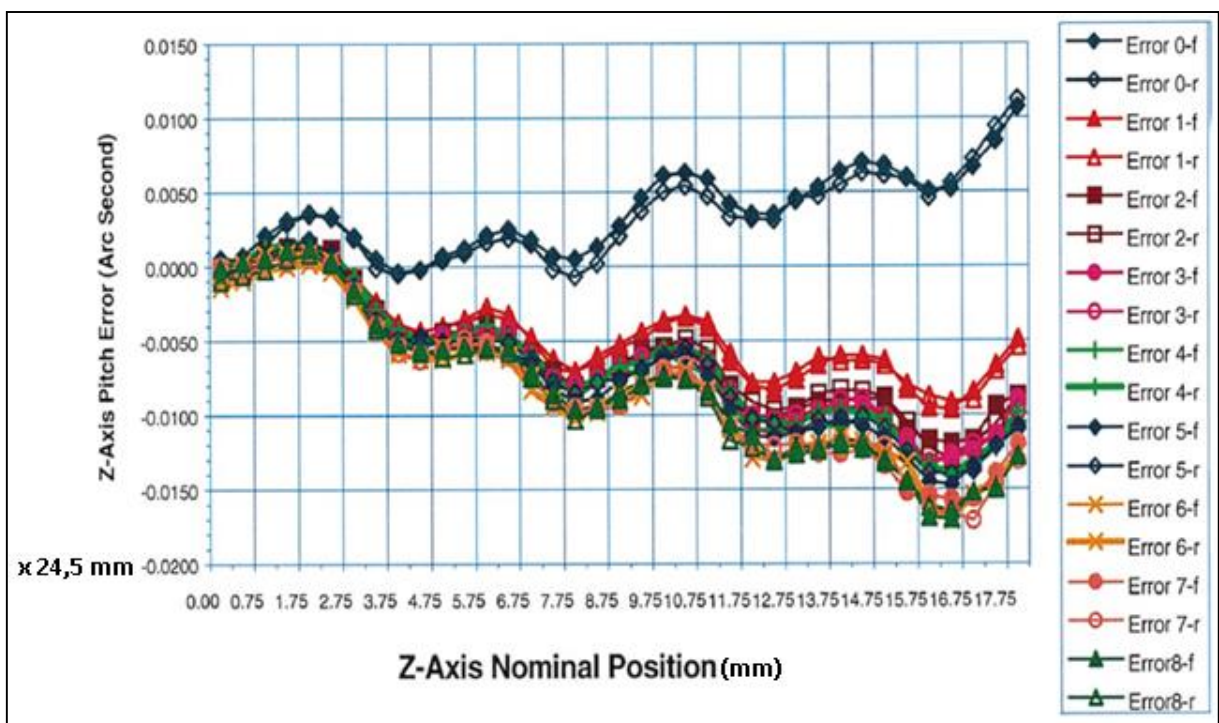


Figure V-22 Erreur de tangage de l'axe Z.

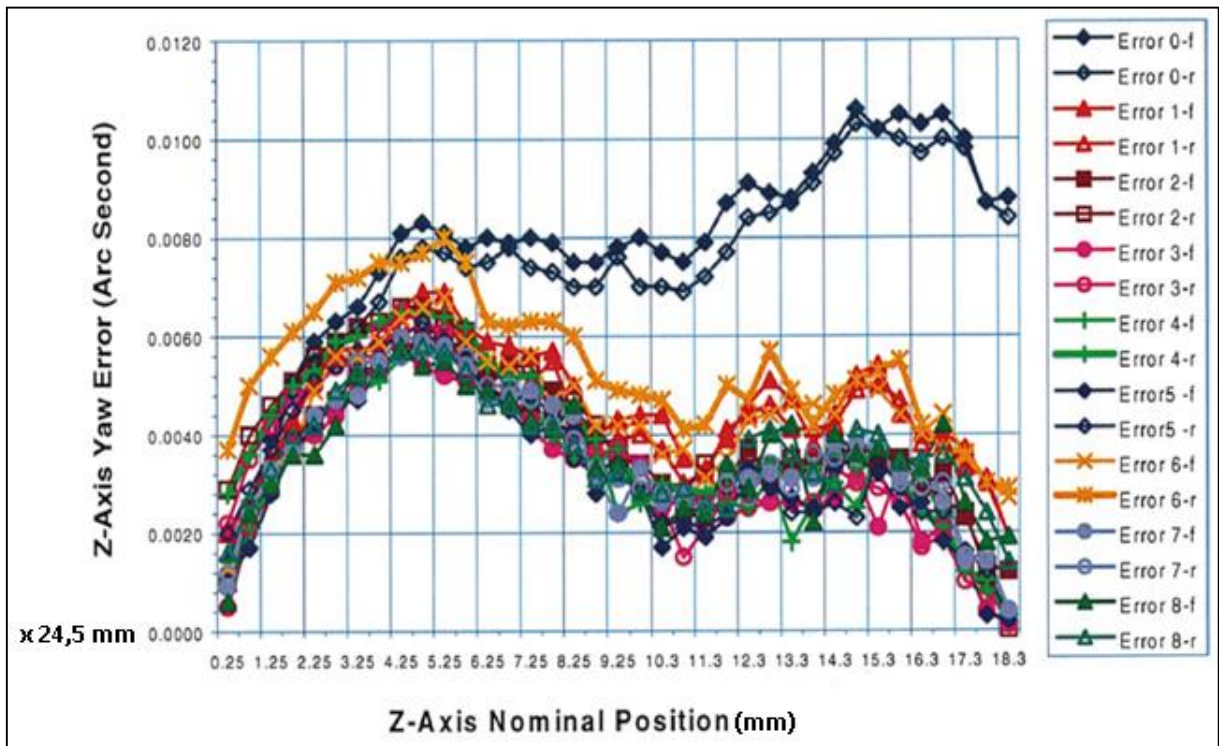


Figure V-23 Erreur de lacet de l'axe Z.

