

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MESURE DES ÉCARTS CINÉMATIQUES ARTICULAIRES
D'UN AXE DE ROTATION

JAVAD-REZA SABERIAN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
JUIN 2006

© Javad-Reza Saberian, 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-19330-3

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-19330-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MESURE DES ÉCARTS CINÉMATIQUES ARTICULAIRES
D'UN AXE DE ROTATION

présenté par: SABERIAN Javad-Reza

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury de l'examen constitué de:

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., Président

M. MAYER René, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CLOUTIER Guy, Doct., membre et codirecteur de recherche

M. MASCLE Christian, Doct. Ès Sc., membre

DÉDICACE

À mes sœurs

et à la douce mémoire de ma mère

REMERCIEMENT

J'adresse mes remerciements les plus cordiaux à mes directeurs de recherche, les professeurs, René Mayer et Guy Cloutier pour leurs précieux conseils ainsi que pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de la réalisation de ce projet.

Je remercie Monsieur Yan Boutin et Madame Melissa Côté pour leur coopération laquelle a facilité la réussite de ce projet. Merci également à Messieurs Louida Laliberté et Guy Gironne pour leur disponibilité et leur aide technique.

J'exprime ma vive reconnaissance aux professeurs Marek Balazinski et Christian Mascle pour avoir bien voulu faire partie du jury.

Un chaleureux merci à mon frère Mohsen Saberian et à Madame Talayeh Nikakhtar pour leur appui durant la rédaction de ce projet.

RÉSUMÉ

L'axe de rotation est utilisé dans les machines-outils à commande numérique (MOCN) comme un moyen de produire des déplacements angulaires de la pièce par rapport à l'outil. Ainsi, concomitant à l'utilité d'un axe de rotation, les erreurs associées à cet axe s'introduisent lors d'usinage des pièces. La correction ou la compensation des erreurs associées à l'axe de rotation nécessite alors une mesure précise de ces erreurs.

Cette recherche vise le développement de deux méthodes de mesure des écarts cinématiques articulaires des axes de rotation. La première méthode se base sur l'utilisation d'un autocollimateur afin de mesurer l'écart de positionnement angulaire directionnel. Cet écart, étant l'un des six écarts principaux de l'axe de rotation, peut être compensé en définissant des paramètres de compensation dans l'armoire de commande de la machine-outil.

La deuxième méthode utilise cinq capteurs capacitifs montés sur la table rotative et une cible à deux billes, insérée dans la broche afin de mesurer cinq autres écarts cinématiques articulaires. Un filtrage numérique isole l'effet de l'excentricité du montage sur les écarts obtenus.

La mesure des écarts cinématiques de la table rotative est réalisée sur deux MOCN qui exploitent des technologies d'entraînement différentes pour le déplacement de l'axe. L'une de ces MOCN utilise un moteur couple et l'autre pignons et vis sans fin.

La comparaison d'un des écarts d'inclinaison mesuré par les deux instruments de mesure permet une vérification partielle de la validité de la mesure par capteurs capacitifs.

Les écarts mesurés servent à réaliser une étude statistique de répétabilité et de précision du positionnement des axes de rotation ainsi qu'à comparer la performance des deux MOCN. Finalement, la reproductibilité des instruments de mesure est étudiée en répétant les montages de mesure à quelques reprises.

ABSTRACT

The rotary axis is used in machine-tools as a means for providing rotational movement for the workpiece with respect to the tool. Concomitant to the utilities of the rotary axis, associated errors are also introduced during the machining process. The correction or compensation of these errors requires a precise measurement of these errors.

Two methods have been developed for the measurement of cinematic errors of a rotary axis. The first method uses an autocollimator for the measurement of angular positioning error which is one of the six principal errors of the rotary axis. This error can be compensated by defining the proper compensation parameters in the machine tool control system.

The second method proposes an assembly for the measurement of the five other components of cinematic error is based on the application of five capacity sensors attached on the rotary table and a target with two spherical balls which is inserted in the spindle. A filtering method is also developed in order to isolate the effect of eccentricity from the measurements.

The measurement of cinematic errors is realized on two machine tools with two different drive systems for the rotary axis. One axis is driven by a direct linear motor while the other is worm gear driven.

The angular deviation which is measured by both instruments enables a partial verification of the validity of measurement done by capacitance sensors as well as the proposed filtering method.

The measured errors are used to conduct a statistical analysis on the repeatability and the precision of the rotary axis. Furthermore, the performance of the rotary axis of both machines-tools is compared. At the end, the reproducibility of the measuring instruments is studied by conducting measurements while repeating the measuring setup.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	IV
REMERCIEMENT.....	V
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS	XVII
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 GÉNÉRALITÉS	1
1.2 AXES DE ROTATION.....	2
1.2.1 Guidage.....	2
1.2.2 Commande de déplacement	2
1.2.3 Élément d'entraînement.....	3
1.2.4 Mesure des déplacements	4
1.3 ERREURS DE L'AXE DE ROTATION	5
1.3.1 Erreurs cinématiques.....	6
1.3.2 Erreurs d'origine thermique.....	7
1.4 MESURE ET COMPENSATION DES ERREURS	7
1.5 EXACTITUDE ET RÉPÉTABILITÉ DE POSITIONNEMENT.....	8

1.6 ÉNONCÉ DES OBJECTIFS.....	9
1.7 FORMULATION D'HYPOTHÈSE	10
2. THÉORIE ET MÉTHODE DE MESURE.....	11
2.1 MESURE PAR AUTOCOLLIMATEUR.....	11
2.1.1 Montage de mesure par autocollimateur	12
2.1.2 Erreurs de désalignement du montage	13
2.2. MESURE PAR CAPTEURS CAPACITIFS.....	16
2.2.2 Montage de mesure	18
2.2.3 Filtrage par modèle.....	24
2.2.4 Calcul des écarts de l'axe rotatif	26
2.2.5 Présentation des écarts dans des coordonnées fixes.....	29
2.3 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	32
2.3.1 Description des essais expérimentaux	32
2.3.2 Description des essais par l'autocollimateur	33
2.3.3 Description des essais par le montage des capteurs capacitifs	36
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	39
3.1 RÉSULTATS DE MESURE SUR LA HURON KX8-FIVE	39
3.1.1 Mesure par autocollimateur.....	40
3.1.2 Jeu d'inversion, répétabilité de positionnement et précision.....	42
3.1.3 Mesure par capteurs capacitifs.....	46
3.1.4 Calcul des écarts obtenus par capteurs capacitifs.....	47
3.2 RÉSULTATS DE MESURE SUR LA MITSUI SEIKI HU-40	52
3.2.1 Mesure par l'autocollimateur	52
3.2.2 Mesure par capteurs capacitifs.....	55
3.3 VALIDATION DES MESURES.....	58

3.3.1 Vérification de mesure par l'autocollimateur	58
3.3.2 Vérification de la méthode du filtrage	59
3.3.3 Étude comparative des capteurs capacitifs et autocollimateur	61
3.4. CONCLUSION	63
3.5 RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS	65
RÉFÉRENCES	66
ANNEXES	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1.2.1 – Guide de rotation par table tournante	3
Figure 1.2.2 – Réglage du jeu sur couple roue et vis sans fin	4
Figure 1.3.1 – Mouvement et écarts d'un axe de rotation.....	6
Figure 2.1.1 - Principe de mesure par autocollimateur.....	12
Figure 2.1.2 - Schéma du montage d'autocollimateur.....	13
Figure 2.1.3 - Désalignement de l'axe du polygone	14
Figure 2.1.4 - Décalage linéaire de l'axe du polygone	15
Figure 2.1.5 - Désalignement de l'autocollimateur.....	15
Figure 2.2.1 - Montage de mesure par des capteurs capacitifs.....	16
Figure 2.2.2 - Schéma du montage des capteurs capacitifs	19
Figure 2.2.3 - Non parallélisme entre les surfaces de la cible et le capteur	20
Figure 2.2.4 - L'erreur de gain et de non linéarité	21
Figure 2.2.5 - Excentricité entre la cible et le capteur	22
Figure 2.2.6 - Transformation entre les repères $\{x_r, y_r, z_r\}$ et $\{x_l, y_l, z_l\}$	30
Figure 2.3.1 - Schéma du montage de mesure par l'autocollimateur	34
Figure 2.3.2 - Schéma de l'essai unidirectionnel par l'autocollimateur.....	34
Figure 2.3.3 - Schéma de l'essai bidirectionnel par l'autocollimateur	35
Figure 2.3.5 - Schéma de l'essai bidirectionnel à 30° par capteurs capacitifs	37
Figure 2.3.6 - Schéma de l'essai bidirectionnel à 5° par capteurs capacitifs	38
Figure 3.1.1 - L'axe de rotation C de la MOCN Huron KX8-FIVE	39
Figure 3.1.2 - Écart γ_z pour le mouvement bidirectionnel.....	41
Figure 3.1.3 - Écart γ_y pour le mouvement bidirectionnel.....	41
Figure 3.1.4 - Répétabilité et précision de positionnement angulaire	44

Figure 3.1.5 – Valeur S_{x2} d'un essai unidirectionnel sur la Huron KX8-FIVE	46
Figure 3.1.6 – Écart ε_x pour un essai bidirectionnel sur la Huron KX8-FIVE	47
Figure 3.1.7 – Variation du centre de l'excentricité de la bille supérieure	48
Figure 3.1.8 – Variation du centre de l'excentricité de la bille inférieure	48
Figure 3.1.9 – Écart résultant ε_x obtenu par le filtrage à demi-tours.....	49
Figure 3.1.10 - Écart résultant ε_y obtenu par le filtrage à demi-tours.....	50
Figure 3.1.11 - Écart résultant ε_z obtenu par le capteur C_z	50
Figure 3.2.1 - L'axe d'articulation C de la MOCN Mitsui Seiki HU-40.....	52
Figure 3.2.2 – Écart de positionnement angulaire pour un essai bidirectionnel	53
Figure 3.2.3 – Écart de l'inclinaison angulaire pour un essai bidirectionnel.....	53
Figure 3.2.4 – Écart résultant ε_x obtenu sur la Mitsui Seiki HU-40.....	55
Figure 3.2.5 – Variation du centre de l'excentricité de la bille supérieure	56
Figure 3.2.6 – Variation du centre de l'excentricité de la bille inférieure	56
Figure 3.3.1 - Positionnement angulaire γ_z mesuré par autocollimateur	58
Figure 3.3.2 – Écart linéaire ε_x obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40	60
Figure 3.3.3 – Écart γ_y mesuré sur la Huron KX8.	61
Figure 3.3.4 – Écart γ_y sur la Mitsui Seiki.....	62
Figure A.1 - Schéma de ELCOMAT 3000.....	68
Figure A.2 - Support ajustable de ELCOMAT 3000	70
Figure A.3 - Polygone de mesure à 12 miroirs	71
Figure A.4 - Exemple du montage de mesure par autocollimateur	74
Figure B.1 - Exemple du montage de mesure par capteurs capacitifs.....	79
Figure B.2 - Schéma du capteur capacitif.....	80
Figure B.3 - Support des capteurs à trois morceaux	81

Figure B.4 - Schéma de la cible à deux billes.....	82
Figure B.5 - Conditionneur du signal DMT22.....	83
Figure B.6 - Boîtier DB7.....	83
Figure B.7 - Alignement du support sur la table avec cadran.....	86
Figure B.8. Schéma du montage du support et des capteurs.....	86
Figure C.1 - Le logiciel d'acquisition des données par l'autocollimateur.....	91
Figure C.2 - Schéma du code LabVIEW pour autocollimateur - page 1.....	94
Figure C.3 - Schéma du code LabVIEW pour autocollimateur - page 2.....	95
Figure D.1 - Logiciel d'acquisition des données par capteurs capacitifs.....	96
Figure D.2 - Schéma du code LabVIEW pour capteurs capacitifs - page 1.....	99
Figure D.3 - Schéma du code LabVIEW pour capteurs capacitifs - page 2.....	100
Figure F.1- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction positive.....	105
Figure F.2- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction positive.....	105
Figure F.3- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction négative.....	106
Figure F.4- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction négative.....	106
Figure F.5- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction positive.....	107
Figure F.6- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction positive.....	107
Figure F.7- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction négative.....	108
Figure F.8- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction négative.....	108
Figure G.1- Valeurs mesurées S_{y2} sur la Huron KX8-FIVE.....	109
Figure G.2- Valeurs mesurées S_x sur la Huron KX8-FIVE.....	109
Figure G.3- Valeurs mesurées S_y sur la Huron KX8-FIVE.....	110
Figure G.4- Valeurs mesurées S_z sur la Huron KX8-FIVE.....	110

Figure G.5- Valeurs mesurées S_{y2} sur la Mitsui Seiki HU-40.....	111
Figure G.6- Valeurs mesurées S_{y2} sur la Mitsui Seiki HU-40.....	111
Figure G.7- Valeurs mesurées S_x sur la Mitsui Seiki HU-40	112
Figure G.8- Valeurs mesurées S_y sur la Mitsui Seiki HU-40.....	112
Figure G.9- Valeurs mesurées S_z sur la Mitsui Seiki HU-40	113
Figure H.1- Écart mesuré γ_x sur la Huron KX8-FIVE	114
Figure H.2- Écart mesuré γ_y sur la Huron KX8-FIVE	114
Figure H.3- Écart mesuré ε_y sur la Mitsui Seiki HU-40	115
Figure H.4- Écart mesuré ε_z sur la Mitsui Seiki HU-40	115
Figure H.5- Écart mesuré γ_x sur la Mitsui Seiki HU-40	116
Figure H.6- Écart mesuré γ_y sur la Mitsui Seiki HU-40.....	116
Figure H.7 - Écart linéaire ε_y obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40.....	117
Figure H.8 - Écart linéaire ε_z obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40.....	117
Figure H.9 - Écart linéaire γ_x obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40	118
Figure H.10 - Écart linéaire γ_y obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40.....	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.3.1 - Spécification des axes rotatifs utilisés dans cette étude.....	32
Tableau 2.3.2 - Conditions d'essais unidirectionnels par autocollimateur.....	35
Tableau 2.3.3 - Conditions d'essai bidirectionnel par autocollimateur.....	36
Tableau 2.3.4 - Conditions d'essai bidirectionnel à 30° par capteurs capacitifs	37
Tableau 2.3.5 - Conditions d'essai bidirectionnel à 5° par capteurs capacitifs.....	38
Tableau 3.1.1 - Résultats statistiques de l'écart γ_z pour un essai bidirectionnel.....	43
Tableau 3.1.2 - Répétabilité et précision de positionnement angulaire	45
Tableau 3.1.3 - Répétabilité et précision de positionnement des écarts mesurés ..	51
Tableau 3.2.1 - Données statistiques de l'écart γ_z pour la Mitsui Seiki HU-40	54
Tableau 3.2.2 - Répétabilité et précision de positionnement des écarts mesurés ..	57
Tableau 3.3.1 - Comparaison des écarts γ_z et γ_y mesurés sur la Huron KX8-FIVE ..	59
Tableau 3.3.2 - Comparaison statistique des écarts mesurés la Mitsui Seiki HU-40	60
Tableau 3.3.3 - Écart γ_y mesuré par autocollimateur et par capteurs capacitifs.....	62
Tableau A.1 - Spécifications techniques de ELCOMAT 3000	69
Tableau B.1 - Spécifications du capteur capacitif <i>Lion-Precision C1-C</i>	80
Tableau B.2 - Dimensions de la cible à deux billes	82
Tableau C.1 - Paramètres et configuration de mesure	92
Tableau D.1 - Paramètres et configuration de mesure	97

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : PROTOCOLE D'UTILISATION DE L'AUTOCOLLIMATEUR.....	68
ANNEXE B : PROTOCOLE D'UTILISATION DES CAPTEURS CAPACITIFS	79
ANNEXE C : ACQUISITION DE DONNÉES D'AUTOCOLLIMATION.....	91
ANNEXE D : ACQUISITION DE DONNÉES DES CAPTEURS CAPACITIFS.....	96
ANNEXE E : PROGRAMMES DE CODE G	101
ANNEXE F : DONNÉES DE MESURE PAR AUTOCOLLIMATEUR.....	105
ANNEXE G : DONNÉES DE MESURE PAR CAPTEURS CAPACITIFS.....	109
ANNEXE H : ÉCARTS OBTENUS PAR CAPTEURS CAPACITIFS	114

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

ε_x	Composante de l'écart linéaire de l'axe de rotation selon X
ε_y	Composante de l'écart linéaire de l'axe de rotation selon Y
ε_z	Composante de l'écart linéaire de l'axe de rotation selon Z
γ_x	Composante de l'écart d'inclinaison angulaire de l'axe de rotation selon X
γ_y	Composant de l'écart d'inclinaison angulaire de l'axe de rotation selon Y
γ_z	Écart de positionnement angulaire de l'axe de rotation
θ	Position angulaire
α_m	Valeur mesurée par l'autocollimateur
α_p	Angle de désalignement du polygone
d	Décalage linéaire de l'axe symétrique du polygone
α_A	Désalignement du faisceau optique
ξ_c	Axe de rotation C de la machine-outil
ξ_t	Axe de la cible passant par les deux centres des billes
ξ_r	Axe formé par les capteurs Cx_2 , Cy_2 et Cz
$\{x_b, y_b, z_t\}$	Repère formé par ξ_t dont l'origine est le centre de la bille supérieure
$\{x_r, y_r, z_r\}$	Repère formé par ξ_r et les capteurs Cx_2 , Cy_2 et Cz
(ρ_2, φ_2)	Coordonnées polaires de la bille supérieure dans le repère $\{x_t, y_t, z_t\}$
(ρ, φ)	Coordonnées polaires de la bille inférieure dans le repère $\{x_t, y_t, z_t\}$
Cx, Cy, Cz, Cx_2, Cy_2	Capteurs capacitifs
$S_x, S_y, S_z, S_{x2}, S_{y2}$	Indication des capteurs Cx, Cy, Cz, Cx_2, Cy_2
R	Rayon de la cible
L	Distance entre un capteur et la cible

1. INTRODUCTION

Ce chapitre aborde les éléments de la bibliographie, nécessaires à l'avancement de l'étude présentée dans les chapitres suivants.

Les axes de rotations, les erreurs spécifiques à ces derniers et les études effectuées dans ce domaine, l'objectif à atteindre ainsi que les hypothèses sur lesquelles se base cette recherche y sont discutés.

1.1 GÉNÉRALITÉS

Les machines-outils à commande numérique (MOCN) comptent parmi les moyens les plus efficaces de fabrication des pièces mécaniques. À cet effet, le progrès et l'amélioration de la technologie des composants mécaniques et électriques ainsi que les logiciels de contrôle et de calcul ont permis d'augmenter la productivité de ces machines.

D'après la norme ISO 230-7:2005 [1], les broches, têtes rotatives et tables rotatives et pivotantes des machines-outils constituent les axes de rotation. Cependant, dans cette recherche le terme « axe de rotation » s'adresse à la table rotative d'une machine-outil.

La plupart des machines-outils ont une architecture cartésienne, comprenant généralement (exceptées les machines spéciales) trois axes linéaires. Ces machines, accompagnées ou non d'un à deux axes de rotation, rendent possibles, à la pointe de l'outil, l'accès au volume de travail et permettent d'usiner une plus grande variété et complexité de pièces.

Grâce à l'utilisation des axes de rotation, l'usinage de la majorité des pièces se fait souvent selon plusieurs directions en un seul montage des pièces sur la table [2]. De plus, cette accessibilité aux différents endroits sur la pièce nous permet d'utiliser des outils plus courts et, par conséquent, plus rigides [2].