Les Figures V-24 et V-25 résument les erreurs angulaires des trois axes testés. Les valeurs d'erreur dans les courbes représentent l'erreur angulaire maximale (soit tangage ou lacet) indépendamment de la position nominale de l'axe, ces erreurs maximales se produisent généralement à la fin de déplacement de chaque axe. L'erreur angulaire de tangage de l'axe X a une tendance de baisser linéairement que les temps de fonctionnement de la machine augmentent, tandis que l'erreur angulaire de tangage de l'axe Z augment avec le temps.

L'erreur angulaire de tangage de l'axe Y diminuée légèrement durant les 4 première heures de test puis augmente avec le temps. Initialement, l'amplitude du tangage de l'axe X est supérieure à celle des erreurs de tangage des axes Y et Z. D'autre part, l'ampleur de l'erreur de lacet de l'axe Y (Figure V-25) est le plus élevé parmi les trois axes testés. Par contre, les erreurs de lacet des axes Y et Z reste à peu près constantes pendant les 8 heures d'essai, tandis que l'erreur de lacet de l'axe X augmente progressivement au cours des 4 premières heures, puis il reste constante durant les 4h restante.

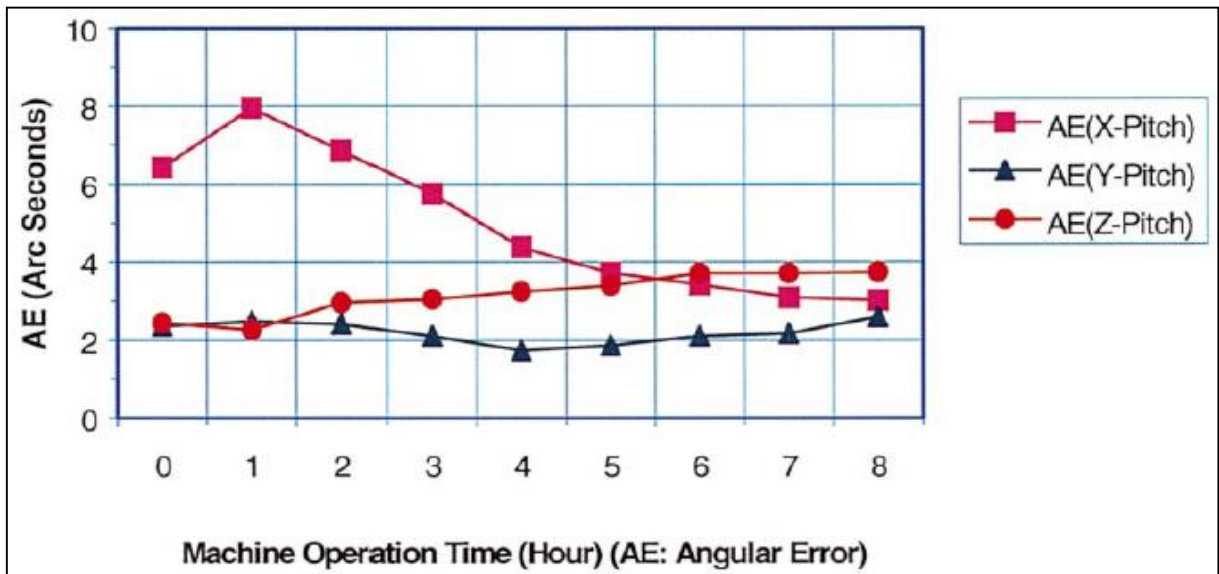


Figure V-24 Erreur angulaire (ASME B5.54).

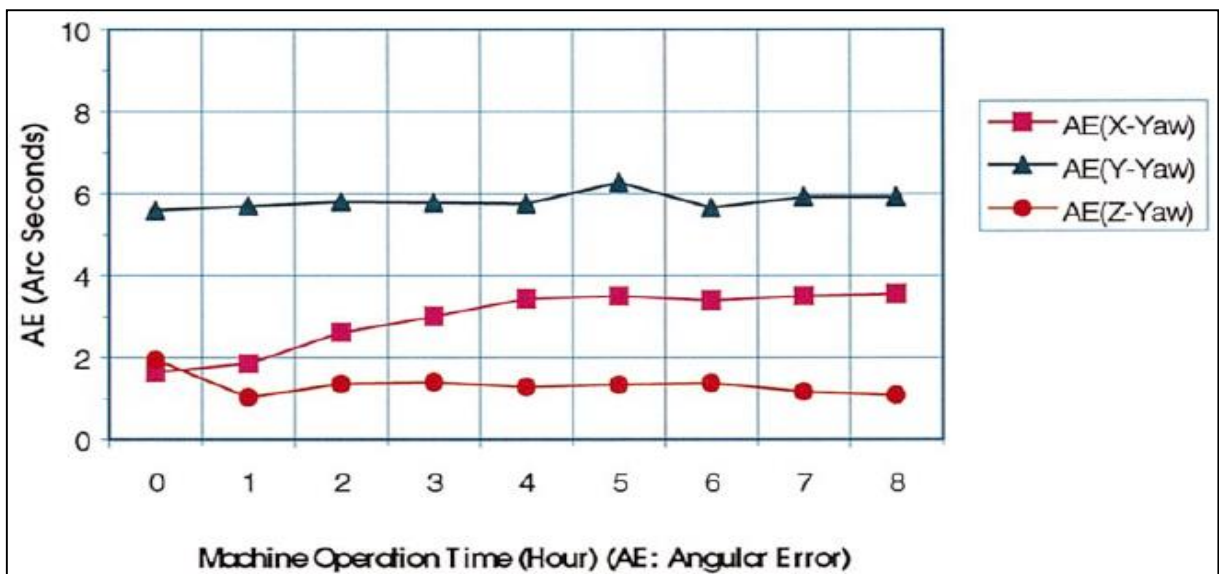


Figure V-25 Erreur angulaire (ASME B5.54).

Le but de l'identification de l'effet thermique était d'identifier la détérioration de la précision de la machine pendant le fonctionnement. Pour tester les effets thermiques, la machine a été opérée pendant 8 heures. Durant la mesure des erreurs angulaires, la température et autres données de capteurs ont été recueillies entre les mesures laser. La variation de température de la structure de la machine, la température de l'air ambiant, la pression de l'air, et l'humidité relative pour toutes les mesures angulaires des trois axes testés sont donnés aux figures V-26 au V-37.

V-2-4 Variations de la température avec la pression d'air et la variation relative de l'humidité pour l'axe X

a) Erreur de tangage pour l'axe X

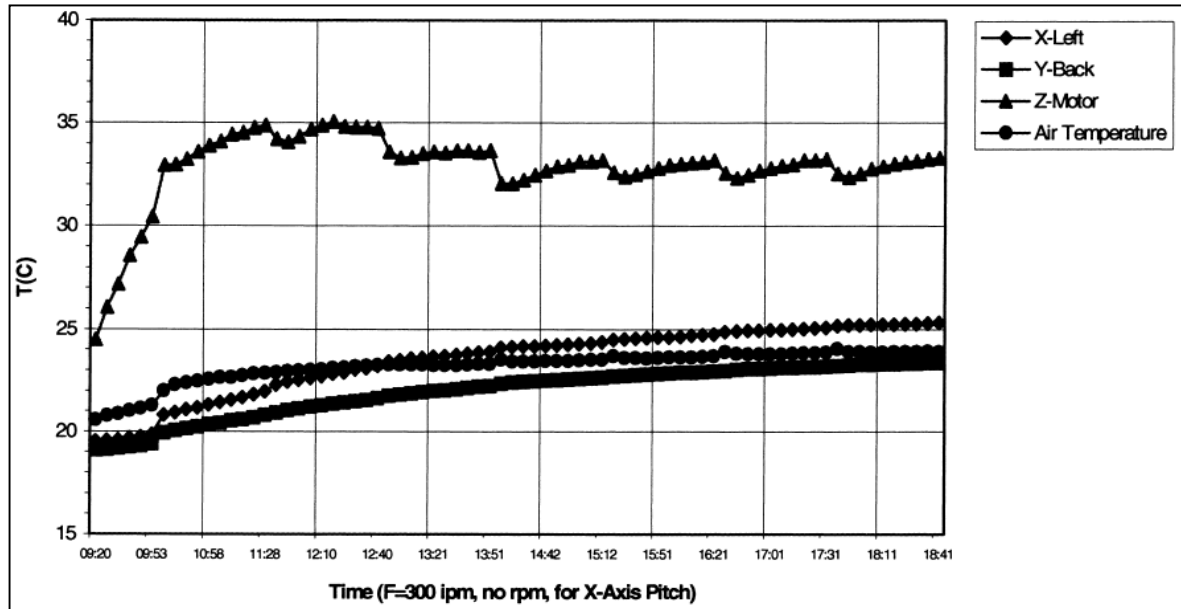


Figure V-26 La variation de température de l'axe X pendant mesure d'erreur de tangage.

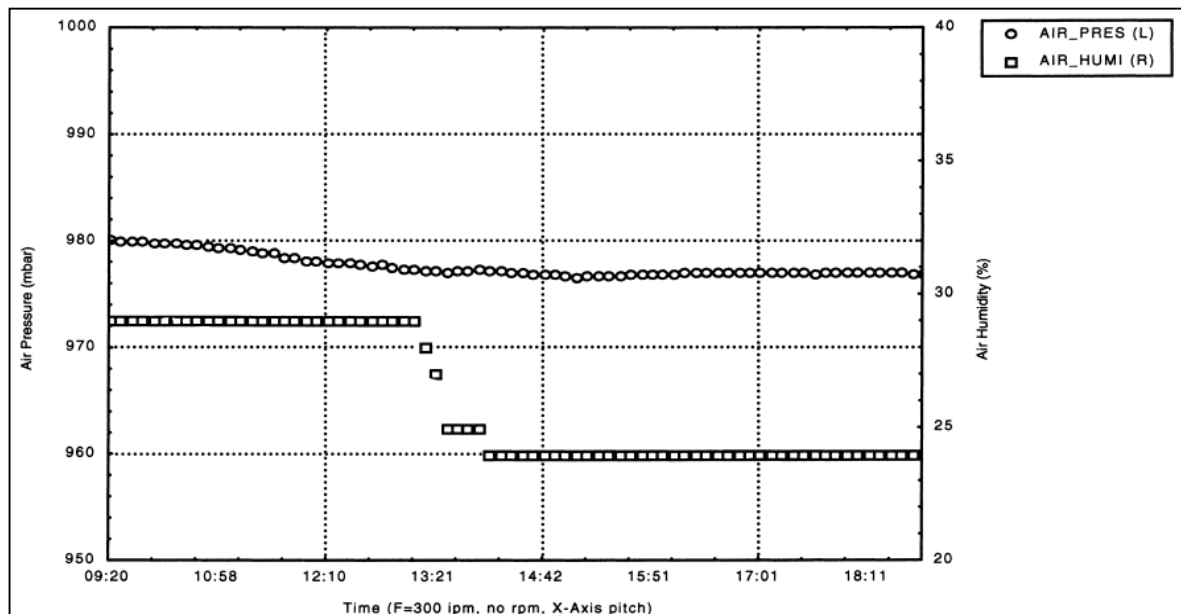


Figure V-27 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant l'axe X mesure d'erreur de tangage.