Avec l'évolution des machines-outils, on parvient à mieux maîtriser les écarts aux articulations. Cela permet d'améliorer la précision et la qualité d'usinage en compensant certaines imperfections mécaniques par le logiciel installé dans l'armoire de commande de la machine-outil.

La compensation des écarts d'un axe articulaire nécessite la connaissance de ces écarts. Elle se base ainsi sur un modèle mathématique créé selon le comportement des écarts concernés. Ce modèle s'élabore à partir des mesures réelles prises sur l'axe d'articulation.

1.2 AXES DE ROTATION

La structure d'un axe de rotation d'une machine-outil se compose de plusieurs éléments fixes ou mobiles. Les sections suivantes en présentent les principaux éléments :

1.2.1 Guidage

On retrouve les guidages à frottement et à roulement dans les réalisations les plus courantes suivantes [3]:

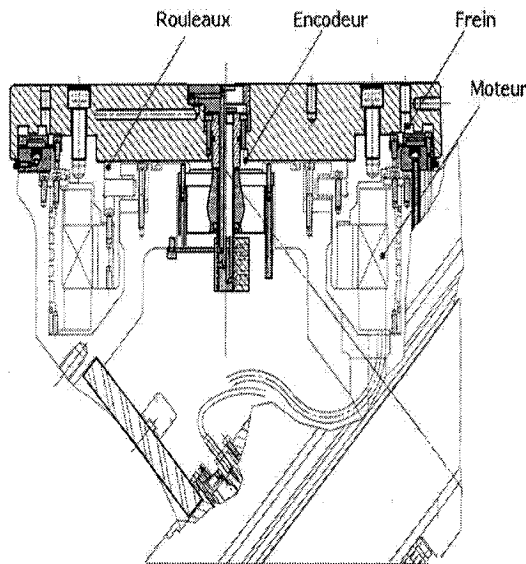
- Une couronne de large diamètre assurant à la fois le guidage radial et axial : couronne à billes ou, pour plus de rigidité, roulement combiné à aiguilles ou à rouleaux (Figure 1.2.1-a) ou roulement à rouleaux croisés.
- Un palier central assurant le guidage radial : roulement à rouleaux ou à aiguilles; pour le guidage axial, une butée disposée sur un diamètre proche du diamètre extérieur de la table : butée à aiguilles ou à rouleaux ou à frottement métal sur matériau composite.

Sur les centres d'usinages horizontaux, on rencontre parfois des tables tournantes (Figure 1.2.1-b) indexables dans des positions définies. Le guidage doit supporter le poids de la pièce et les efforts d'usinage.

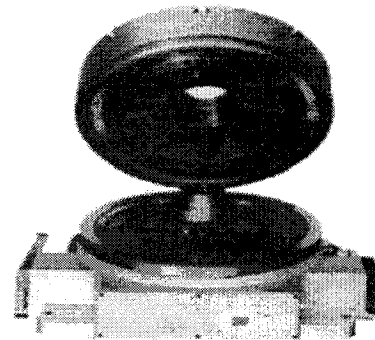
1.2.2 Commande de déplacement

La commande de déplacement permet de déplacer les axes d'un point à l'autre et de maintenir l'avance de travail à une valeur donnée tout en fournissant l'effort nécessaire pour vaincre la réaction de coupe, les forces inertielles et les frictions. La commande de déplacement se compose d'un élément moteur associé à un asservissement et d'un élément d'entraînement.

Les moteurs électriques de type rotatif assurent la quasi-totalité des commandes. Ces moteurs peuvent être des moteurs à courant continu, moteurs synchrones autopilotés et moteurs pas à pas. Il existe aussi des moteurs hydrauliques du type à pistons associés à une servovalve. Ces derniers s'utilisent de moins en moins et ne se trouvent plus que sur quelques machines de grandes dimensions.



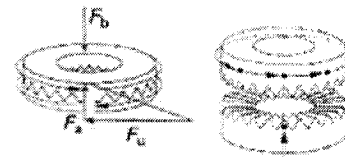
(a) Table tournante avec palette¹



doc. SMP

Bloqué

Dégagé



(a) Table indexable à couronnes crantées²

Figure 1.2.1 – Guide de rotation par table tournante

1.2.3 Élément d'entraînement

La commande par roue et vis sans fin s'utilise plus couramment pour les tables rotatives. Elle doit présenter un jeu réduit, obtenu, soit par déplacement axial de la vis qui est légèrement conique (Figure 1.2.2-a) soit par une vis en deux parties que

¹ Gracieuseté de la compagnie Huron

² Voir la page 9 de la référence [3]

l'on décale angulairement l'une par rapport à l'autre (Figure 1.2.2-b). Pour un fonctionnement réellement sans jeu, on utilise quelquefois un ensemble de deux vis précontraintes agissant sur la même roue mais, outre le coût plus élevé, le rendement devient faible. Pour un meilleur rendement, on utilise un pignon agissant sur une couronne dentée.

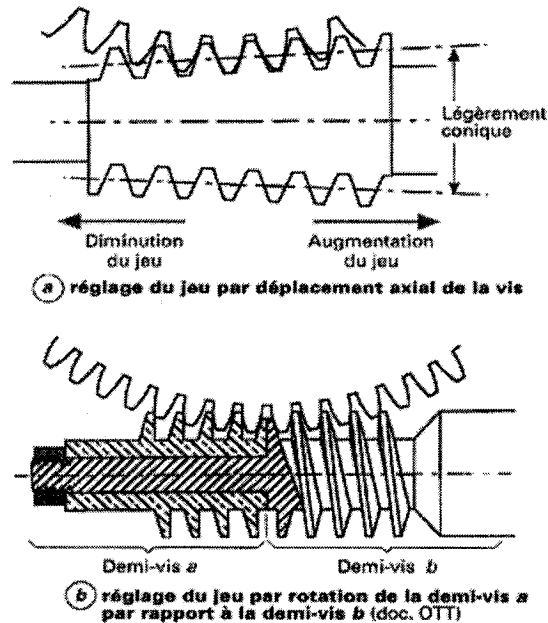


Figure 1.2.2 – Réglage du jeu sur couple roue et vis sans fin¹

1.2.4 Mesure des déplacements

La mesure des déplacements des axes rotatifs se fait par des capteurs rotatifs. En mesure directe, le capteur doit avoir une grande exactitude (par exemple $0,001^\circ$). En mesure indirecte, avec par exemple un réducteur de rapport 1/60, une exactitude du capteur de $0,06^\circ$ et une définition de 60 000 points par tour suffisent pour un même résultat théorique. Le jeu et les erreurs cycliques du réducteur conduisent à une baisse de précision finale de 3 à 10 fois [3].

¹ Voir la page 11 de la référence [3]

1.3 ERREURS DE L'AXE DE ROTATION

Chaque articulation (linéaire ou rotoïde) sur une machine-outil est destinée à n'avoir qu'un seul degré de liberté commandé. Dans la réalité, il y a 5 microdegrés additionnels qui existent pour chaque articulation en plus de l'erreur de la commande [12]. Ces six composants d'erreur proviennent, soit du procédé d'usinage, soit de la machine-outil comme : imperfections dans les composants mécaniques d'articulation, erreur du capteur de position angulaire, usure, etc.

Les erreurs dynamiques et quasi-statiques se trouvent à l'origine des erreurs attribuées à la machine :

- Les erreurs dynamiques proviennent des sources telles que les vibrations de la structure de la machine ou de la broche et des erreurs causées par le système d'asservissement, etc.
- Les erreurs quasi statiques proviennent de la structure de la machine-outil et ont une variation lente avec le temps. Elles sont responsables d'environ 70% des erreurs attribuées à une machine-outil à commande numérique [4].

Dans le cas d'un axe de rotation, les erreurs quasi statiques se présentent sous forme de six composantes énumérées ci-dessous [2, 5, 6] (Figure 1.3.1):

- Un écart de positionnement angulaire (γ_z)
- Deux écarts radiaux (ε_x et ε_y)
- Un écart axial (ε_z)
- Deux écarts d'alignement angulaires (γ_x et γ_y)

Les deux principales sources d'erreurs quasi statiques sont les suivantes :

1. Erreurs d'origine cinématique
2. Erreurs d'origine thermique

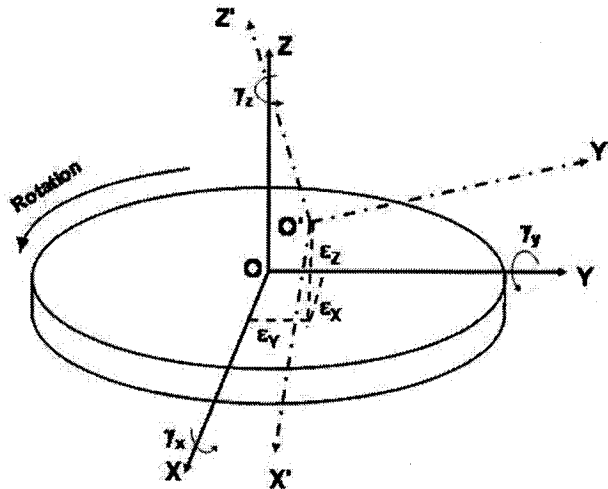


Figure 1.3.1 – Mouvement et écarts d'un axe de rotation

1.3.1 Erreurs cinématiques

Les erreurs cinématiques proviennent des erreurs relatives du mouvement de plusieurs composants mobiles de la machine qui doivent se déplacer selon des conditions fonctionnelles précises. Ces erreurs sont particulièrement significatives pendant le mouvement combiné de différents axes comme dans le cas du fraisage.

Slocum [5] définit les erreurs cinématiques comme « erreurs dans la trajectoire d'un axe » qui sont provoquées par l'écart de position linéaire ou angulaire des composants.

Notons que d'autres sources d'erreurs quasi statiques modifient la géométrie des composants de la machine et font ainsi de l'erreur cinématique une des plus grandes sources d'inexactitude.

Certaines de ces diverses sources d'erreurs cinématiques provenant des composants de la machine-outil sont [7]:

- Positionnement des composants
- Rectitude
- Tangage, lacet et roulis
- Perpendicularité
- Jeu d'inversion

1.3.2 Erreurs d'origine thermique

Les erreurs d'origine thermique se produisent quand la dimension des composants de la machine change à la suite d'une variation de température. Cette variation thermique pourrait être provoquée par les sources de chaleurs comme les moteurs, les circuits hydrauliques, le frottement entre un composant mobile et un composant fixe ou mobile et la variation de la température ambiante qui n'est pas souvent contrôlée dans les ateliers d'usinage.

Schlicksbier [2] a observé que la friction causée par le système d'engrenage de la table rotative dans une machine-outil entraîne une dérive dans les six degrés de liberté. Quant à l'angle de positionnement, un encodeur angulaire compense la dérive.

1.4 MESURE ET COMPENSATION DES ERREURS

Lorsque les principaux efforts d'amélioration d'exactitude d'une machine-outil à travers le design et le contrôle d'ambiant s'effectuent, la répétabilité de certaines erreurs permet d'améliorer encore l'exactitude de la machine-outil.

La compensation d'erreurs des machines-outils est un des principaux domaines de recherche en matière d'augmentation de la précision de ces machines. Certains domaines de recherche incluent la caractérisation des erreurs de machines-outils, l'identification des sources d'erreur, la modélisation et la prédiction de celle-ci et l'élaboration des méthodes de minimisation d'erreur par une meilleure conception ou compensation en ligne de machine-outil.

Suh [6,8] présente une procédure de calibration des tables rotatives. D'abord, il utilise un modèle d'erreur géométrique par des matrices de transformation homogènes. Ensuite, il compense les erreurs par le contrôleur de la machine-outil.

Une partie essentielle de la technique de compensation d'erreur est la capacité de mesurer les erreurs de la machine. La mesure des erreurs cinématiques a toujours été une tâche pénible et longue. Pour une machine à trois axes, on mesure 21 composants d'erreurs. Concomitant à tous les bénéfices accordés par des axes rotatifs, les erreurs associées à ces axes se révèlent lors de l'usinage de pièces.

La mesure directe, en utilisant un système de mesure approprié, détermine principalement avec précision les erreurs d'une machine. À ce propos, des études sur des tests de précision machine ont été effectuées par plusieurs auteurs.

Schlicksbier [2] a développé une méthode de mesure des erreurs statiques et des erreurs d'origine thermique d'une table rotative en utilisant un encodeur angulaire et cinq capteurs de distance.

Suh [6,8] a mesuré les erreurs d'une table rotative en utilisant deux autocollimateurs pour les erreurs angulaires et trois LVDT¹ et une sphère pour les erreurs linéaires.

Schroder [9] a mesuré simultanément les six erreurs cinématiques d'une table rotative par une mesure continue selon la norme ISO 230 [10]. Le principe utilisé se base sur un encodeur angulaire et une surface cylindrique. Six têtes de mesure, installées dans des positions prévues, fournissent les données de mesure des six écarts de la table rotative.

Oueslati [11] a utilisé un indexeur rotatif, un interféromètre laser, un interféromètre angulaire et un rétro-réflecteur angulaire pour mesurer l'écart de positionnement angulaire de l'articulation rotoïde d'une MOCN.

1.5 EXACTITUDE ET RÉPÉTABILITÉ DE POSITIONNEMENT

Pour une connaissance complète des erreurs de machine-outil, deux définitions de base doivent être comprises : l'exactitude et la répétabilité de positionnement.

Slocum A. a défini l'exactitude, liée aux machines-outils, comme la capacité d'une machine à positionner et à orienter l'outil d'une façon désirée dans l'espace de travail. La répétabilité est une mesure de sa capacité à placer et à orienter à plusieurs reprises. La répétabilité de la machine limite la stratégie de compensation.

¹ Linear Voltage Differential Transformer

Dans la présente recherche, la norme ISO 230-2 [10] est considérée comme la référence quant à la définition et détermination de l'exactitude et la répétabilité de positionnement.

1.6 ÉNONCÉ DES OBJECTIFS

Les recherches effectuées sur la mesure, la modélisation et la compensation d'erreur pour les axes de rotation sont moins nombreuses que pour les axes linéaires. Le développement des méthodes de mesures, qui produisent des résultats précis, servira à effectuer des recherches sur les axes de rotations.

L'objectif principal du projet actuel est le développement d'une méthode de mesure des écarts cinématiques articulaires d'un axe de rotation. Cette méthode devra produire des résultats de mesure avec une bonne précision. De plus, pour obtenir les écarts de l'axe de rotation, il faut minimiser l'effet des erreurs causées par les instruments et par le montage de mesure.

Dans ce projet de recherche, seule est considérée la mesure des erreurs cinématiques. L'utilisation de cette méthode dans le cas des erreurs d'origine thermique peut éventuellement être étudiée par la suite. Il faut considérer la présence des effets d'origine thermique lors de mesure des erreurs cinématiques. Or, certaines considérations s'appliquent dans la procédure expérimentale afin de minimiser les effets thermiques.

Afin de réaliser l'objectif mentionné ci-dessus, le choix des moyens de mesure s'est fait parmi les instruments disponibles au laboratoire LRFV¹

Quant à la mesure de l'écart de positionnement, ces moyens de mesure étaient l'indexeur laser et l'autocollimateur. L'indexeur laser est déjà utilisé pour des travaux de recherche au laboratoire LRFV. L'autocollimateur est donc choisi pour connaître cet instrument et son utilité. Pourtant, il est toujours possible d'utiliser

¹ Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle

l'indexeur laser dans la recherche au cas où l'autocollimateur ne serait pas disponible.

À l'aide des capteurs capacitifs et d'une cible à deux billes, on mesure les autres composants linéaires d'erreur et ensuite on calcule les écarts angulaires.

Les écarts mesurés de l'axe de rotation par cette méthode servent à la modélisation et à la compensation de ces écarts dans des travaux futurs.

1.7 HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

La mesure des écarts d'un axe d'articulation comprend tous les types d'erreurs discutées ci-dessus de même que les erreurs provenant des instruments de mesure. Il est donc essentiel de minimiser l'effet des autres sources d'erreur de la machine-outil et de connaître et de maîtriser les erreurs de l'instrumentation.

Parmi les sources importantes d'erreur dans une machine-outil, on trouve l'effet d'origine thermique. Afin de minimiser ces effets dans les écarts mesurés de l'axe de rotation, le mouvement des axes est réalisé sans usinage ou contraintes et sans réaliser des déplacements continus qui entraînent le réchauffement des articulations. Le déplacement de l'axe se fait à basse vitesse et en observant un délai entre deux positions.

En répétant la prise de mesure et en prenant la moyenne des mesures on minimise l'effet des erreurs aléatoires. Par conséquent, les défauts des articulations sont présentés par une erreur systématique reproductible laquelle peut être mesurée et corrigée.

2. THÉORIE ET MÉTHODE DE MESURE

Ce chapitre présente d'abord les instruments de mesure utilisés ainsi que la théorie pour le traitement des résultats de mesure afin d'obtenir les six composants d'écart cinématique articulaire d'un axe de rotation. La procédure expérimentale est ensuite présentée.

2.1 MESURE PAR AUTOCOLLIMATEUR

On considère l'écart de positionnement angulaire comme l'un des principaux écarts cinématiques de l'axe de rotation. Une fois l'écart de positionnement angulaire mesuré, il est normalement possible de le compenser en définissant des paramètres de compensation dans l'armoire de commande de la machine-outil.

Dans cette recherche, on utilise un autocollimateur pour la mesure de l'écart de positionnement angulaire. Un autocollimateur détecte les petits déplacements angulaires d'un miroir par un faisceau optique (Figure 2.1.1). Il contient une lentille et un réticule illuminé. L'image d'un objet illuminé, positionné sur le plan focal arrière de la lentille de l'autocollimateur, est projetée à l'infini et ensuite reflétée par le miroir. Un récepteur sensible à la lumière reçoit cette image. Une légère altération de l'angle entre l'axe optique de l'autocollimateur et la normal au miroir cause une déviation laquelle est mesurée avec précision.

L'autocollimateur électronique mesure précisément les déviations angulaires jusqu'à la fraction d'arc seconde (0.005 arcsec)¹.

La Figure 2.1.1 montre le schéma d'un autocollimateur dans un plan et avec un seul encodeur. Cet encodeur mesure la déviation angulaire du miroir autour de l'axe Z présenté sur cette figure. Ayant un deuxième encodeur normal au plan XY, l'autocollimateur permet de mesurer une deuxième déviation angulaire du miroir autour de l'axe Y.

¹ Voir l'annexe A

Le montage de mesure doit nous permettre d'associer l'écart de positionnement angulaire à une des deux déviations mesurées par l'autocollimateur.