b) L'erreur de lacet de L'axe X

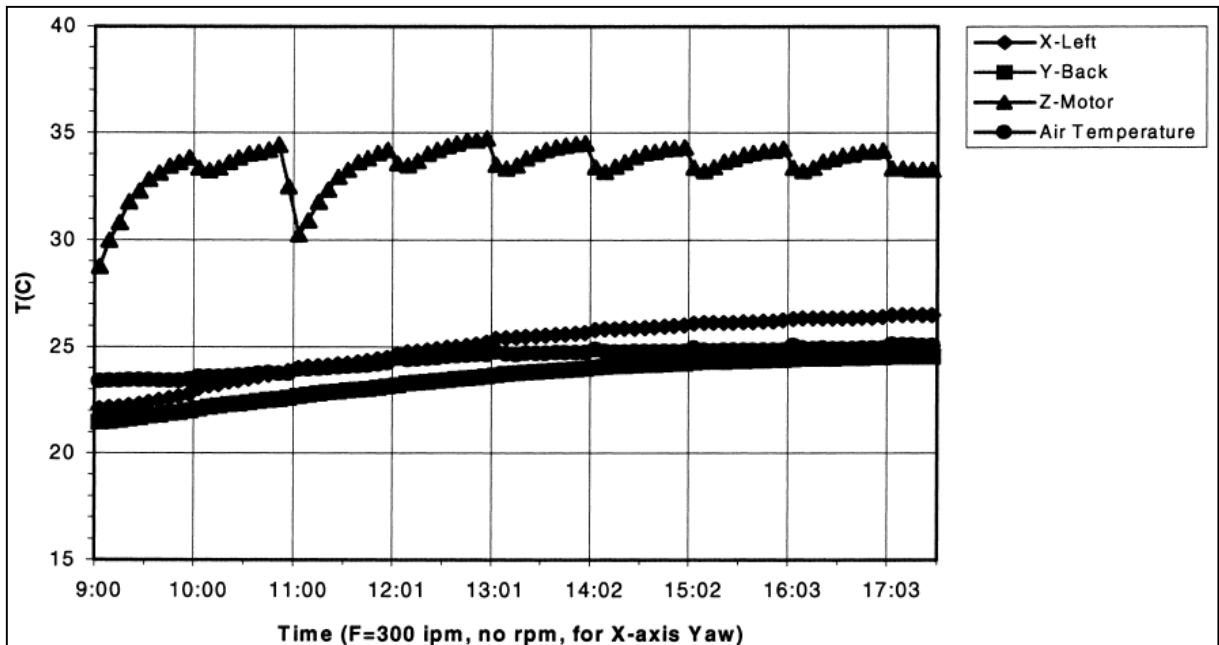


Figure V-28 La variation de température pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe X.

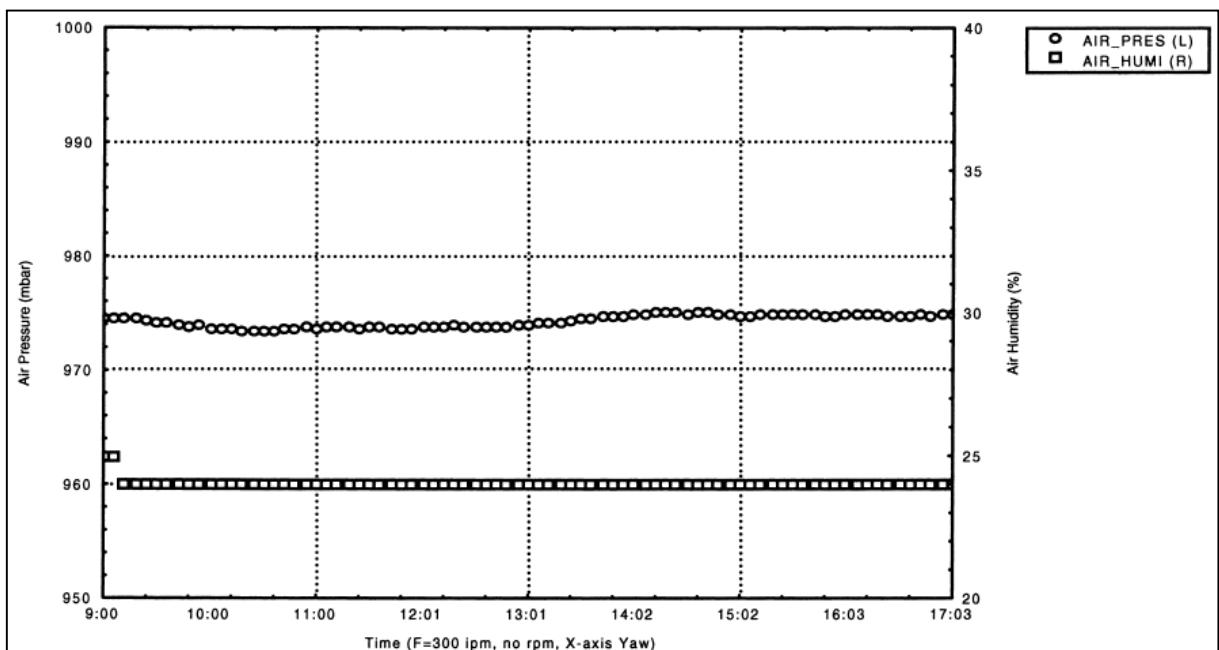


Figure V-29 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe X

V-2-5 La variation de température avec La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant l'axe Y