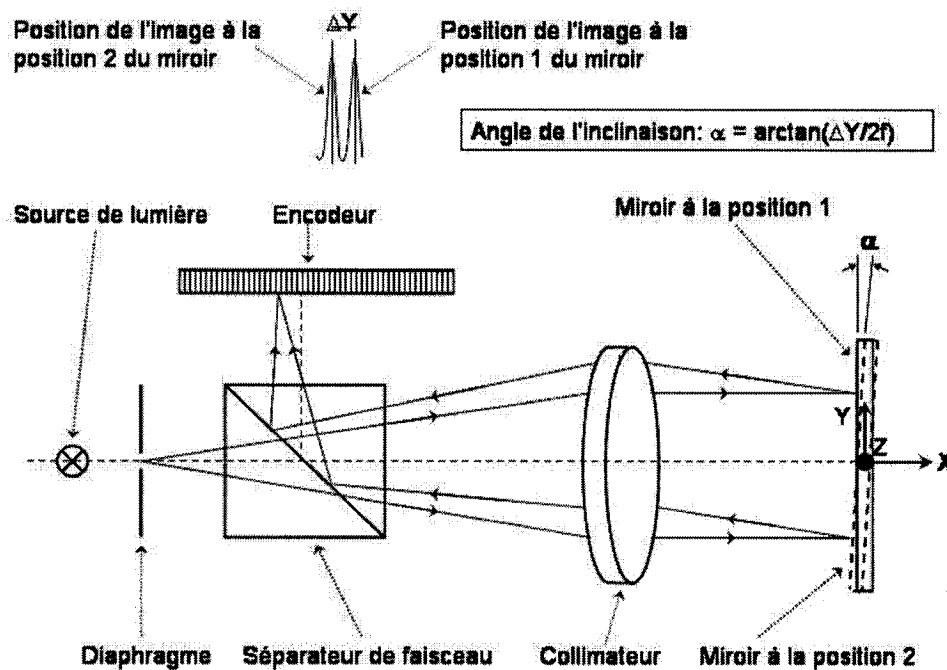


Figure 2.1.1 - Principe de mesure par autocollimateur¹

2.1.1 Montage de mesure par autocollimateur

Afin de mesurer l'écart de positionnement angulaire, un polygone avec des miroirs précisément fixés sur ses faces, est monté sur la table de la machine-outil. Puis, l'autocollimateur se positionne normal au plan du miroir, qui est considéré immobile par rapport à l'axe de rotation, de telle sorte que le faisceau optique soit perpendiculaire à l'axe de symétrie du polygone (Figure 2.1.2). Ensuite, la table est

¹ Site web de la compagnie Moeller-Wedel (<http://www.moeller-wedel-optical.com>)

mise à des positions angulaires différentes pour mesurer la déviation angulaire de chaque miroir à l'aide de l'autocollimateur.

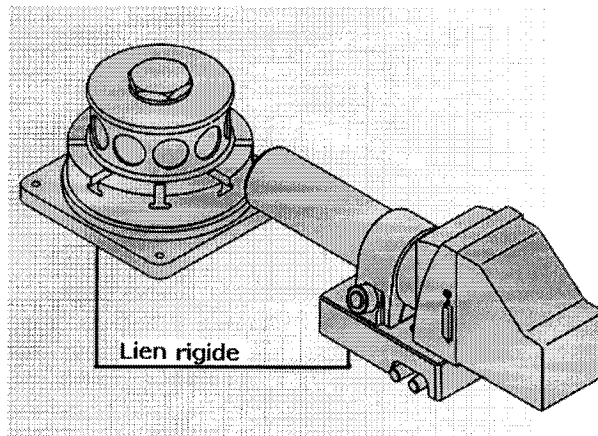


Figure 2.1.2 - Schéma du montage d'autocollimateur¹

Certaines précautions doivent être prises pour obtenir une bonne qualité de mesure. À titre d'exemple, si le polygone ne s'attache pas parfaitement sur la table, il peut y avoir une rotation libre par rapport à la table quand la position angulaire de la table change. Cette rotation libre introduit une erreur de mesure qui doit être minimisée en s'assurant que le polygone ne se déplace pas par rapport à la table.

L'annexe A présente le protocole d'utilisation. Ce protocole explique les alignements et les réglages nécessaires au montage de mesure. Cependant, nous allons procéder à une étude des désalignements du montage qui nous permet de connaître leur effet sur la mesure en plus de suggérer une façon de les compenser.

2.1.2 Erreurs de désalignement du montage

À cause des ajustements qui se font manuellement et de l'imperfection des composants, le réglage du montage de mesure n'est pas parfait. Les écarts du

¹ Site web de la compagnie Moeller-Wedel (<http://www.moeller-wedel-optical.com>)

montage peuvent introduire des erreurs dans les mesures. Dans cette section, on étudie l'effet potentiellement néfaste de trois types de désalignement:

- Effet du désalignement angulaire du polygone par rapport à l'axe de rotation:

Si, dans le montage de mesure, l'axe de symétrie du polygone n'est pas parallèle avec l'axe de rotation (Figure 2.1.3), une erreur sinusoïdale s'introduit dans les résultats de mesure selon l'Équation 2.1.1. Dans cette équation α_p est l'angle de désalignement du polygone et α_m la valeur mesurée par l'autocollimateur. Un alignement manuel du polygone sur la table rotative peut minimiser cette erreur. Un filtrage mathématique peut aussi enlever cet effet sinusoïdal des résultats de mesure.

$$\alpha_m = 2\alpha_p \cos(\theta) \quad (\text{Équation 2.1.1})$$

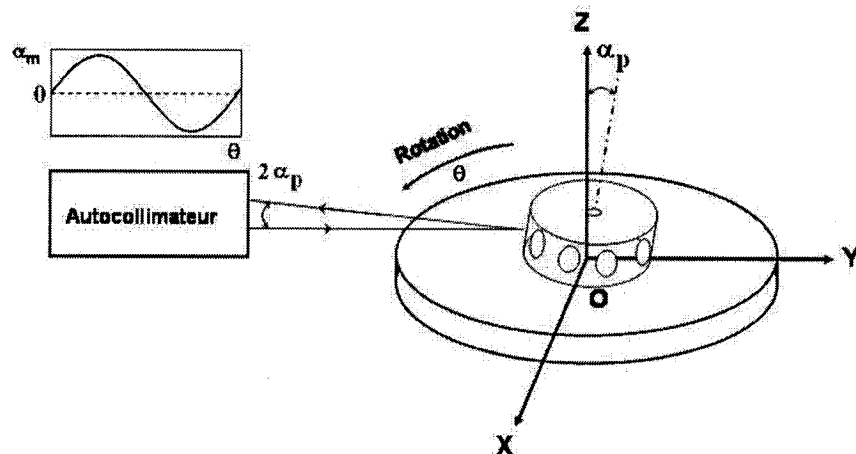


Figure 2.1.3 - Désalignement de l'axe du polygone

- Effet de décalage linéaire du polygone par rapport à l'axe de rotation :

Le décalage linéaire de l'axe de symétrie du polygone par rapport à l'axe de rotation (Figure 2.1.4) n'introduit pas d'erreur de mesure (Équation 2.1.2) car pour un miroir plat, ce décalage ne cause pas la déviation du faisceau optique réfléchi.

$$\alpha_m = 0 \quad (\text{Équation 2.1.2})$$

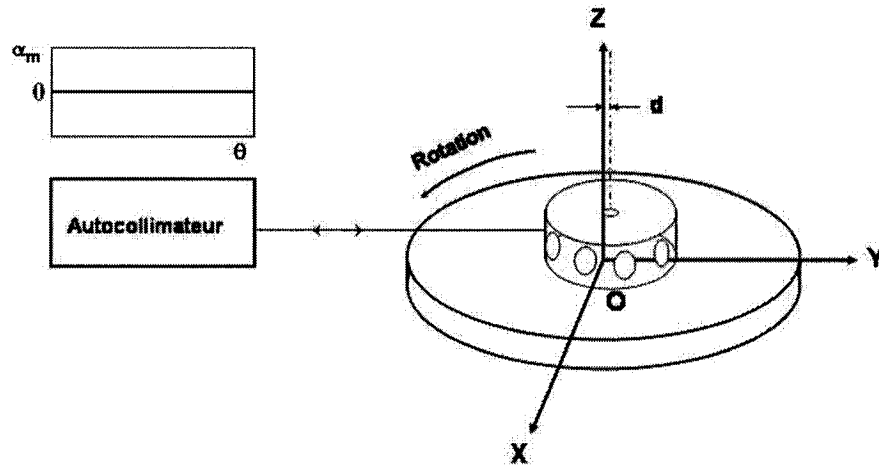


Figure 2.1.4 - Décalage linéaire de l'axe du polygone

- Désalignement du faisceau :

Supposons le parallélisme de l'axe de symétrie du polygone et l'axe de rotation de la table. Comme présenté à la Figure 2.1.5, le désalignement du faisceau par rapport à l'axe (α_A) cause un biais dans les valeurs mesurées. Cette erreur reste constante à toutes les positions angulaires de mesure (Équation 2.1.3). Cependant, elle peut être corrigée en présentant l'écart de chaque position relativement à une position donnée, par exemple la position initiale.

$$\alpha_m = 2\alpha_A$$

(Équation 2.1.3)

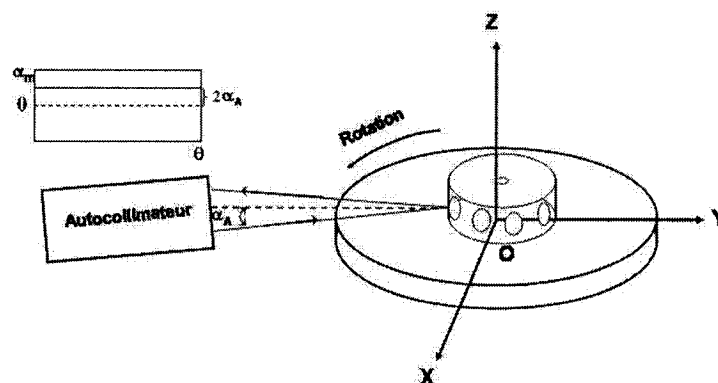


Figure 2.1.5 - Désalignement de l'autocollimateur

2.2. MESURE PAR CAPTEURS CAPACITIFS

Un montage de mesure basé sur l'utilisation des capteurs capacitifs mesure les cinq autres écarts de l'axe de rotation dont trois sont linéaires (ε_x , ε_y et ε_z) et deux sont angulaires (γ_x , γ_y). Ce dispositif commercialement vendu pour l'analyse de broche [13], comprend cinq capteurs capacitifs et une cible à deux billes. Les capteurs s'installent sur un support puis sont montés sur la table d'une MOCN. Ensuite, la cible à deux billes s'attache à la broche et s'aligne avec les capteurs capacitifs. Les écarts de mouvement de la broche sont ainsi mesurés et transmis à un ordinateur par un système d'acquisition des données.

Un réglage du montage est ensuite effectué pour minimiser l'excentricité causée par les désalignements du montage de mesure. La réalisation de ce réglage nécessite le déplacement des capteurs et les axes de mobilité linéaires de MOCN. Un exemple de ce montage de mesure est présenté à la Figure 2.2.1.

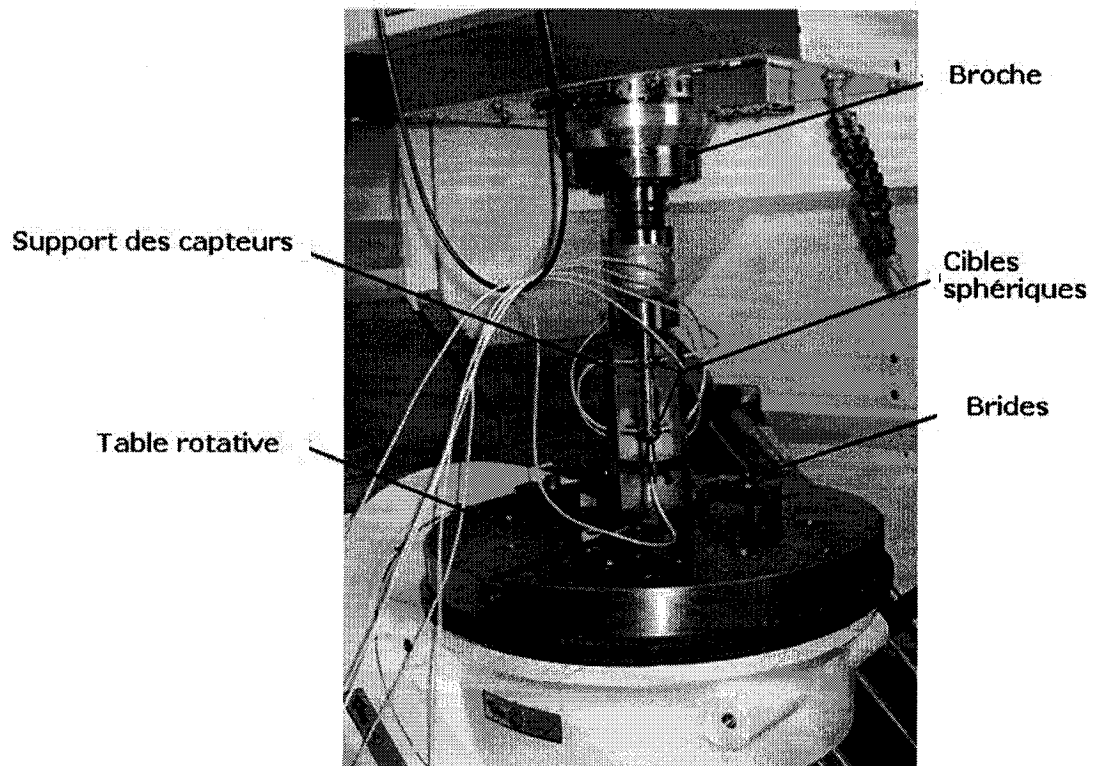


Figure 2.2.1 - Montage de mesure par des capteurs capacitifs

Afin de pouvoir calculer les écarts angulaires γ_x et γ_y , la mesure des écarts linéaires de l'axe de rotation (ε_x et ε_y) se fait à deux hauteurs différentes. Vu l'imperfection de l'ajustement du montage, il existe toujours des désalignements qui se révèlent sous forme d'un effet sinusoïdal. La section 2.2.3 de ce chapitre présente une méthode pour l'identification et le filtrage de cet effet.

Cette méthode a l'avantage d'avoir une très bonne résolution ($<0.01 \mu\text{m}$) et une bonne exactitude de mesure ($<0.1 \mu\text{m}$) grâce aux capteurs capacitifs. L'application de cette méthode est conforme aux exigences des normes pour le cas d'analyse de broche [13], ce qui donne l'avantage d'exploiter cette méthode pour une application similaire. De plus, l'assemblage du système de mesure se fait rapidement.

Par contre, dans cette application, une limite à la rotation de l'axe C s'impose à cause des fils qui connectent les capteurs au boîtier de traitement des signaux. Par conséquent, ce montage de mesure ne permet pas l'étude du comportement unidirectionnelle de l'axe C (plusieurs rotations unidirectionnelles).

Il faut aussi tenir compte des effets thermiques sur le montage de mesure. Le changement de température change les dimensions du montage et entraîne directement des erreurs de mesure. De plus, la cible en tant que référence de mesure, doit être fixe à sa position. Vu les effets d'origine thermique sur la broche ainsi que la cible, cette référence peut se déplacer. Cependant, le système de mesure ne fait pas la distinction entre les écarts cinématique de l'axe et l'écart d'origine thermique. Par conséquent, il est important de minimiser les effets d'origine thermique lors de la prise de mesure par ce montage.

L'annexe B explique le protocole d'utilisation et la méthode d'ajustement du montage des capteurs capacitifs.

2.2.2 Montage de mesure

La Figure 2.2.2 présente un schéma du montage des capteurs capacitifs et définit les axes et les coordonnées de mesure. Ce montage mesure les écarts de l'axe ξ_r , formé par les capteurs capacitifs, qui ne se coïncide pas tout à fait à l'axe C.

L'axe ξ_r demeure nominalement fixe par rapport à l'axe de rotation C. Ainsi, pour un montage avec un bon alignement l'écart entre les deux axes reste petit. Par conséquent, les déplacements relatifs (ou les écarts) de l'axe de rotation se présente par les déplacements relatifs (ou les écarts) de l'axe ξ_r .

Voici la définition des paramètres présentés à la Figure 2.2.2:

Cx, Cy, Cz, Cx_2, Cy_2 : Capteurs capacitifs.

ξ_c : Axe de rotation C de la machine-outil.

ξ_t : Axe de la cible passant par les deux centres des billes. Pour la cible attachée à la broche, cet axe est nominalement fixe.

ξ_r : Axe passant par le capteur Cz et normal au plan formé par l'axe des capteurs Cx_2 et Cy_2 .

$\{x_b, y_b, z_t\}$: Repère orienté par l'axe ξ_t dont l'origine O_t se trouve au centre de la bille supérieure.

$\{x_r, y_r, z_r\}$: Repère formé par les capteurs Cx_2, Cy_2 et Cz dont l'axe Z coïncide l'axe ξ_r .

(ρ_2, φ_2) : Coordonnées polaires du centre de la bille supérieure dans le repère $\{x_r, y_r, z_r\}$.

(ρ, φ) : Coordonnées polaires du centre de la bille inférieure dans le repère $\{x_r, y_r, z_r\}$.

θ : Position angulaire de l'axe C et par conséquent l'axe ξ_r . Elle est contrôlée à partir de l'armoire de commande de la MOCN.

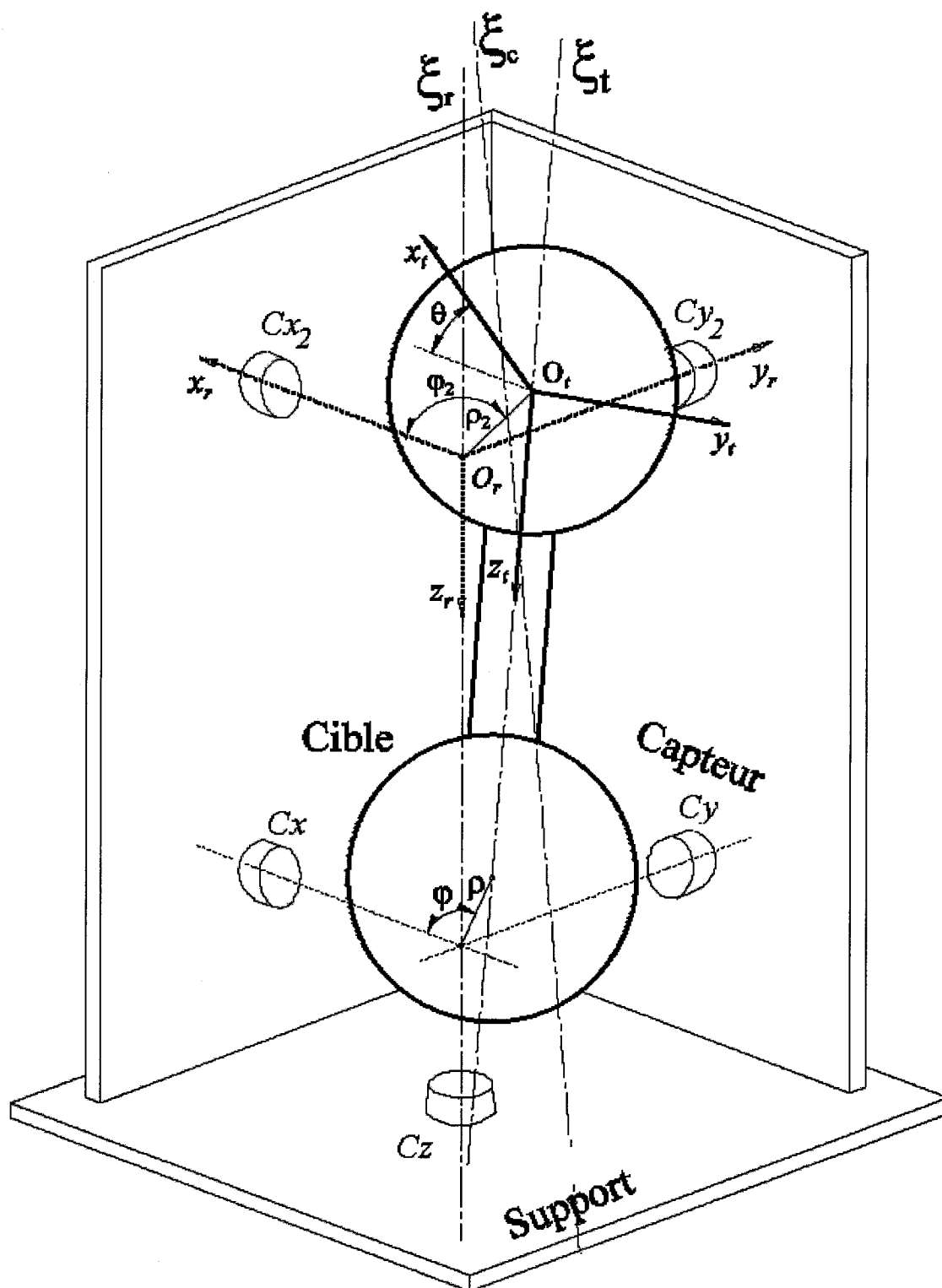


Figure 2.2.2 - Schéma du montage des capteurs capacitifs

Il est important de considérer l'effet du désalignement du montage de mesure sur les valeurs mesurées et de trouver les moyens possibles pour diminuer ou compenser ces erreurs. Ces erreurs sont;

- Erreur de parallélisme
- Erreur de circularité de la cible
- Erreur d'excentricité

Erreur de parallélisme

Tel qu'illustré à la Figure 2.2.3, le plan tangent à la face de la cible au point d'intersection entre la cible et la ligne $O_i P_c$ doit être parallèle à la face du capteur afin d'obtenir des résultats de mesure de bonne qualité. Dû au non-parallélisme entre la face du capteur et la cible, la zone exposée par le champ électrique du capteur capacitif grandit, ce qui change l'interaction du champs entre le capteur et la cible. Cette variation du champ magnétique introduit deux erreurs de mesure: le biais dans l'indication du capteur et la non linéarité et l'erreur de gain (erreur cosinus).

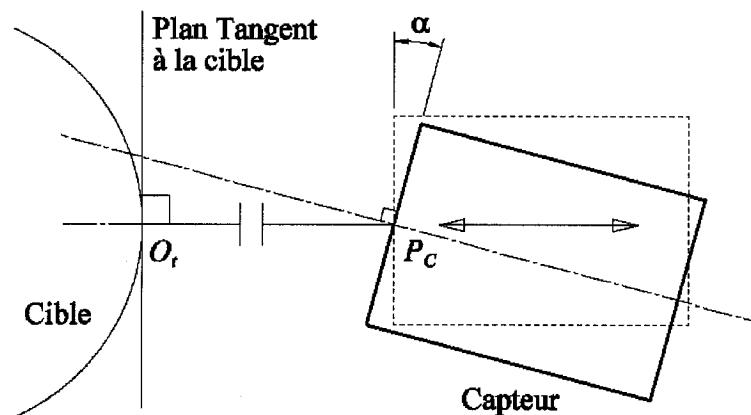


Figure 2.2.3 - Non parallélisme entre les surfaces de la cible et le capteur

Le calcul de l'écart visé par chaque capteur se fait par la différence entre l'indication du capteur et une valeur initiale qui pourrait être la valeur moyenne ou la valeur obtenue à la position initiale au début du test. Par conséquent, l'erreur de biais dans l'écart calculé a un effet négligeable. En ce qui concerne les erreurs de

linéarité et le gain, selon les essais effectués¹ sur de petites angles ($\alpha < 2^\circ$) l'erreur de linéarité et l'erreur de gain sont négligeables (Voir la Figure 2.2.4).

Erreur de circularité (sphéricité) de la cible

La forme imparfaite des deux billes de la cible a un impact sur la qualité de mesure. Par contre, la cible à deux billes utilisée dans cette recherche est rectifiée par le fabricant *Lion Precision*. Le résultat de calibration démontre que la valeur de cette erreur est moins de $0.05 \mu\text{m}$ et donc cette erreur est négligeable.

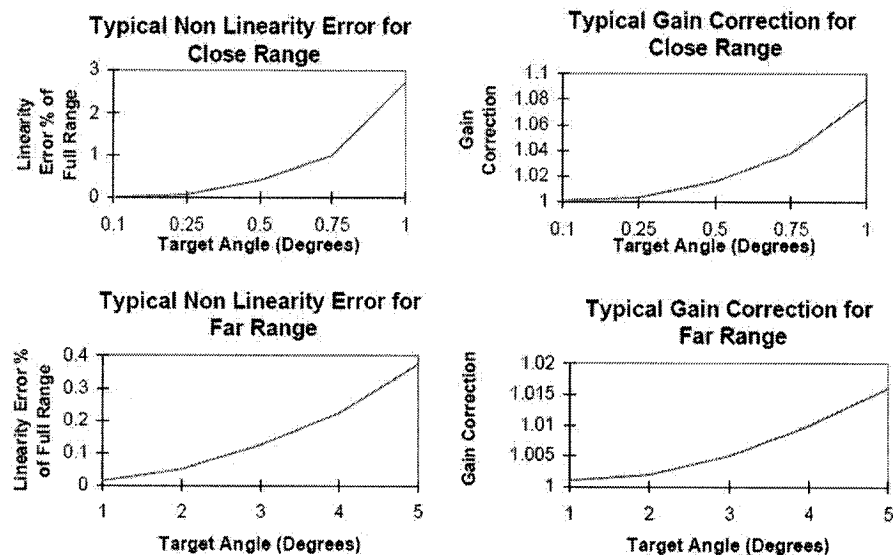


Figure 2.2.4 - L'erreur de gain et de non linéarité¹

Erreur d'excentricité

Quand le centre de la cible ne se trouve pas parfaitement posé sur l'axe de rotation, il se produit une excentricité (ρ, ϕ) . Le capteur est placé à une distance L nominalement constante et à une position angulaire θ de l'axe de rotation (Figure

¹ Site web de la compagnie ADETECH (<http://www.adetech.com/>)

2.2.5). Vu cette excentricité, la distance entre le capteur et la cible varie en fonction de θ .

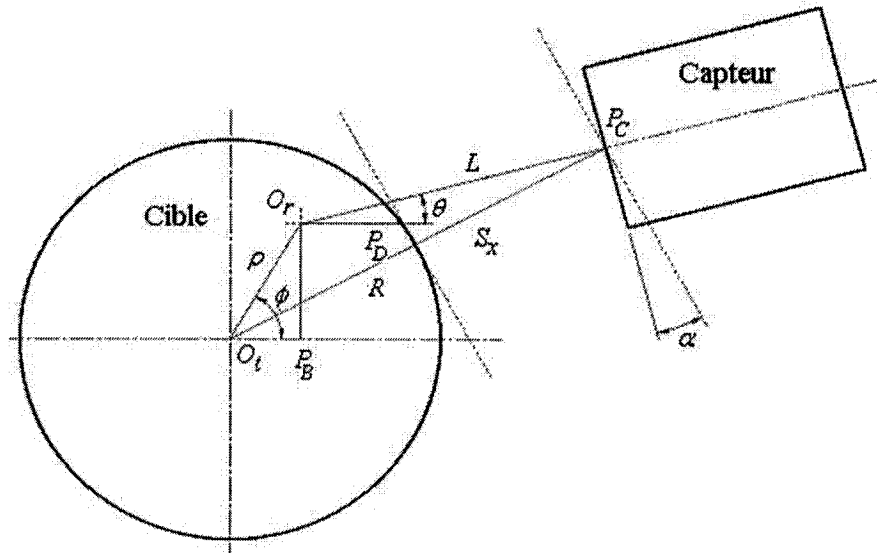


Figure 2.2.5 - Excentricité entre la cible et le capteur

L'excentricité cause deux erreurs de mesure :

- L'erreur du parallélisme entre la face du capteur et le plan tangent à la surface de la bille au point d'intersection de l'axe $O_r P_C$ et la surface. Nous allons démontrer que cette erreur est négligeable (Figure 2.2.4) lorsque $\alpha < 2^\circ$.
- L'erreur de distance: Comme indiqué à la Figure 2.2.5, S_x est équivalent à l'indication du capteur pour une excentricité nulle. À cause d'excentricité, le capteur indique une valeur dite S_x' différente de S_x .

Il faut d'abord vérifier la possibilité de négliger l'erreur du parallélisme pour ce montage de mesure. Dans ce cas, il restera à corriger l'erreur de distance due à l'excentricité.

Selon la Figure 2.2.5, l'angle α est calculé à l'aide du triangle $O_t O_r P_C$ comme suit :

$$\angle O_t O_r P_C = \pi - (\varphi - \theta) = \pi + \theta - \varphi \quad \text{Équation (2.2.1)}$$

$$\angle O_r O_t P_C = \pi - \angle O_t O_r P_C - \angle O_r P_C O_t \quad \text{Équation (2.2.2)}$$

Donc :

$$\angle O_r O_t P_C = \pi - (\pi + \theta - \varphi) - \alpha \quad \text{Équation (2.2.3)}$$

Ou :

$$\angle O_r O_t P_C = \varphi - \theta - \alpha \quad \text{Équation (2.2.4)}$$

Dans le triangle $O_t O_r P_C$:

$$\rho \sin(\angle O_r O_t P_C) = L \sin \alpha \quad \text{Équation (2.2.5)}$$

À l'aide de l'équation 2.2.4, l'équation 2.2.5 se réécrit comme :

$$\rho \sin(\varphi - \theta - \alpha) = L \sin \alpha \quad \text{Équation (2.2.6)}$$

La résolution de l'équation ci-dessus donne l'angle α :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\rho \sin(\varphi - \theta)}{L + \rho \cos(\varphi - \theta)} \right) \quad \text{Équation (2.2.7)}$$

L'angle α pourrait atteindre une valeur maximale si

$$\sin(\varphi - \theta) = 1 \quad \text{Équation (2.2.8)}$$

Dans ce cas :

$$\alpha_{\max} = \tan^{-1} \left(\frac{\rho}{L} \right) \approx \frac{\rho}{L} \quad \text{Équation (2.2.9)}$$

Dans le montage de mesure, on utilise une pièce de centrage afin de minimiser la déviation entre l'axe des capteurs et l'axe de rotation. De plus, on ajuste la position de la cible afin de minimiser l'excentricité entre l'axe de la cible et l'axe de rotation. Par conséquent, les valeurs d'excentricité des billes inférieures et supérieures (ρ_2 et ρ) deviendront très petites par rapport à L . À titre d'exemple les valeurs de ρ et L obtenues dans un montage de mesure sont $L \cong 12950 \mu\text{m}$ et $\rho \cong 100 \mu\text{m}$.

Donc :

$$\alpha_{\max} = 0,0078 \text{ rad} \quad \text{Équation (2.2.10)}$$

Puisque cet angle est très petit, on peut négliger l'erreur de parallélisme (Figure 2.2.4) et donc estimer la valeur mesurée par S_x , autrement dit, le capteur est visé vers le centre de la bille (O_t).

Il reste à corriger l'effet d'excentricité qui cause une erreur sur la distance mesurée par le capteur. Ensuite, cette erreur est filtrée des résultats de mesure par la méthode expliquée à la section suivante.

2.2.3 Filtrage par modèle¹

La géométrie imparfaite des composants et le désalignement dans le montage des capteurs capacitifs sont des sources possibles d'erreur. Parmi ces sources d'erreur, l'excentricité du montage a un effet important sur les résultats de mesure.

À la fin de la section 2.2.2, nous avons abordé l'étude sur l'effet de l'excentricité du montage. Nous avons trouvé l'indication du capteur pour un montage excentrique (S_x). Le but est d'isoler l'effet de l'excentricité (ρ, φ) de la valeur S_x mesurée par le capteur afin de trouver la distance L entre le capteur et le centre de rotation O_r .

La distance L entre le capteur et le centre de l'axe de rotation se calcule par la géométrie du triangle $O_t O_r C$ comme :

$$(R + S_x)^2 = \rho^2 + L^2 - 2\rho L \cos(\pi + \theta - \varphi) \quad \text{Équation (2.2.11)}$$

On réécrit l'équation ci-dessus comme :

$$L^2 - 2\rho L \cos(\pi + \theta - \varphi) - ((R + S_x)^2 - \rho^2) = 0 \quad \text{Équation (2.2.12)}$$

Par la racine de l'équation (2.2.12) on obtient la variable L :

$$L = -\rho \cos(\theta - \varphi) + (R + S_x) \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{R + S_x}\right)^2 \sin^2(\theta - \varphi)} \quad \text{Équation (2.2.13)}$$

¹ Model based filtering

Puisqu'en faisant un ajustement manuel du montage de mesure on minimise l'excentricité ρ , elle est donc relativement très petite par rapport au rayon de la cible, R . L'excentricité maximum trouvée dans les montages effectués dans cette recherche reste inférieure à 100 μm tandis que L (ou $R+S_x$) a une valeur supérieure 12750 μm . Ce qui permet de dire : $\rho \ll R$

$$\left(\frac{\rho}{R+S_x}\right)^2 \ll 1 \quad \text{Équation (2.2.14)}$$

Ceci permet d'exprimer l'équation (2.2.12) comme :

$$L \cong R + S_x - \rho \cos(\theta - \varphi) \quad \text{Équation (2.2.15)}$$

L'équation 2.2.15 permet de calculer la distance entre un capteur et l'axe de la cible tout en enlevant l'effet de l'excentricité de la cible et le rayon de la cible. L'équation ci-dessus trois parties:

1. La partie constante (R) représentant le rayon de la cible.
2. L'indication du capteur (S_x).
3. Un effet sinusoïdal causé par l'excentricité (ρ, φ) entre le centre de rotation et le centre de la cible.

Dans l'équation (2.2.14) l'indication du capteur S_x et l'angle de rotation de l'axe θ sont les valeurs connues et l'excentricité (ρ, φ) pour chaque bille et la distance L les valeurs inconnues.

La distance L entre le capteur et le centre de rotation est calculée à chaque position angulaire. Nous sommes intéressés à connaître la variation de distance L car celle-ci représente l'écart linéaire ε visé par un capteur. Autrement dit, la distance L comprend une valeur nominale L_0 et un écart linéaire ε qui représente la variation de distance entre le capteur et la cible.

$$L = L_0 + \varepsilon \quad \text{Équation (2.2.16)}$$

Le but principal dans cette section est de calculer ces écarts linéaires ε visés chacun par un capteur, afin de trouver les écarts de l'axe de rotation C.

Puisqu'à plusieurs positions angulaires θ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) on enregistre l'indication du capteur, on réécrit l'équation (2.2.15) comme:

$$L_i = R + S_{xi} - \rho \cos(\theta_i - \varphi) \quad \text{Équation (2.2.17)}$$

où i est l'identificateur de position angulaire ($i = 1, 2, \dots, n$)

Pourtant, le centre d'excentricité a la possibilité de se déplacer pendant l'essai, cela cause la variation de la position nominale L' . Ce dernier peut rendre les résultats erronés si le centre d'excentricité est considéré fixe tout au cours de l'essai.

À chaque rotation complète, l'équation 2.2.17 se réécrit comme :

$$L_i^k = R + S_{xi}^k - \rho^k \cos(\theta_i - \varphi^k) \quad \text{Équation (2.2.18)}$$

Où i : l'identificateur de position angulaire ($i = 1, 2, \dots, n$) et

k : l'identificateur de répétition de l'essai ($k = 1, 2, \dots, m$)

Une fois la distance L_i entre un capteur et l'axe de rotation obtenue, on peut calculer l'écart ε_i visé par ce capteur.

$$\varepsilon_i^k = L_i^k - L_0^k \quad \text{Équation (2.2.19)}$$

Une valeur est associée à la distance nominale L_0 de cette équation, par exemple la valeur L à la position initiale au début de l'essai.

À chaque prise de mesure, il y a trois inconnus dans l'équation 2.2.18 qui sont : L_i , ρ et φ . À la section suivante, nous allons trouver une solution pour estimer ces trois inconnus à partir des valeurs mesurées à plusieurs positions angulaires.

2.2.4 Calcul des écarts de l'axe rotatif

Cinq capteurs, nommés Cx_2 , Cy_2 , Cx , Cy et Cz , sont utilisés pour calculer les écarts linéaires (ε_x , ε_y et ε_z) et angulaires (γ_x et γ_y) de l'axe de rotation.

On utilise l'équation (2.2.18) pour calculer la distance L de chaque capteur à la cible adjacente. Donc, il faut trouver les valeurs inconnues L , ρ et φ . Cependant, pour les capteurs Cx_2 et Cy_2 les valeurs ρ et φ sont identiques car ils visent la même cible. Ainsi pour les capteurs Cx_2 et Cy_2 une même situation se produit. Pour le capteur Cx_2 l'équation (2.2.18) peut être réécrite comme:

$$S_{x2i}^k = L_{x2i}^k - R + \rho_2^k \cos(\theta_i - \varphi_2^k) \quad \text{Équation (2.2.20)}$$

Puisque le capteur Cy_2 positionné à 90° du capteur Cx_2 alors:

$$S_{y2i}^k = L_{y2i}^k - R + \rho_2^k \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i + \varphi_2^k\right) \quad \text{Équation (2.2.21)}$$

Donc:

$$S_{y2i}^k = L_{y2i}^k - R + \rho_2^k \sin(\theta_i - \varphi_2^k) \quad \text{Équation (2.2.22)}$$

En fusionnant les équations (2.2.20) et (2.2.22) ensemble dans une forme complexe :

$$S_{x2i}^k + jS_{y2i}^k = (L_{x2i}^k + jL_{y2i}^k) - (R + jR) + \rho_2^k (\cos(\theta_i - \varphi_2^k) + j\sin(\theta_i - \varphi_2^k)) \quad \text{Équation (2.2.23)}$$

$$S_{x2i}^k + jS_{y2i}^k = (L_{x2i}^k - R) + j(L_{y2i}^k + R) + \rho_2^k e^{j(\theta_i - \varphi_2^k)} \quad \text{Équation (2.2.24)}$$

$$S_{2i}^k = \chi_{2i}^k + \rho_2^k e^{j(\theta_i - \varphi_2^k)} \quad \text{Équation (2.2.25)}$$

Où:

$$S_{2i}^k = S_{x2i}^k + jS_{y2i}^k \quad \text{Équation (2.2.26-a)}$$

Ainsi

$$\chi_{2i}^k = (L_{x2i}^k - R) + j(L_{y2i}^k + R) \quad \text{Équation (2.2.26-b)}$$

Il en va de même pour les capteurs Cx et Cy .

$$S_i^k = \chi_i^k + \rho_1^k e^{j(\theta_i - \varphi_1^k)} \quad \text{Équation (2.2.27)}$$

Les équations (2.2.25) et (2.2.27) ont l'avantage d'avoir la possibilité de découpler la valeur connue θ de la valeur inconnue φ dans le terme exponentiel. Cela facilite le développement d'une solution par la méthode des moindres carrée.