a) L'erreur de tangage de L'axe Y

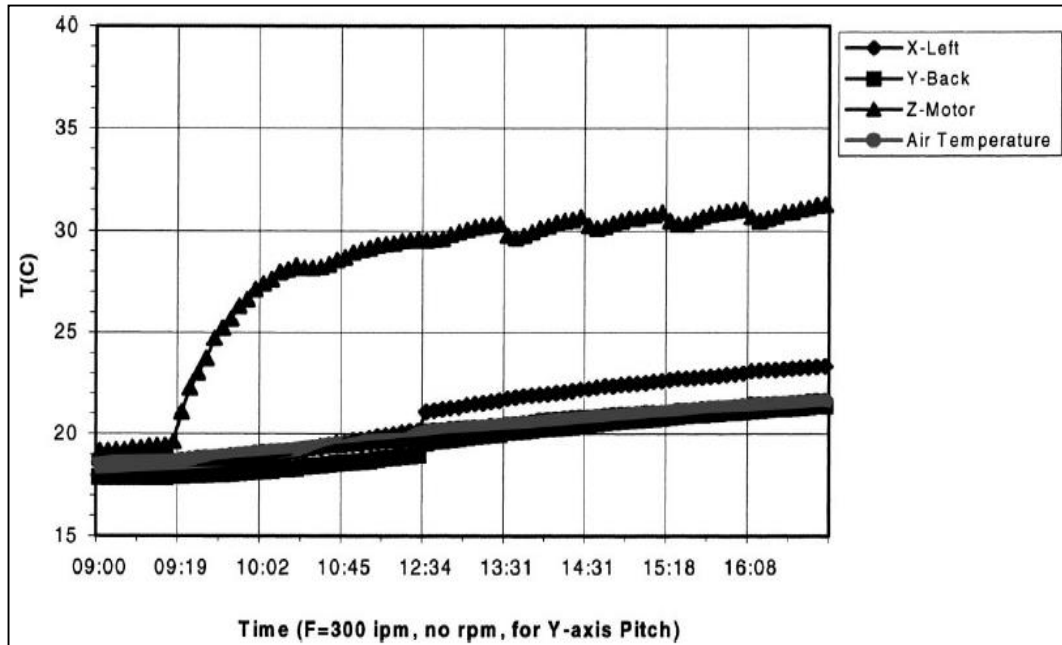


Figure V-30 La variation de température au cours de mesure d'erreur de tangage de l'axe Y.

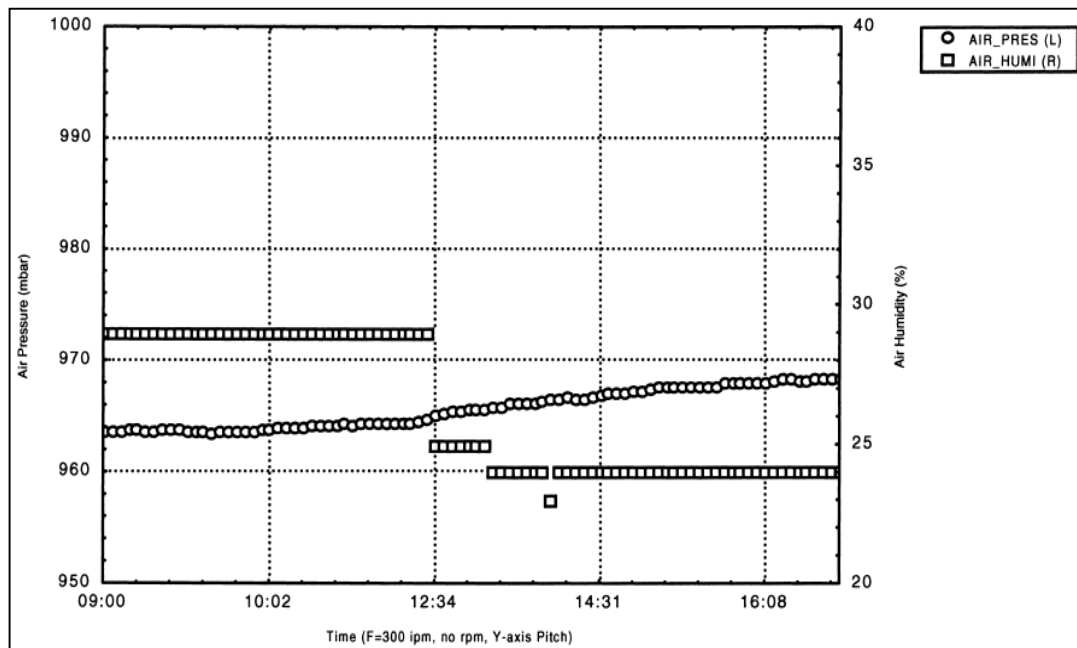


Figure V-31 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de tangage de l'axe Y.

b) Erreur de lacet de L'axe Y

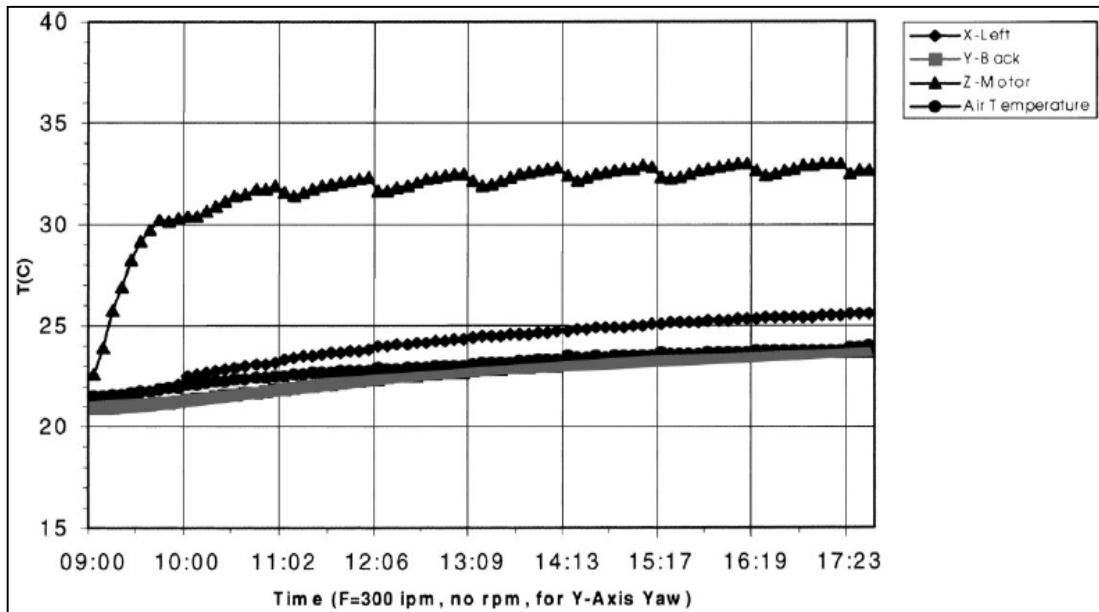


Figure V-32 La variation de température au cours de mesure d'erreur de lacet de l'axe Y.