L'équation (2.2.25) se présente aussi sous la forme matricielle ci-dessous :

$$\begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ s_n \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\theta_0} \\ 1 & e^{j\theta_1} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 1 & e^{j\theta_n} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \chi^k \\ \rho^k e^{-j\varphi^k} \end{Bmatrix} \quad \text{Équation (2.2.28)}$$

Où : $k = 1, 2, \dots, m$

et:

$$V_s^k = A \times P^k, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\theta_0} \\ 1 & e^{j\theta_1} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 1 & e^{j\theta_n} \end{bmatrix}, \quad P^k = \begin{Bmatrix} \chi^k \\ \rho^k e^{-j\varphi^k} \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad V_s^k = \begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ s_n \end{Bmatrix}^k$$

La matrice A et la matrice colonne V_s contiennent les valeurs connues et le vecteur P contient les inconnues. Si $\det(A^T A) \neq 0$, la solution de l'équation 2.2.28 donne le vecteur des inconnus P^k .

$$P^k = (A^T A)^{-1} \times (A^T V_s^k) \quad \text{Équation (2.2.29)}$$

Une fois la valeur χ du vecteur P connue, il sera possible de calculer la distance L entre chaque capteur et l'axe de rotation et donc les écarts de l'axe de rotation vus par chaque capteur comme:

$$\varepsilon_{x2i}^k = L_{x2i}^k - L_{x20}^k \quad \text{Équation (2.2.30a)}$$

$$\varepsilon_{y2i}^k = L_{y2i}^k - L_{y20}^k \quad \text{Équation (2.2.30b)}$$

$$\varepsilon_{xi}^k = L_{xi}^k - L_{x0}^k \quad \text{Équation (2.2.30c)}$$

$$\varepsilon_{yi}^k = L_{yi}^k - L_{y0}^k \quad \text{Équation (2.2.30d)}$$

Dans le cas de capteur C_z , l'excentricité du montage introduit un biais dans les valeurs mesurées. Ce biais est enlevé quand on calcule l'écart ε_z par rapport à une valeur donnée, par exemple l'écart ε_z à la position initiale:

$$\varepsilon_{zi}^k = S_{zi}^k - S_{z0}^k \quad \text{Équation (2.2.31)}$$

Considérons le repère nommé $\{x_r, y_r, z_r\}$ formé par les capteurs C_{x2} , C_{y2} et C_z (voir Figure 2.2.2). Puisque les capteurs sont attachés à la table rotative, dans ce repère rotatif on définit les écarts mesurés par ces capteurs.

Les écarts ε_{y2} et ε_y servent à calculer l'écart angulaire γ_x en sachant la distance L_C entre les deux capteurs :

$$\gamma_{xi}^k \cong (\varepsilon_{y2i}^k - \varepsilon_{yi}^k) / L_C \quad \text{Équation (2.2.32)}$$

Il en va de même pour calculer l'écart angulaire γ_y :

$$\gamma_{yi}^k \cong (\varepsilon_{x2i}^k - \varepsilon_{xi}^k) / L_C \quad \text{Équation (2.2.33)}$$

2.2.5 Présentation des écarts dans des coordonnées fixes

Il est possible d'exprimer les écarts de l'axe de rotation dans un repère fixe dont le centre est situé sur le centre de la bille supérieure (vis-à-vis des capteurs C_{x2} et C_{y2}) et les axes X_t et Y_t dans la même direction que les axes d'articulation X et Y de la MOCN.

La présentation des écarts dans le repère fixe est nécessaire pour effectuer une comparaison entre l'écart d'inclinaison angulaire γ_y mesuré par l'autocollimateur et des capteurs capacitifs.

La Figure 2.2.6 présente ces deux repères:

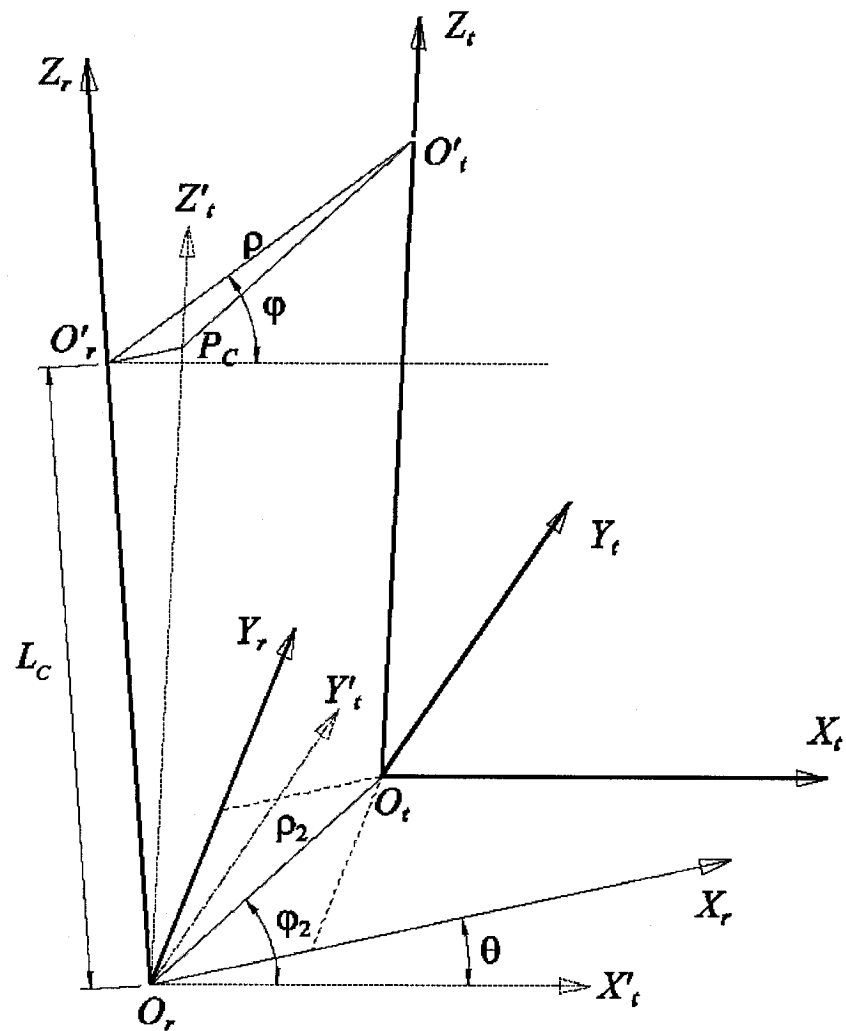


Figure 2.2.6 - Transformation entre les repères $\{x_r, y_r, z_r\}$ et $\{x_t, y_t, z_t\}$

Soient (ν_x , ν_y et ν_z) les angles Euler avec lesquelles on utilise une transformation homogène, les écarts articulaires de l'axe C dans un repère fixe $\{x_t, y_t, z_t\}$ sont calculés comme suit :

$${}^t \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = R_x R_y R_z {}^r \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad \text{Équation (2.2.34)}$$

Où

$${}^t \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} : \text{les écarts dans le repère fixe}$$

$${}^r \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} : \text{les écarts dans le repère rotatif}$$

R_x, R_y et R_z : les matrices de rotation

Selon la géométrie du montage (Figure 2.2.2), les angles d'Euler (ν_x , ν_y et ν_z) se calculent comme:

$$\nu_x = \tan^{-1} \left(\frac{\rho \sin(\varphi - \theta) - \rho_2 \sin(\varphi_2 - \theta)}{L_C} \right) \quad \text{Équation (2.2.35a)}$$

$$\nu_y = \tan^{-1} \left(\frac{\rho \cos(\varphi - \theta) - \rho_2 \cos(\varphi_2 - \theta)}{L_C} \right) \quad \text{Équation (2.2.35b)}$$

et :

$$\nu_z = \theta \quad \text{Équation (2.2.35c)}$$

2.3 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Cette section décrit les procédures et les techniques expérimentales utilisées pour la mesure des écarts articulaire de l'axe de rotation en utilisant l'autocollimateur et le montage des capteurs capacitifs. Pour connaître le matériel utilisé et les protocoles d'utilisation de ces instruments de mesure, il est recommandé de voir les annexes A et B. Ce chapitre discute les essais à effectuer et les conditions expérimentales.

2.3.1 Description des essais expérimentaux

Les écarts articulaires de l'axe de rotation C sont mesurés sur deux machines-outils par l'utilisation d'un autocollimateur et de capteurs capacitifs. L'étude de ces écarts mesurés nous permet d'évaluer la méthode de mesure proposée quant à la répétabilité et l'exactitude ainsi que de connaître les avantages et désavantages de cette méthode de mesure.

Les machines-outils utilisées pour la mesure des écarts de l'axe C exploitent des technologies d'entraînement différentes. La table rotative d'une de ces machines-outils est actionnée par un moteur couple tandis que l'autre machine-outil utilise un système de pignons et vis sans fin. Le tableau suivant présente une description des axes C des machines-outils étudiées dans cette recherche:

Tableau 2.3.1 - Spécification des tables rotatives utilisées dans cette étude

Caractéristiques	Modèle	
	HURON KX8-FIVE	MITSUI SEIKI HU-40
Axe de rotation C	Horizontale /couple	Verticale /pignons et vis sans fin
Vitesse maximale	50 rpm	20 rpm
Dimension	Ø500 mm	400 mm × 400 mm (4 palettes)

Des programmes en code G ont été écrits pour le déplacement de l'axe rotatif C, selon le trajet prévu à chaque essai. Ces programmes sont aussi écrits conformément au type de contrôleur utilisé pour la machine-outil à étudier (voir l'annexe E).

Pour minimiser les effets d'origine thermique dans les mesures, on s'assure que l'environnement thermique de la machine respecte les spécifications données par le fabricant. Avant la prise de mesure, des mouvements de préchauffage ont été exécutés puisque la température de la machine s'élèvera lors du fonctionnement.

Entre chaque prise de mesure, on introduit une pause par le logiciel d'acquisition des données ainsi que par le programme code G. Cela dans le but de garder un équilibre thermique dans la machine et d'éviter un échauffement de la table à cause des mouvements. De plus, tous les essais s'effectuent sur la machine non chargée.

Les deux machines-outils énumérées au Tableau 2.3.1 ont la possibilité de mesurer la température de l'axe de rotation. Cela permet de vérifier les changements thermiques dans la table rotative.

2.3.2 Description des essais par l'autocollimateur

Avant de procéder à la prise de mesures par l'autocollimateur, il faut effectuer le zéro machine. Ensuite l'installation et l'ajustement de l'autocollimateur sont effectués selon le protocole d'utilisation (voir annexe A). Cet annexe présente les spécifications d'autocollimateur, ainsi que la charte d'étalonnage du miroir polygonal et d'autocollimateur.

L'autocollimateur nous permet d'obtenir deux écarts: celui du positionnement angulaire (γ_z) et l'inclinaison angulaire par rapport à une axe perpendiculaire à la direction du faisceau optique d'autocollimateur (γ_x ou γ_y). On utilise la norme ISO-230-2:1997 [10] comme référence afin de définir une majeure partie des essais. Deux étapes sont considérées dans ce test: d'abord on tourne la table plusieurs fois dans la même direction afin de voir si les écarts à chaque position angulaire varient d'un tour à l'autre. Ensuite, on étudie le déplacement de la table dans une plage de 360° afin de voir l'effet de jeu d'inversion sur le positionnement angulaire de la table.



Figure 2.3.1 - Schéma du montage de mesure par l'autocollimateur

Positionnement unidirectionnel

Cet essai nous permet de voir la variation des écarts de l'axe de rotation à plusieurs tours sans être influencé par l'effet du jeu d'inversion. On effectue cet essai dans les deux directions: d'abord dans la direction positive jusqu'à l'accomplissement du mouvement de 10 rotations et ensuite dans la direction négative de l'axe rotatif jusqu'à la position initiale (0°). Le Tableau 2.3.2 présente les conditions de cet essai. La Figure 2.3.2 présente le schéma de cet essai.

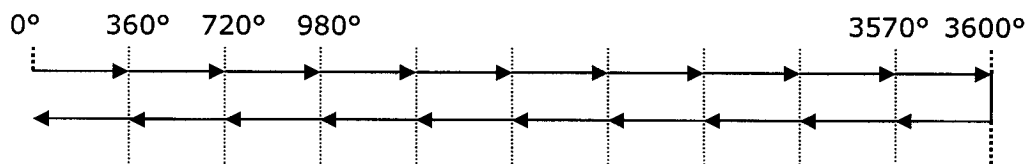


Figure 2.3.2 - Schéma de l'essai unidirectionnel par l'autocollimateur

Tableau 2.3.2 - Conditions d'essais unidirectionnels par autocollimateur

	Paramètre	Valeur	Description
1	Plage visée de l'axe C	0 à 360°	
2	Type de test	Unidirect.	Direction (+) et ensuite (-)
3	Nombre de rotations complètes	10	
4	Distance entre les points visés	30°	Limité par le polygone à 12
5	Le temps d'attente à chaque	10 sec	
6	Vitesse d'avance	$\cong 1$ RPM	
7	Compensation machine	OFF	
8	Le temps estimé	$\cong 25$ min	

Positionnement bidirectionnel

Cet essai sert à évaluer le jeu d'inversion pour l'axe de rotation C. On considère une distance de 30° avant et à la fin de chaque déplacement afin de s'assurer que le premier et le dernier miroirs sont approchés dans la direction correcte. Cette distance est nommée 'la distance de dépassement' (Voir le Tableau 2.3.3 et la Figure 2.3.3).

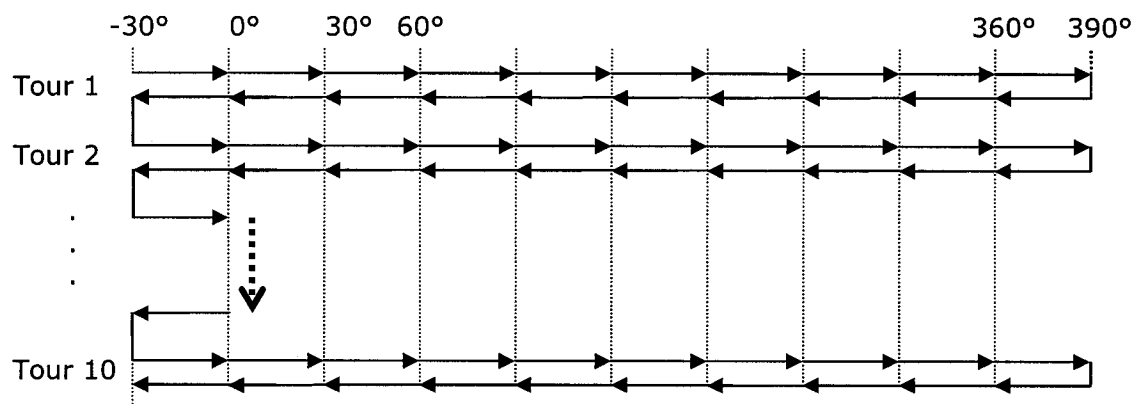


Figure 2.3.3 - Schéma de l'essai bidirectionnel par l'autocollimateur

Tableau 2.3.3 - Conditions d'essai bidirectionnel par autocollimateur

	Paramètre	Valeur	Description
1	Plage visée de l'axe C	0 à 360°	
2	Type de test	Bidir.	
3	Nombre d'essais dans chaque sens	10	
4	Angle de renversement du cycle	30°	Au début et à la fin du cycle
5	Distance entre les points visés	30°	Limité par le polygone à 12 faces
6	Le temps d'attente à chaque position	10 sec	
7	Vitesse d'avance	≈ 1 RPM	
8	Compensation machine	OFF	
9	Le temps estimé	≈ 30 min	

2.3.3 Description des essais par le montage des capteurs capacitifs

L'ensemble des capteurs capacitifs et la cible à doubles billes nous permettent d'obtenir trois écarts linéaires (ε_x , ε_y et ε_z) et deux écarts angulaires (γ_x et γ_y). Ces écarts sont définis dans le repère rotatif $\{X_r, Y_r, Z_r\}$ dont les axes X_r , Y_r et Z_r se trouvent dans la direction que les capteurs Cx_2 , Cy_2 et Cz .

Les conditions de ces essais ressemblent à ceux réalisés avec l'autocollimateur, pourtant les fils des capteurs connectés au boîtier de traitement des signaux, ne permettent pas la réalisation des déplacements angulaires supérieurs à 370°. En conséquence, certaines modifications s'appliquent à la condition de ces essais par capteurs capacitifs. Cependant, ce montage de mesure nous permet de réaliser des déplacements inférieurs à 30°, ce qui n'est pas réalisable avec le montage de mesure par l'autocollimateur.

Positionnement bidirectionnel à 30°

Cet essai ressemble à l'essai bidirectionnel par l'autocollimateur et nous permet d'obtenir les cinq autres écarts de l'axe de rotation (Voir Tableau 2.3.4 et Figure 2.3.5):

Tableau 2.3.4 – Conditions d'essai bidirectionnel à 30° par capteurs capacitifs

	Paramètre	Valeur	Description
1	Plage visée de l'axe C	0 à 360°	
2	Type de test	Bidirectionnel	
3	Nombre d'essais dans chaque sens	10	
4	Angle de renversement du cycle	5°	Au début et à la fin du cycle
5	Distance entre les points visés	30°	Conformément à l'essai d'autocollimateur
6	Le temps d'attente à chaque position	10 sec	
7	Vitesse d'avance	1 RPM	
8	Compensation machine	OFF	
9	Le temps estimé	≅ 90 min	

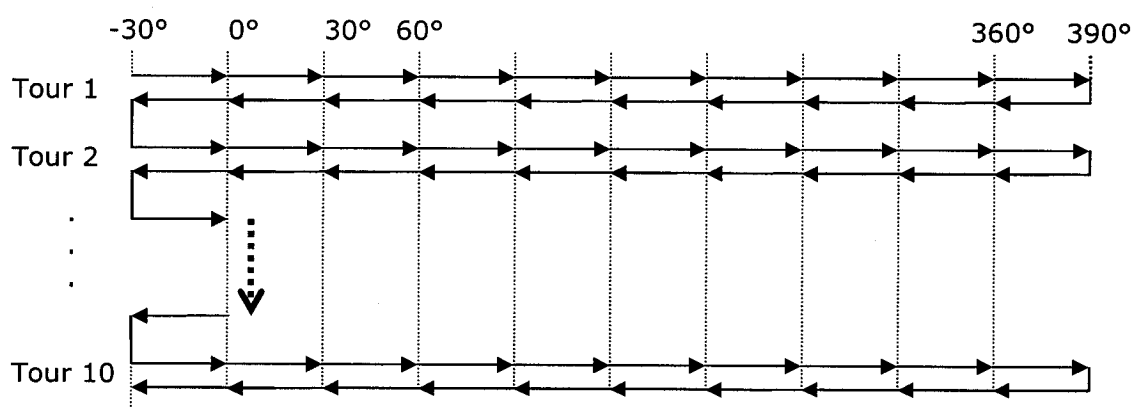


Figure 2.3.5 - Schéma de l'essai bidirectionnel à 30° par capteurs capacitifs

Positionnement bidirectionnel à 5°

Dans cet essai, on réalise des déplacements plus petits (5°) que dans l'essai bidirectionnel à 30° et donc l'écart de l'axe de rotation à des intervalles plus petits sera calculable (Voir Tableau 2.3.5 et Figure 2.3.6).

Tableau 2.3.5 - Conditions d'essai bidirectionnel à 5° par capteurs capacitifs

	Paramètre	Valeur	Description
1	Plage visée de l'axe C	0 à 360°	
2	Type de test	Bidir.	
3	Nombre d'essais dans chaque sens	1	
4	Angle de renversement du cycle	5°	Au début et à la fin du cycle
5	Distance entre les points visés	5°	
6	Le temps d'attente à chaque position	10 sec	
7	Vitesse d'avance	1 RPM	
8	Compensation machine	OFF	
9	Le temps estimé	≈30min	

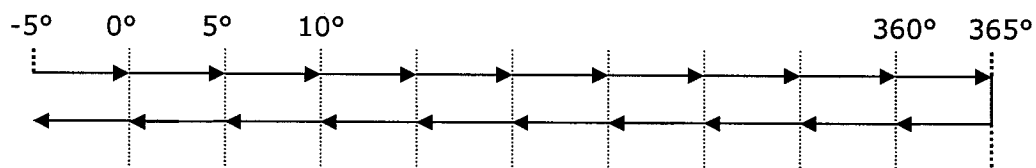


Figure 2.3.6 - Schéma de l'essai bidirectionnel à 5° par capteurs capacitifs

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, on présente les résultats expérimentaux des écarts cinématiques articulaires mesurés par le montage des capteurs capacitifs et par l'autocollimateur.

On examine la faisabilité de mesure par ces montages et étudie leur répétabilité de positionnement, leur précision et leur reproductibilité pour la mesure des écarts cinématiques d'un axe de rotation.

Comme expliqué au chapitre précédent, ces montages sont réalisés sur deux types différents de MOCN: Huron KX8-FIVE et Mitsui Seiki HU-40. Cela nous permet de connaître les écarts des axes C des deux MOCN qui exploitent deux technologies différentes d'entraînements.

3.1 RÉSULTATS DE MESURE SUR LA HURON KX8-FIVE

La MOCN Huron KX8FIVE est munie d'un axe de rotation C avec un entraînement direct par un moteur linéaire. Cet axe est verticalement posé sur un chariot mobile dont les déplacements se font selon les axes de mobilités A et X de la MOCN (Figure 3.1.1).

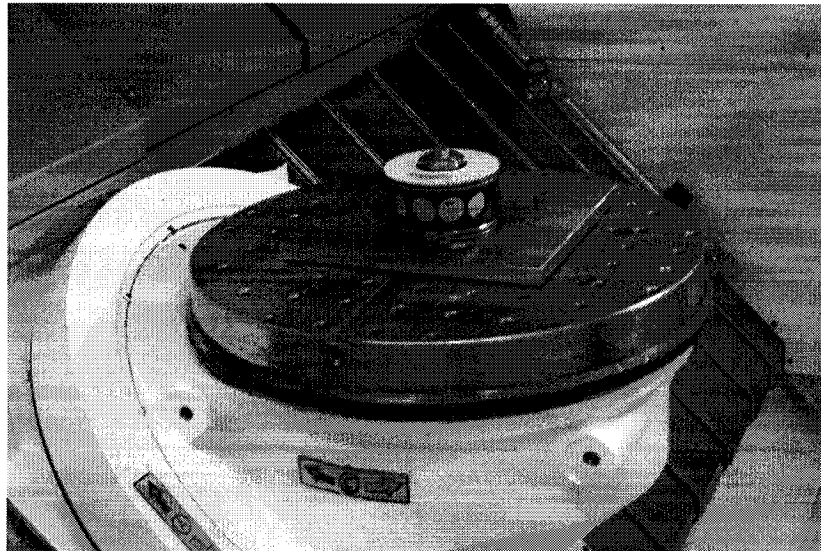


Figure 3.1.1 – Table rotative de la MOCN Huron KX8-FIVE

D'abord, on utilise l'autocollimateur sur cette MOCN et on réalise les essais définis dans le protocole expérimental. Ensuite, on réalise le montage des capteurs capacitifs afin de compléter la prise des mesures nécessaires pour calculer les écarts cinématiques articulaires de l'axe C. Ainsi, l'effet du jeu d'inversion et l'efficacité de filtrage sur les valeurs mesurées par capteurs capacitifs seront discutés pour cette MOCN.

3.1.1 Mesure par autocollimateur

Tel qu'expliqué dans le chapitre 2, le montage d'autocollimateur peut fournir les deux écarts suivants : l'écart de positionnement angulaire (γ_z) et un des écarts de l'inclinaison angulaire (γ_x ou γ_y dépendamment de la configuration du montage de mesure).

Le calcul de l'écart d'inclinaison angulaire se fait à partir des résultats de mesure par capteurs capacitifs. Cela nous permet de comparer et de vérifier les résultats des deux montages de mesure: l'autocollimateur et les capteurs capacitifs.

Dans cette section, l'écart de positionnement angulaire permet de calculer le jeu d'inversion. On présente aussi des exemples de la répétabilité de positionnement, de la précision et de la reproductibilité de ces résultats pour les écarts mesurés par l'autocollimateur.

Les deux écarts angulaires (γ_z et γ_x) sont mesurés selon la procédure expérimentale expliquée au chapitre précédent. La Figure 3.1.2 présente un exemple de l'écart de positionnement angulaire mesuré sur la Huron KX8-FIVE pour un essai de mouvement bidirectionnel de l'axe. Au cours de chaque rotation complète, cet écart varie d'environ 3 arcsec, ce qui n'est pas considérable. Cela signifie un bon positionnement angulaire de l'axe C pour cette MOCN.

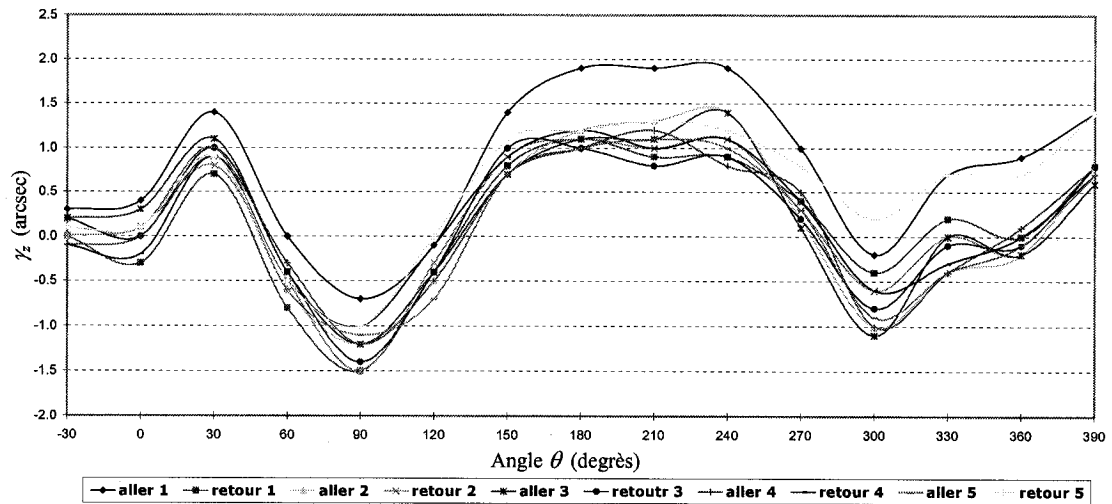


Figure 3.1.2 - Écart γ_z pour le mouvement bidirectionnel

La Figure 3.1.3 présente l'écart d'inclinaison angulaire de l'axe d'articulation C. On constate que pour chaque position angulaire, les mesures prises sont proches. Cela signifie une bonne répétabilité de l'axe C ainsi qu'une bonne répétabilité de mesure par l'autocollimateur qui reste à étudier dans cette section.

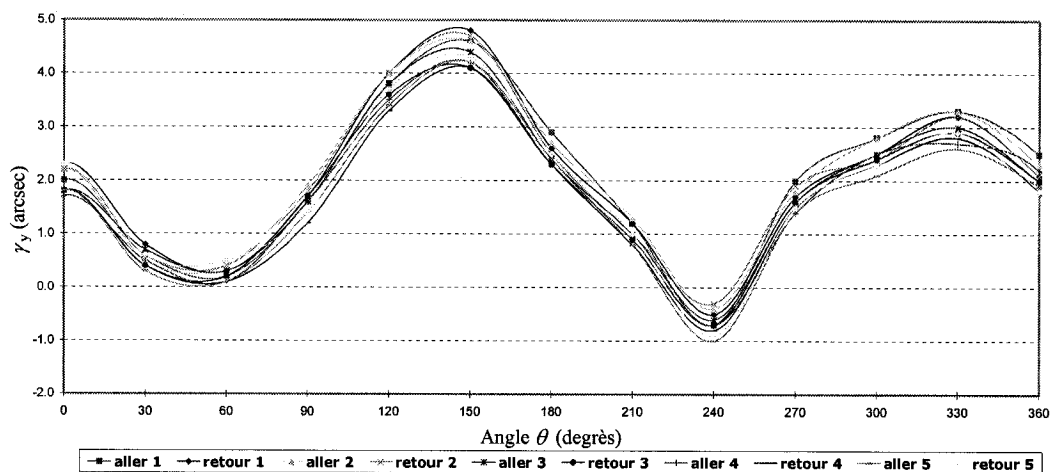


Figure 3.1.3 - Écart γ_y pour le mouvement bidirectionnel

L'annexe (F) contient tous les résultats des mesures par l'autocollimateur sur la Huron KX8-FIVE, effectuées selon la procédure expérimentale (section 2.3) du chapitre précédent.

3.1.2 Jeu d'inversion, répétabilité de positionnement et précision

La procédure expérimentale (section 2.3) a été élaborée afin de produire des résultats de mesure qui permettent d'étudier la méthode de mesure ainsi que d'étudier la répétabilité et la précision des résultats selon la norme ISO 230-2:1997[10].

Les essais pour évaluer le jeu d'inversion et la précision de positionnement sont effectués sans aucune sorte de compensation sur le contrôleur de la machine.

Dû à l'existence du jeu entre les éléments mécaniques de la table rotative, le jeu d'inversion se produit quand la direction de déplacement de l'axe est inversée. À l'aide d'un autocollimateur on mesure le jeu d'inversion de l'axe de rotation. En faisant un parcours aller-retour entre deux positions angulaires à plusieurs reprises, l'écart de positionnement angulaire de l'axe de rotation est mesuré. Ensuite, on calcule le jeu d'inversion pour ces deux positions données.

On définit, selon la norme ISO 230-2:1997, le jeu d'inversion (B) comme:

$$B = \max. [|B_i|] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (\text{Équation 3.1.1})$$

où $|B_i|$ est le jeu d'inversion en une position θ_i calculé par:

$$B_i = \bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (\text{Équation 3.1.2})$$

Dans cette équation, $\bar{X}_i \uparrow$ (ou $\bar{X}_i \downarrow$) est la moyenne arithmétique des écarts de position pour une série de n approches unidirectionnelles d'une position θ_i .

Il existe deux points de vues pour la répétabilité et la précision de l'axe de rotation: la rotation bidirectionnelle et la rotation unidirectionnelle. Dans la procédure expérimentale, les deux cas sont considérés.

La répétabilité de positionnement unidirectionnelle en une position ($R_i \uparrow$ ou $R_i \downarrow$) est calculée selon:

$$R_i \uparrow = 4S_i \uparrow \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (\text{Équation 3.1.3})$$

$$R_i \downarrow = 4S_i \downarrow \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (\text{Équation 3.1.4})$$

Où S_i est l'écart type unidirectionnel en une position i présenté par:

$$S_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \uparrow - \bar{X}_i \uparrow)^2} \quad (\text{Équation 3.1.5})$$

$$S_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \downarrow - \bar{X}_i \downarrow)^2} \quad (\text{Équation 3.1.6})$$

L'équation (3.1.7) calcule la répétabilité de positionnement bidirectionnelle R_i en une position.

$$R_i = \max.[2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (\text{Équation 3.1.7})$$

La répétabilité de positionnement bidirectionnelle de l'axe est définie comme la plus grande valeur de R_i pour cet axe.

$$R = \max.[R_i] \quad (\text{Équation 3.1.8})$$

La norme ISO 230-2 :1997 définit la précision bidirectionnelle A de positionnement d'un axe comme :

$$A = \max.[\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min.[\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow] \quad (\text{Équation 3.1.9})$$

La Figure 3.1.4 découle des définitions ci-dessus à l'écart de positionnement angulaire (γ_z) mesuré par un essai bidirectionnel.

Le Tableau 3.1.1 présente les valeurs calculées de répétabilité, de précision et de jeu d'inversion maximal.

Tableau 3.1.1 – Résultats statistiques de l'écart γ_z pour un essai bidirectionnel

Répétabilité de positionnement R (arcsec)	Précision de positionnement A (arcsec)	Jeu d'inversion maximal B (arcsec)
1.9	3.9	0.4

Dans ce tableau, on constate une répétabilité de positionnement R de 1.9 arcsec bien plus petite que la précision de positionnement A tel que définie par la norme. De plus, on constate un jeu d'inversion plus petit que 1.0 arcsec et donc l'écart de positionnement de cet axe dans les deux directions est approximativement identique.

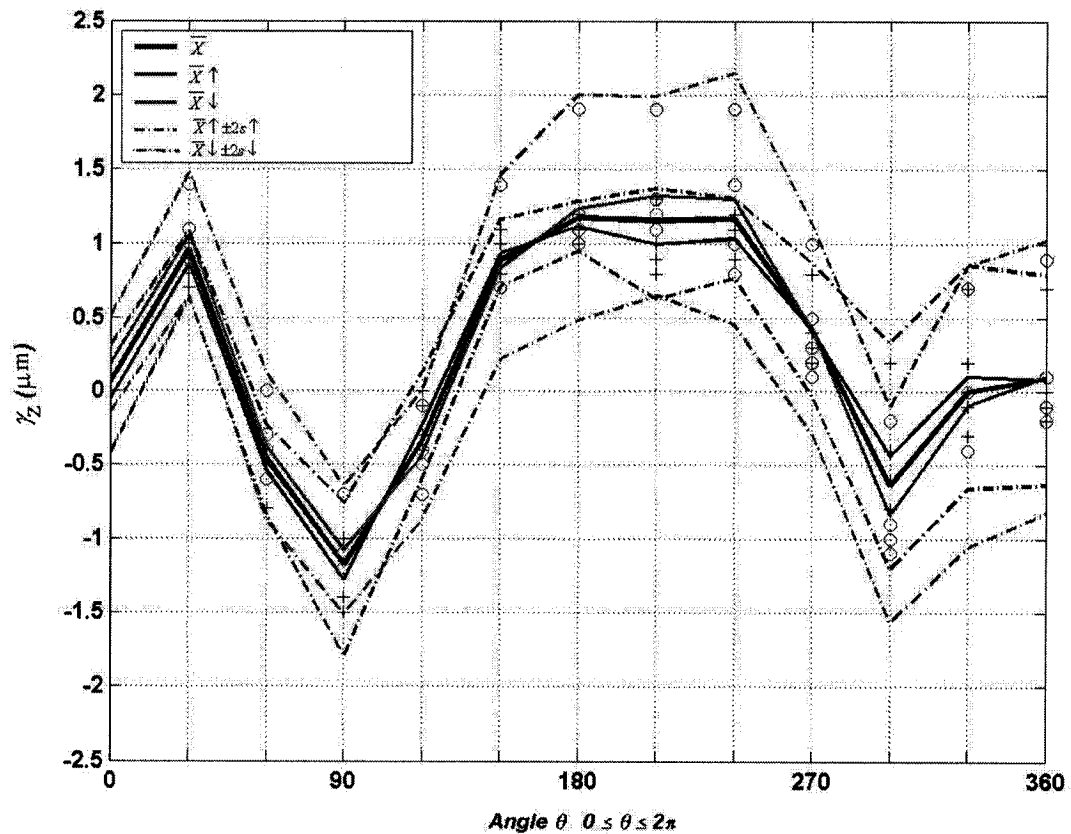


Figure 3.1.4 - Répétabilité et précision de positionnement angulaire

L'entraînement de l'axe d'articulation C de la MOCN Huron KX8-FIVE se fait par un moteur couple où la liaison entre le moteur et la table rotative par des éléments mécaniques se remplace par une liaison directe. Le jeu entre ces éléments mécaniques ainsi que l'imperfection des composants ont un impact direct sur la répétabilité et le jeu d'inversion de l'axe de rotation. Par conséquent, on s'attend à obtenir une bonne répétabilité et un petit jeu d'inversion pour l'axe C de la Huron KX8-FIVE.

Il est possible d'étudier la répétabilité et la précision de l'axe C pour les essais unidirectionnels. Les équations 3.1.3 et 3.1.4 nous fournissent la répétabilité dans les directions aller et retour. Le calcul de la précision unidirectionnelle de l'axe ($A\uparrow$ ou $A\downarrow$) peut se faire à partir des équations 3.1.10 et 3.1.11 :

$$A \uparrow = \max. [\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow] - \min. [\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow] \quad (\text{Équation 3.1.10})$$

$$A \downarrow = \max. [\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min. [\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow] \quad (\text{Équation 3.1.11})$$

La répétabilité R et la précision angulaire A pour l'écart de positionnement angulaire γ_z de l'axe C de la MOCN Huron KX8-FIVE sont calculé et présentées au Tableau 3.1.2.

Tableau 3.1.2 - Répétabilité et précision de positionnement angulaire

Direction du Mouvement	Répétabilité de positionnement R (arcsec)	Précision de positionnement A (arcsec)
positive	1.7	3.8
négative	2.5	4.8

Ce tableau démontre que la répétabilité et la précision du déplacement dans la direction négative de l'axe sont légèrement plus grandes que celles de la direction positive.

3.1.3 Mesure par capteurs capacitifs

Tel qu'expliqué dans le chapitre 2, le montage des capteurs capacitifs fournit cinq valeurs mesurées (S_{x2} , S_{y2} , S_x , S_y et S_z) qui servent à calculer les deux écarts de l'inclinaison angulaire (γ_x et γ_y), l'écart linéaire axial (ε_z) et les deux écarts linéaires radiaux (ε_x et ε_y).

La Figure 3.1.5 montre un exemple d'une valeur mesurée (S_{x2}) par capteurs capacitifs.

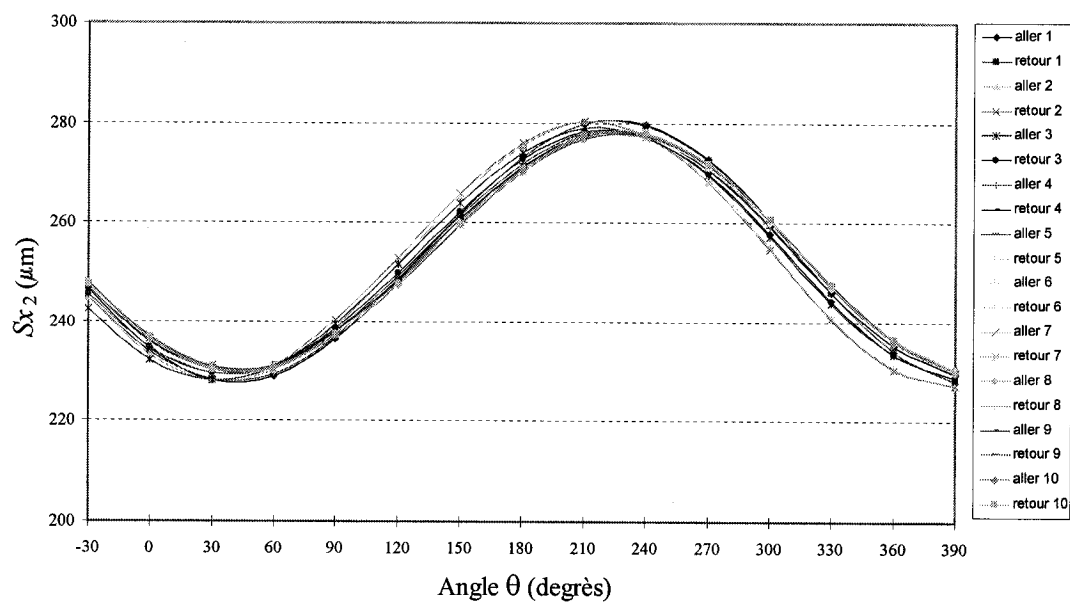


Figure 3.1.5 – Valeur S_{x2} d'un essai unidirectionnel sur la Huron KX8-FIVE

La valeur mesurée S_{x2} démontre une forme sinusoïdale avec une amplitude d'environ 70 μm . On constate la même forme sinusoïdale pour les autres mesures S_{y2} , S_x , S_y et S_z obtenues par d'autres capteurs capacitifs (voir l'annexe G). L'excentricité du montage des cibles et la table rotative provoque cette forme. Dans le chapitre 2, une méthode de filtrage a été développée, laquelle permet de filtrer l'effet de l'excentricité du montage afin d'obtenir les écarts de l'axe de rotation.