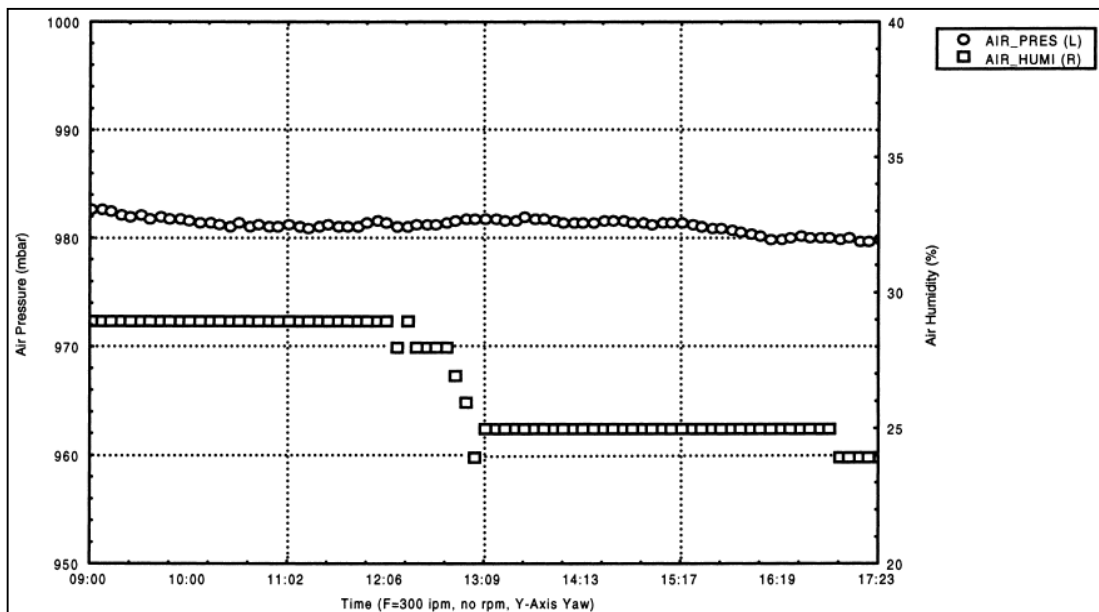


Figure V-33 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe Y.

V-2-6 La variation de température avec La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant l'axe Z

a) L'erreur de tangage de L'axe Z

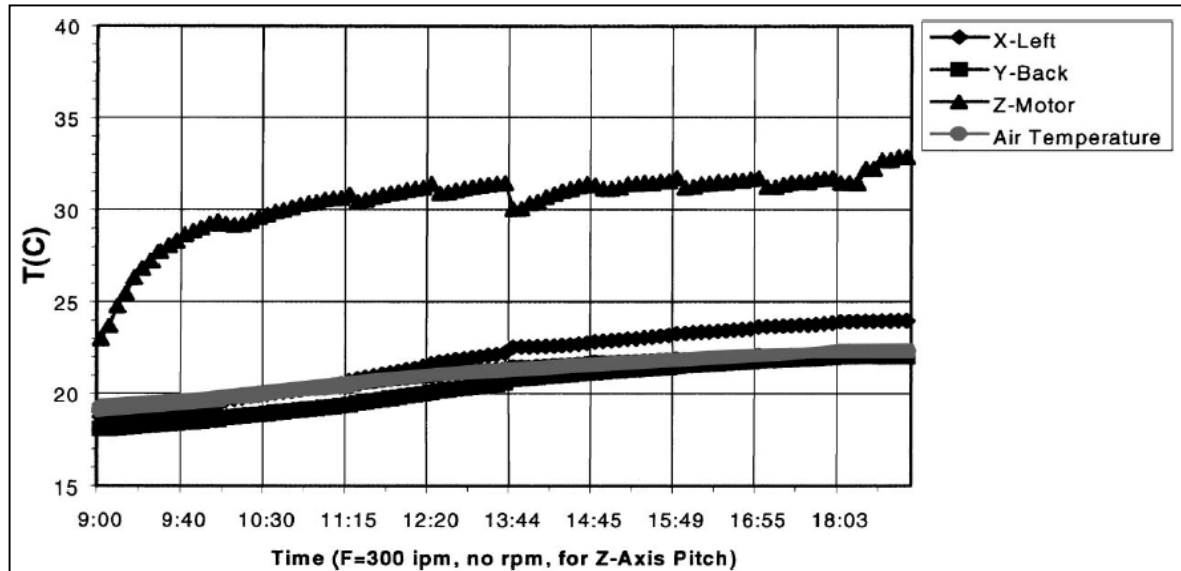


Figure V-34 La variation de température au cours mesure d'erreur de tangage de l'axe Z.

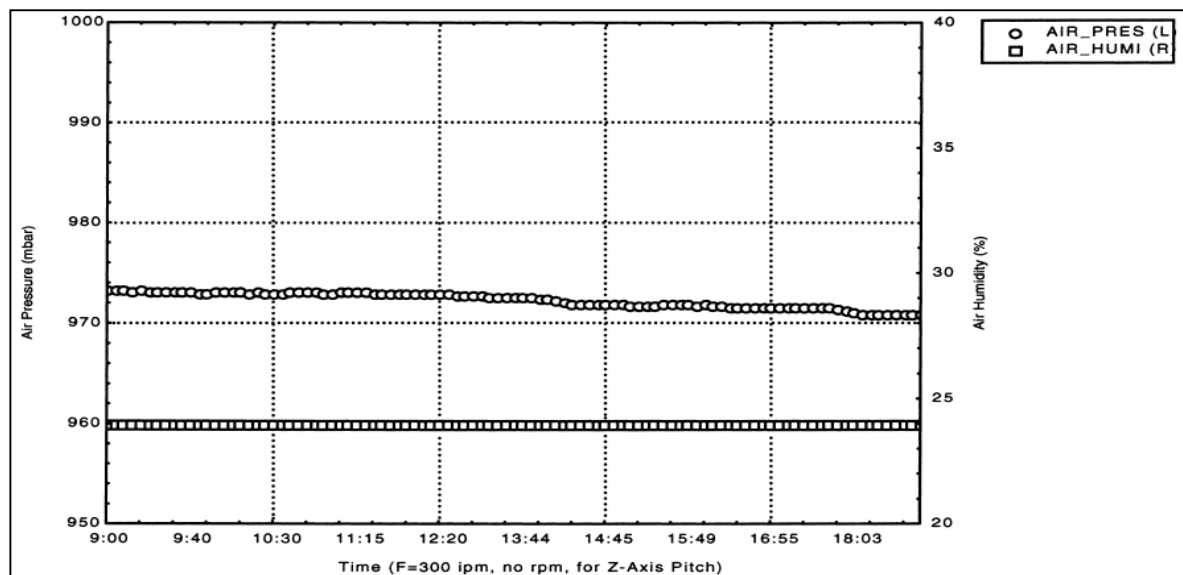


Figure V-35 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de tangage de l'axe Z.