3.1.4 Calcul des écarts obtenus par capteurs capacitifs

Un programme MATLAB® a été développé afin d'extraire les écarts de l'axe de rotation C en introduisant les valeurs mesurées par les capteurs capacitifs. Le filtrage se base sur un modèle des écarts causés par l'excentricité du montage de mesure par rapport à l'axe de rotation. Les valeurs filtrées comprennent les écarts cinématiques articulaires de l'axe C ainsi que les erreurs provoquées par la machine-outil et par les instruments de mesure. Ces derniers sont considérés comme négligeables par rapport aux écarts cinématiques.

La Figure 3.1.6 présente l'écart linéaire ε_x de l'axe de rotation obtenu à partir de la valeur mesurée S_{x2} . Lors du calcul de cet écart on considère qu'au cours de chaque rotation, le centre d'excentricité du montage de mesure (ρ, φ) reste fixe par rapport à la référence (cible à deux billes).

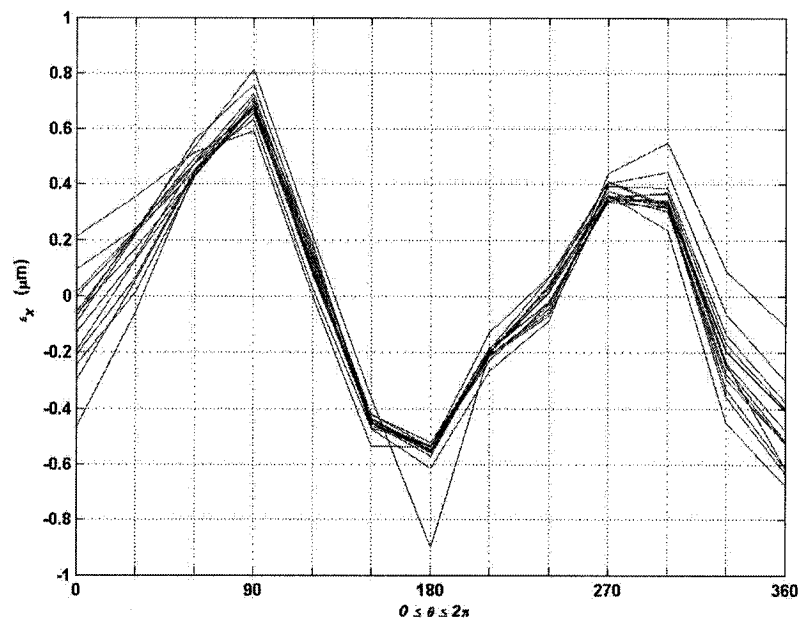


Figure 3.1.6 - Écart ε_x pour un essai bidirectionnel sur la Huron KX8-FIVE

La Figure 3.1.6 démontre bien la disparition de l'effet d'excentricité dans l'écart calculé ε_x . Ainsi l'étendue de la variation entre l'écart minimal et l'écart maximal est diminuée à environ 1.5 (μm). De plus, à l'exception des positions angulaires 0° et

360°, on constate une petite étendue de l'écart ε_x dans chaque position angulaire. Cela signifie une bonne répétabilité de mesure ainsi que de l'axe de rotation.

La Figure 3.1.6 révèle aussi que l'écart ε_x a une forme sinusoïdale avec une période d'environ 180°. L'excentricité du montage précédemment filtré avait aussi une forme sinusoïdale mais avec une période de 360°. Cette forme pourrait être due aux défauts dans le guidage ou d'autres éléments de la table rotative.

On constate aussi une large étendue pour l'écart mesuré ε_x à des positions 0° et 360° qui provient soit du déplacement du centre d'excentricité ou de la méthode de filtrage.

Les figures ci-dessous (3.1.7 et 3.1.8) démontrent le déplacement du centre d'excentricité du montage (ρ, ϕ) par rapport à l'axe de rotation et ceci vu par les deux billes supérieure et inférieure de la cible :

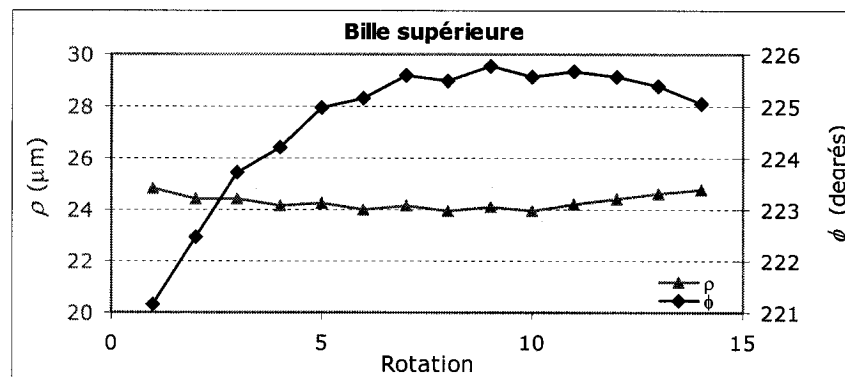


Figure 3.1.7 – Variation du centre de l'excentricité de la bille supérieure

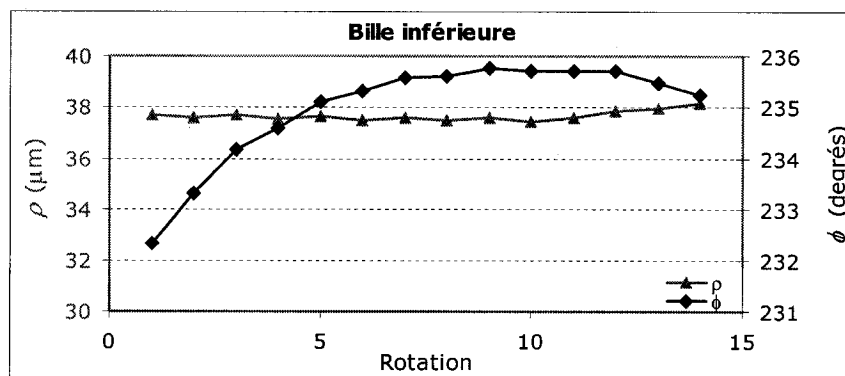


Figure 3.1.8 – Variation de l'excentricité des billes inférieure et supérieure

Les Figures 3.1.7 et 3.1.8 indiquent que le centre d'excentricité se déplace, ce qui introduit des erreurs dans les calculs de filtrage pour une rotation complète de l'axe C. Par conséquent, si on applique le filtrage sur une demi-rotation (0° à 180°), ces erreurs dans le filtrage doivent être diminuées. Par conséquent, on applique deux fois le filtrage pour une rotation complète de l'axe C (Figure 3.1.9) :

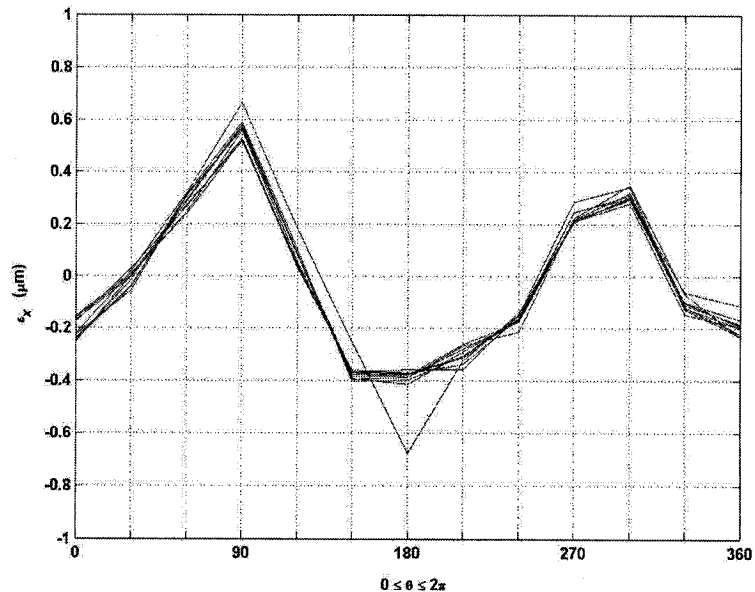


Figure 3.1.9 - Écart résultant ε_x obtenu par le filtrage à demi-tours

On constate une amélioration pour l'étendue de l'écart ε_x pour les positions angulaires 0° et 360° . Étant donné que le filtrage s'applique sur des périodes de 0 à 180, le nombre des points pour chaque solution des moindres carrées réduit ce qui risque de rendre les résultats de calcul erronés.

On calcule l'écart ε_y de la même façon (Figure 3.1.10). On constate une amplitude de variation plus petite pour cet écart ($\approx 0.8 \mu\text{m}$).

On mesure l'écart ε_z (Figure 3.1.11) directement par le capteur C_z et ne nécessite pas un filtrage.

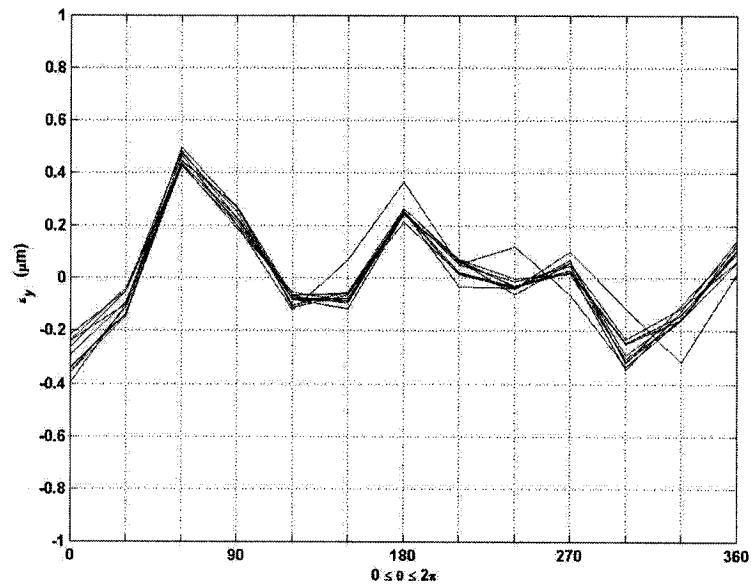


Figure 3.1.10 - Écart résultant ε_y obtenu par le filtrage à demi-tours

La variation de l'écart ε_z à chaque rotation reste inférieure à 1 μm . Pourtant, cet écart varie considérablement d'une rotation à l'autre. Cette variation provient du déplacement axial de l'axe de rotation dû au déplacement axial de la broche. L'effet d'origine thermique compte aussi parmi les sources possibles de ce déplacement.

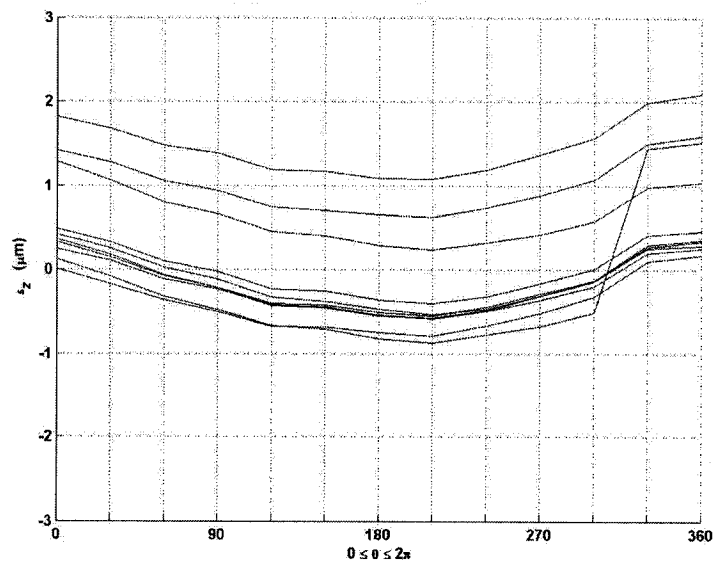


Figure 3.1.11 - Écart résultant ε_z obtenu par le capteur C_z

On calcule les écarts γ_x et γ_y selon les équations 2.2.32 et 2.2.33. Puisque les résultats obtenus ne produisent pas des conclusions supplémentaires, ils sont présentés à l'annexe H.

Tableau 3.1.3 présente la répétabilité et la précision des écarts obtenus par capteurs capacitifs.

Tableau 3.1.3 – Répétabilité et précision de positionnement des écarts mesurés

écart	Répétabilité de positionnement (R)	Précision de positionnement (A)
ε_x (μm)	0.81	1.68
ε_y (μm)	0.67	1.29
ε_z (μm)	4.45	5.25
γ_x (arcesec)	0.7	3.9
γ_y (arcesec)	0.7	4.5

Le Tableau 3.1.3 nous révèle une bonne répétabilité et une bonne précision de positionnement de l'axe C pour les écarts ε_x , ε_y , γ_x et γ_y . Dans le cas de l'écart linéaire ε_z , on constate une répétabilité et une précision plus élevées que celles des autres écarts.

3.2 RÉSULTATS DE MESURE SUR LA MITSUI SEIKI HU-40

La MOCN Mitsui Seiki HU-40 est munie d'un axe de rotation C avec un entraînement par pignons et vis sans fin. Cet axe est posé verticalement sur un chariot mobile qui représente l'axe de mobilité X de la MOCN (Figure 3.2.1).

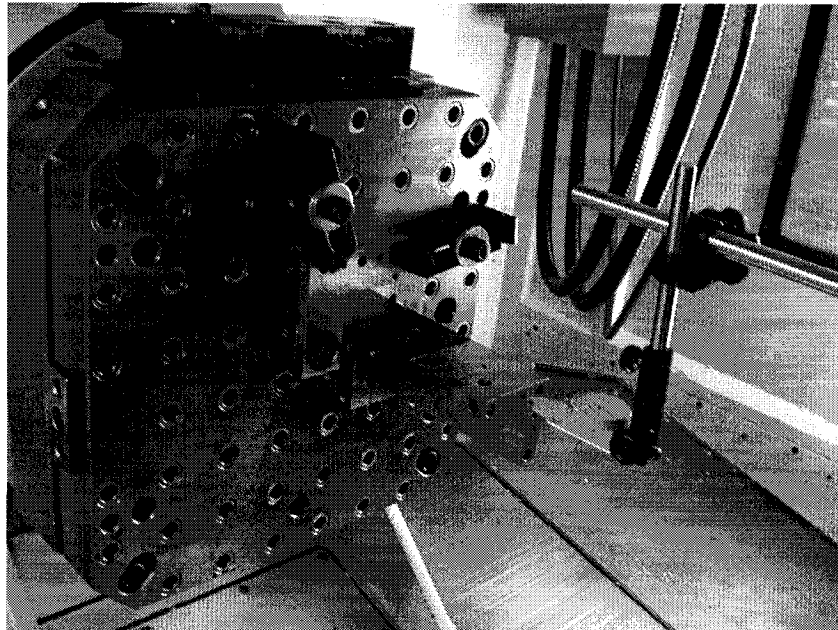


Figure 3.2.1 - L'axe d'articulation C de la MOCN Mitsui Seiki HU-40

Comme dans le cas de Huron KX8-FIVE, on a utilisé le montage des capteurs capacitifs sur cette MOCN. Selon les essais décrits dans la procédure expérimentale on a procédé à la prise des mesures. Ensuite, on a utilisé l'autocollimateur afin de mesurer l'écart de positionnement angulaire et l'écart d'inclinaison angulaire.

L'effet du jeu d'inversion, le filtrage et la répétabilité de mesure seront discutés pour cette MOCN.

3.2.1 Mesure par l'autocollimateur

Des exemples de l'écart de positionnement angulaire et de l'écart d'inclinaison angulaire mesurés sur la Mitsui Seiki HU-40 sont présentés aux Figures 3.2.2 et 3.2.3.

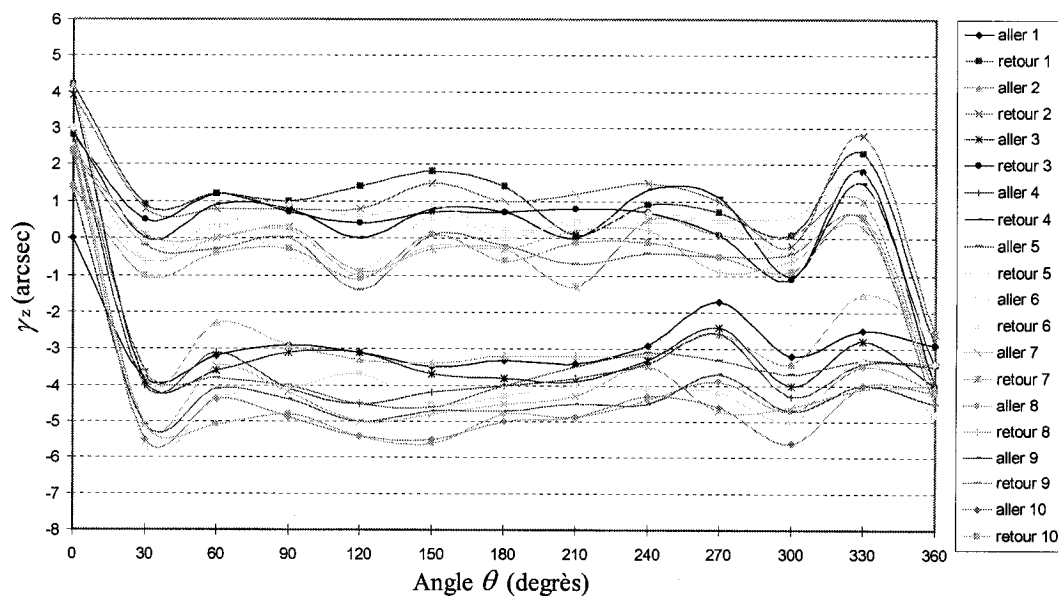


Figure 3.2.2 - Écart de positionnement angulaire pour un essai bidirectionnel

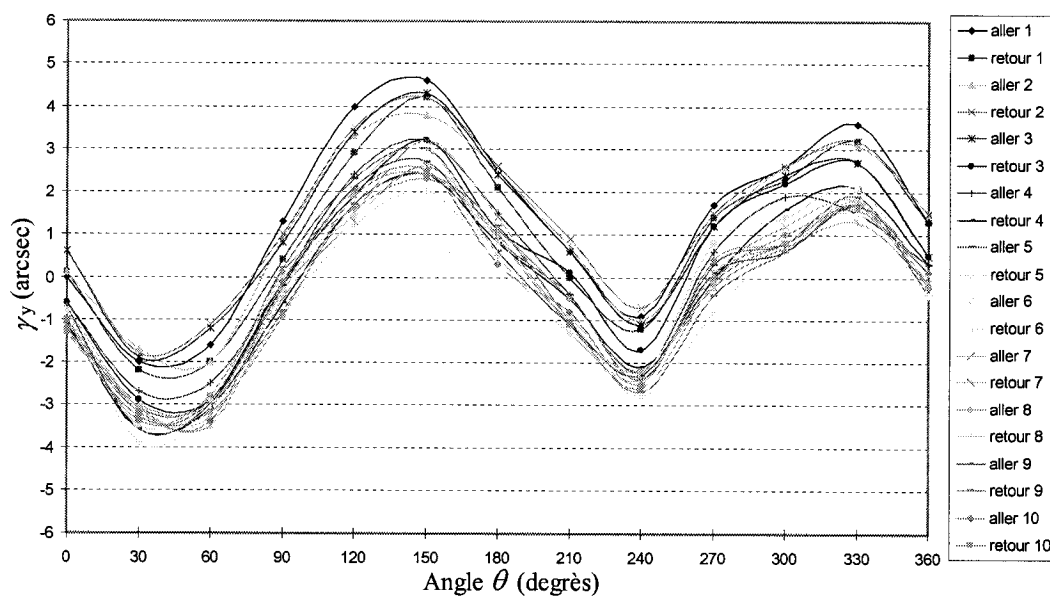


Figure 3.2.3 - Écart de l'inclinaison angulaire pour un essai bidirectionnel

On constate qu'il existe un jeu d'inversion entre les écarts de positionnement angulaire dans les directions aller et retour

Tous les autres résultats de mesure par l'autocollimateur sur la Mitsui Seiki HU-40 sont présentés à l'annexe (F).