b) L'erreur de lacet de L'axe Z

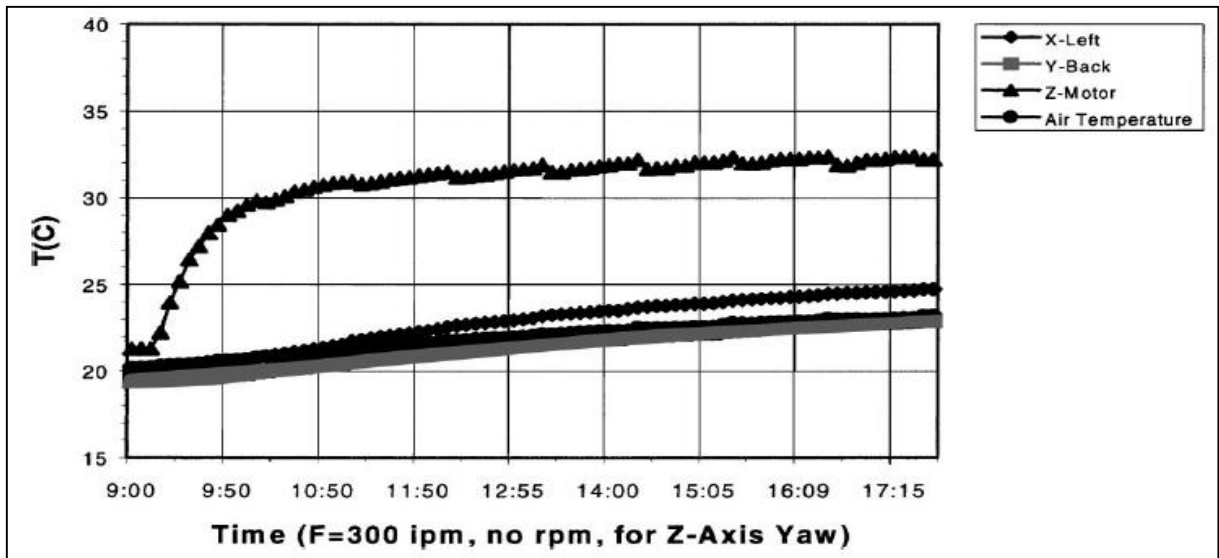


Figure V-36 La variation de température lors mesure d'erreur de lacet de l'axe Z.

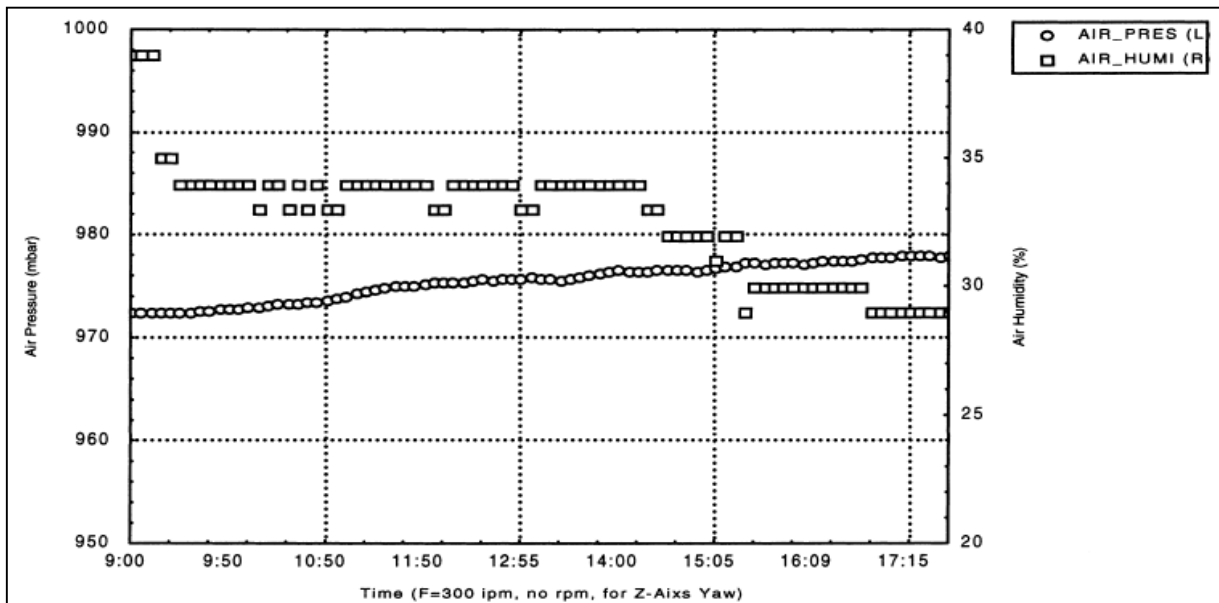


Figure V-37 La pression d'air et de variation relative de l'humidité pendant mesure d'erreur de lacet de l'axe Z.

Toutes les courbes de température montrent des tendances similaires. Généralement, toutes les lectures de température deviennent stables après environ 4 h de la période de fonctionnement de la machine. Les courbes montrent que la plus haute élévation de température est produite au niveau du capteur de température fixé sur le carter du moteur de

l'axe Z suivi par les axes X et Y. La température du carter de moteur de l'axe Z avait augmentée d'environ 7 à 11°C.

Quand la machine est en cycle de mesure pour les erreurs angulaires, une chute de température de 2 à 4°C a été clairement observée au carter du moteur de l'axe Z. La température des guides des axes X et Y est augmenté avec d'environ 5 à 6°C. Généralement, l'élévation de la température des guides de l'axe X est supérieure à celui de l'axe Y. Les résultats de mesure de la température montrent aussi que les principales sources d'erreur thermique sont les moteurs d'entraînement d'axe, la dilatation thermique de l'axe de la vis à billes, les dérives thermiques de référence des axes de la machine, la flexion thermique de la colonne de la machine, et les dérives thermiques à la tête de la broche.

CONCLUSION

CONCLUSION

La mesure des erreurs paramétriques par l'interféromètre laser peut fournir des informations importantes sur l'état de santé de la machine. Les erreurs volumétriques de positionnement de l'outil peuvent être calculées à l'aide d'un modèle cinématique du corps rigide. Bien connaître les erreurs de positionnement de l'outil dans l'espace de travail peut aider l'ingénieur de fabrication à trouver les meilleurs endroits pour positionner la pièce à usiner pour avoir une précision supérieure. L'utilisation ultime de la caractérisation de la précision des machines-outils est de découvrir un moyen pour compenser les erreurs de mouvements des axes pour réduire les erreurs volumétriques et améliorer la précision de la machine.

D'après les résultats de recherche d'Okafor sur le centre d'usinage Sabre 750, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- En général, toutes les erreurs de position linéaires augmentent de façon linéaire par rapport à la position nominale de l'axe et sont les plus élevées à la fin de la course. La Position d'origine de la machine donne les meilleures lectures de précision linéaires pour les X et Y. L'axe Z avait la pire précision à la position d'origine.
- Les erreurs de déplacement linéaire des guides des axes X, Y et Z augmentent avec la température (temps de fonctionnement de la machine). La pente de l'erreur augmente progressivement avec l'échauffement de la machine.
- Pour obtenir une meilleure précision, le brut à usiner doit être placé au voisinage de la position d'origine (home position) sur la table de la machine.
- Dans les conditions de démarrage à froid, seul les erreurs géométriques existent. Après le cycle d'échauffement, une pente due aux erreurs thermiques est ajoutée aux erreurs géométriques.
- L'axe X, qui a la plus longue course, avait la pire précision et la pire erreur de jeu d'inversion parmi les trois axes testés.
- Les moteurs d'entraînement ont été identifiés comme les principales sources de chaleur.

CONCLUSION

- Les erreurs de tangage des axes X, Y et Z sont de nature sinusoïdale avec une longueur d'onde approximative de 101 mm.
- L'erreur de tangage de l'axe X et l'erreurs de lacet de l'axe Y sont les plus importantes parmi les erreurs angulaires mesurées. Généralement, toutes les erreurs angulaires mesurées sont plus élevées à la position finale du déplacement (fin de course) et sont plus bas au voisinage de la position de repos (origine machine).
- Les erreurs de tangage de l'axe Z sont positives lorsque la machine est en état froid, puis elles augmentent négativement avec l'augmentation du temps de fonctionnement de la machine et la position nominale de l'axe. Les erreurs de lacet de l'axe Z sont positives, et sont plus élevé à l'état froid de la machine.
- Les lectures de pression d'air sont dans la plage de 975 à 985 mbar, et reste à peu près constant au cours de toutes les expériences.

REFERENCES

REFERANCE

- [1] Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F., 2008, Geometric error measurement and compensation of machines—An update, CIRP Annals - ManufacturingTechnology, vol.57, pp. 660–675.
- [2] Slocum A.H., 1992, Precision Machine Design, Englewood Cliffs, Prentice Hall, N.J.
- [3] Weekers W.G., 1996, Compensation for Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines, Eindhoven, Netherland, Eindhoven University of Technology, Doctoral Thesis.
- [4] 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.
- [5] 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 lengthmeasurements," Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, vol. 30, no. 4, pp. 241-255, 2001.
- [6] R. Ramesh, M. A. Mannan, et A. N. Poo, "Error compensation in machine tools – a review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture-dependenterrors," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, no. 9, pp. 1235-1256, 2000.
- [7] V. S. B. Kiridena et P. M. Ferreira, "Kinematic modeling of quasistatic errors of threeaxis machiningcenters," International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 34, no. 1, pp. 85-100, 1994.
- [8] Slocum, A.H., Precision machine design, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.

- [9] R. Schultschik, "Geometrische Fehler in Werkzeugmaschinenstrukturen," *Annals of the CIRP* vol. 24 (1), pp. 361-366-1975.
- [10] Spaan H.A.M., 1995, Software error compensation of machine tools, Doctoral thesis, Eindhoven University of Technology.
- [11] Slocum A.H., 1992, *Precision Machine Design*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, N.J.
- [12] Florussen G.H.J, 2002, Accuracy Analysis of Multi-axis Machines by 3D Length Measurements, Eindhoven, Netherlands, University of Technology, Doctoral Thesis.
- [13] ISO 230-3 :2007, Test code for machine tools – Part 3. Determination of Thermal Effects, International Standards Organization, Geneva.
- [14] Delbressine F.L.M., 2005, Modeling Thermomechanical Behavior of Multi-Axis Machine Tools, *Precision Engineering*, vol. 30, no. 1, pp.47–53.
- [15] Thèse ‘METROLOGIE DES MACHINES-OUTILS CINQ AXES PAR BARRE-ABILLES ET PAR FERMETURE DE CHAINE CINEMATIQUE’, UNIVERSITE DE MONTREAL.
- [16] M. Priel, *Les Robots Industriels, Caracteristiques, Performances et Choix* : AFNOR Technique, 1990.
- [17] Vertical machining center accuracy characterization using laser interféromètre, Anthony Chukwujekwu Okafor*, Yalcin M. Ertekin Laboratory for Industrial Automation and Flexible Manufacturing, Department of Mechanical and Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO 65409-0050, USA
Accepted 30 June 2000.