Comme dans le cas de la Huron KX8-FIVE, on calcule la répétabilité et la précision de l'écart de positionnement angulaire (γ_z) dans les deux cas de positionnement bidirectionnel et unidirectionnel (Tableau 3.2.1).

Tableau 3.2.1 – Données statistiques de l'écart γ_z pour la Mitsui Seiki HU-40

Mouvement	Répétabilité de positionnement R (arcsec)	Précision de positionnement A (arcsec)	Jeu d'inversion maximal B (arcsec)
bidirectionnel	6.3	12.8	4.3
unidirectionnel (direction positive)	1.4	8.3	-
unidirectionnel (direction négative)	1.7	8.4	-

Ce tableau affiche un jeu d'inversion considérablement plus élevé que celui calculé pour la Huron KX 8-FIVE. Cette observation concorde bien avec le fait que Mitsui Seiki HU-40 utilise un système de pignons et vis sans fin, ce qui produit normalement un jeu d'inversion.

Le Tableau 3.2.1 nous révèle aussi que les mouvements unidirectionnels de l'axe C, la répétabilité et la précision sont identiques, tandis que pour la Huron KX8-FIVE la direction négative produit des valeurs plus élevées que la direction positive (Tableau 3.2.1).

On constate une répétabilité et une précision des essais bidirectionnels plus élevées que celle des essais unidirectionnels. L'existence du jeu d'inversion peut expliquer ce fait.

3.2.2 Mesure par capteurs capacitifs

Les lectures des capteurs capacitifs sont à l'annexe G. On utilise ces valeurs afin de calculer les écarts ε_x , ε_y , ε_z , γ_x et γ_y et cela de la même façon que dans le cas de la Huron KX8-FIVE.

La Figure 3.2.4 présente l'écart linéaire ε_x de la Mitsui Seiki HU-40.

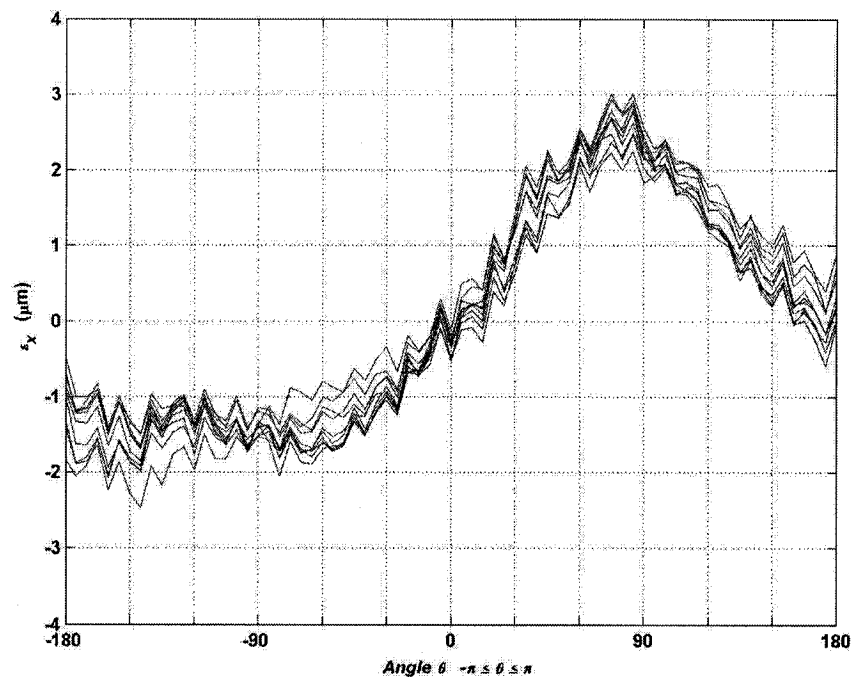


Figure 3.2.4 - Écart résultant ε_x obtenu sur la Mitsui Seiki HU-40

La Figure 3.2.4 montre bien que l'effet d'excentricité du montage est enlevé de l'écart calculé ε_x . La variation de cet écart reste inférieure à 5 μm.

La variation de l'écart ε_x pour chaque angle atteint un maximum d'environ 1 μm et cela à toutes les positions angulaires. On peut l'expliquer en partie par le déplacement du centre d'excentricité et en partie par le jeu d'inversion de la table rotative.

Les Figures 3.2.5 et 3.2.6 montrent le déplacement du centre d'excentricité (ρ , ϕ) du montage vu par les billes supérieures et inférieures de la cible. Ces figures confirment que le déplacement du centre d'excentricité pourrait bien être une cause de la variation de l'écart à la Figure 3.2.4.

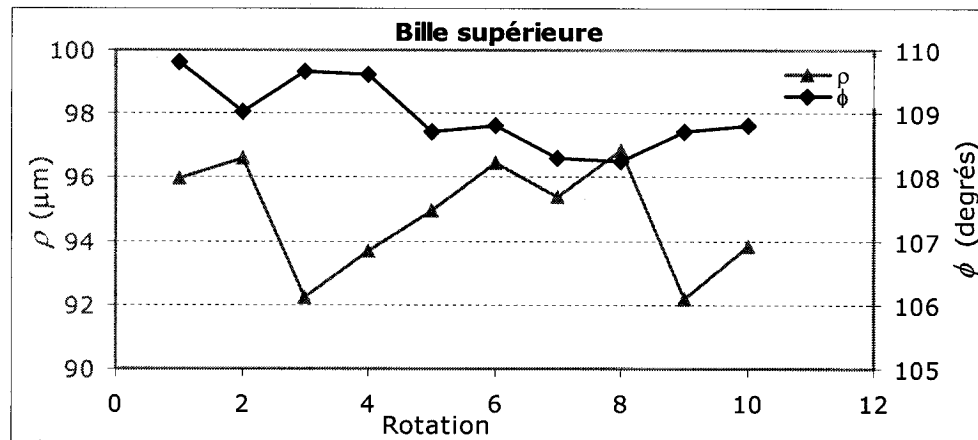


Figure 3.2.5 – Variation du centre de l'excentricité de la bille supérieure

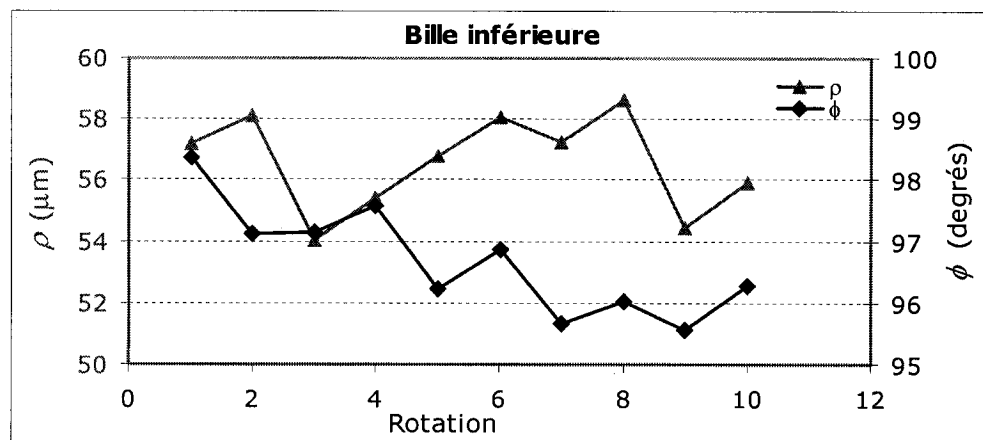


Figure 3.2.6 – Variation du centre de l'excentricité de la bille inférieure

Le jeu d'inversion de cet axe (Tableau 3.2.1) explique une autre partie de la variation de l'écart ε_x pour toutes les positions angulaires.

Tous les autres écarts de l'axe de rotation C (ε_y , ε_z , γ_x et γ_y) ont été calculés. Étant donné que ces écarts, ne produisent pas des conclusions supplémentaires, ils se trouvent à l'annexe H.

Le Tableau 3.2.2 présente la répétabilité et la précision des écarts obtenus par capteurs capacitifs.

Tableau 3.2.2 – Répétabilité et précision de positionnement des écarts mesurés

écart	Répétabilité de positionnement (R)	Précision de positionnement (A)
ε_x (μm)	2.38	5.77
ε_y (μm)	2.79	6.25
ε_z (μm)	4.15	8.27
γ_x (arcsec)	1.7	6.6
γ_y (arcsec)	1.3	7.6

En comparant avec les valeurs calculées pour la Huron KX8-FIVE, on constate une répétabilité et une précision de l'axe C plus élevée pour la Mitsui Seiki HU-40. Comme dans le cas de la Huron KX8-FIVE, la variation de l'écart ε_z est plus élevée que les écarts ε_x , ε_y à l'origine duquel on peut constater le déplacement axial de la broche en cours de test.

3.3 VALIDATION DES MESURES

Il faut s'assurer de la reproductibilité de mesure par le montage des capteurs capacitifs et par le montage d'autocollimateur. Afin de procéder à cette vérification, on peut faire le montage de mesure à plusieurs reprises et comparer les résultats obtenus. De plus, l'autocollimateur et les capteurs capacitifs mesurent l'écart d'inclinaison angulaire (β). La comparaison entre les deux valeurs mesurées pour cet écart est un moyen efficace de comparer la performance de ces deux instruments lors de la mesure des écarts articulaires d'un axe rotatif.

3.3.1 Vérification de mesure par autocollimateur

Le montage de mesure par l'autocollimateur s'est fait sur la MOCN Huron KX8-FIVE suivi de la prise d'une série de mesures. Ensuite, on répète le montage et on fait une deuxième série de mesures. La comparaison entre les deux séries de mesures nous permet de vérifier si les ajustements du montage de mesure ont un impact important sur les écarts mesurés ou si cet effet est négligeable.

Les Figures 3.3.1 démontrent l'écart γ_z de l'axe de rotation C de la MOCN Huron KX8-FIVE obtenu par l'autocollimateur.

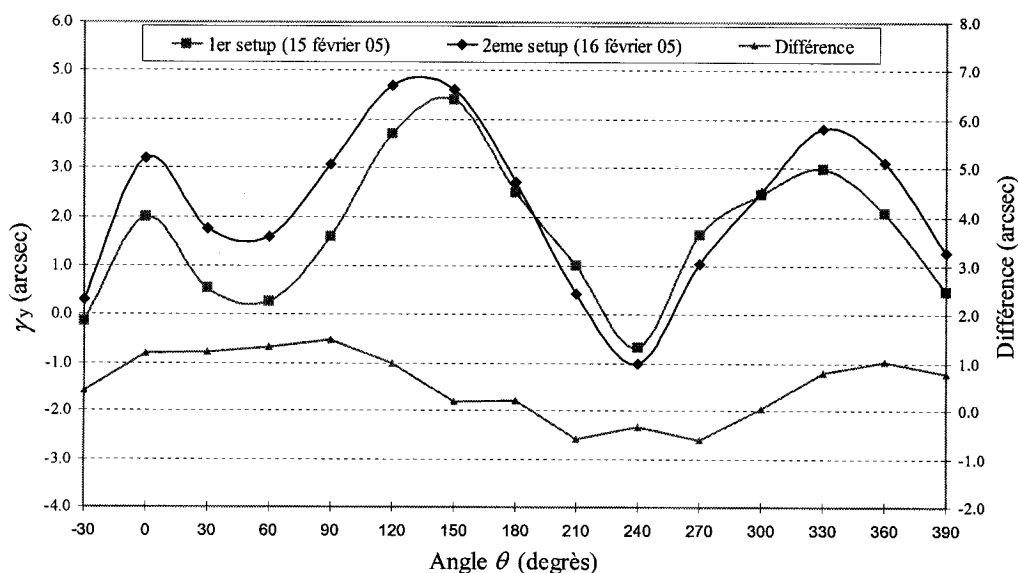


Figure 3.3.1 - Positionnement angulaire γ_z mesuré par autocollimateur

Afin de mieux comparer les valeurs mesurées par deux montages, la différence et l'écart type entre les écarts mesurés à chaque angle sont calculés (Tableau 3.3.1). Ce tableau permet de comparer ces valeurs avec la répétabilité de l'axe C pour l'écart γ_z .

Tableau 3.3.1 - Comparaison des écarts γ_z et γ_y mesurés sur la Huron KX8-FIVE

écart	Différence moyenne (arcsec)	Écart type moyen (arcsec)	Répétabilité de positionnement de l'axe C (arcsec)
γ_z	0.1	0.2	0.7

Selon le tableau ci-dessus on constate une plus petite différence entre les deux mesures de l'écart de positionnement γ_z par rapport à la répétabilité de l'axe C. Autrement dit, le montage de mesure par l'autocollimateur est reproductible quant à l'écart γ_z . Cependant, pour rendre les valeurs du Tableau 3.3.1 plus représentatives sur le plan statistique, il faudrait produire plus de données en faisant le montage de mesure à plusieurs reprises.

3.3.2 Vérification de la méthode du filtrage

Au chapitre précédent, on a introduit une méthode de filtrage de l'effet de l'excentricité pour le montage des capteurs capacitifs. On a appliqué cette méthode pour le calcul des cinq écarts articulaires de l'axe C pour la Huron KX8-FIVE et la Mitsui Seiki HU-40.

Dans le but de vérifier l'efficacité de ce filtrage, on procède à la prise d'une série de mesures en faisant un ajustement du montage de mesure sur la Mitsui Seiki HU-40. Ensuite, en se déplaçant selon les axes articulaires X et Y à partir de l'armoire de commande, la cible et, par conséquent le centre d'excentricité du montage, sont déplacés.

La Figure 3.3.2 montre l'écart ε_x obtenu sur la Mitsui Seiki HU-40 et ceci avant et après le déplacement de la cible à deux billes. On constate une petite différence entre l'écart ε_x pour les deux cas, ce qui démontre que le filtrage était efficace.

Un filtrage idéal doit produire une différence de zéro. Pourtant, d'autres sources d'erreurs dans la machine et l'instrument de mesure causent des valeurs résiduelles observées dans cette figure.

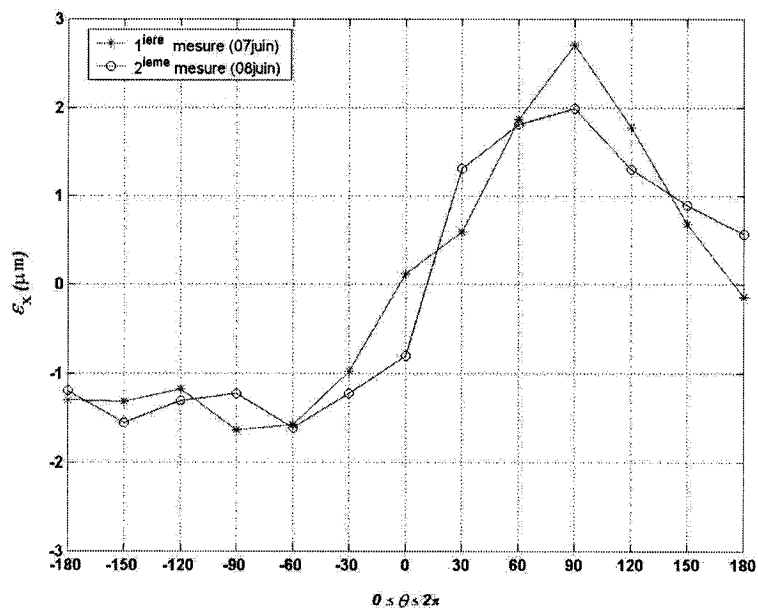


Figure 3.3.2 - Écart linéaire ϵ_x obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40

Il en va de même pour les écarts ϵ_y , ϵ_z , γ_x et γ_y et les résultats sont présentés à l'annexe H.

Le Tableau 3.3.2 résume la comparaison statistique entre les profils calculés.

Tableau 3.3.2 - Comparaison statistique des écarts mesurés la Mitsui Seiki HU-40

écart	Différence moyenne	Écart type moyen	Répétabilité de positionnement de l'axe C
ϵ_x (μm)	0.05	0.49	2.38
ϵ_y (μm)	0.11	0.53	2.79
ϵ_z (μm)	0.93	0.59	4.15
γ_x (arcsec)	0.2	1.9	1.7
γ_y (arcsec)	0.4	1.1	1.3

Le Tableau 3.3.2 confirme que filtrage mathématique développé dans cette recherche supprime bien les désalignements et les effets du montage de mesure qui introduisent un effet excentrique dans les valeurs mesurées.

Une répétition sur cet essai rendrait les calculs statistiques du Tableau 3.3.2 plus représentatifs.

3.3.3 Étude comparative des capteurs capacitifs et autocollimateur

La comparaison entre l'écart d'inclinaison angulaire (γ_y) obtenu par l'autocollimateur et par les capteurs capacitifs nous permet de valider en partie les méthodes de mesure et les théories appliquées pour obtenir les écarts de l'axe C.

La Figure 3.3.3 présente l'écart angulaire (γ_y) obtenu par l'autocollimateur et par le montage des capteurs capacitifs sur la MOCN Huron KX8-FIVE. On y constate une bonne ressemblance. Cependant, il existe un biais (d'environ 2.0 μm) entre ces deux résultats. Ce biais provient de l'ajustement initial du montage de l'autocollimateur.

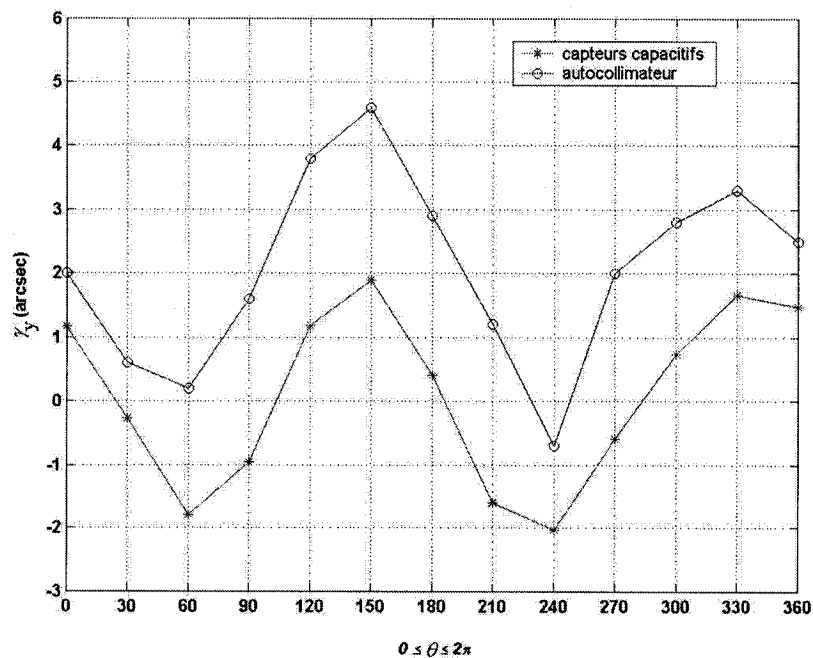


Figure 3.3.3 - Écart γ_y mesuré sur la Huron KX8.

En considérant ce biais comme moyenne de la différence entre les deux écarts (Tableau 3.3.3), on peut le supprimer et obtenir un profil plus proche à l'écart mesuré par capteurs capacitifs.

Quant à la MOCN Mitsui Seiki HU-40 (Figure 3.3.4), les deux écarts γ_y obtenus par l'autocollimateur et par les capteurs capacitifs sont très similaires.

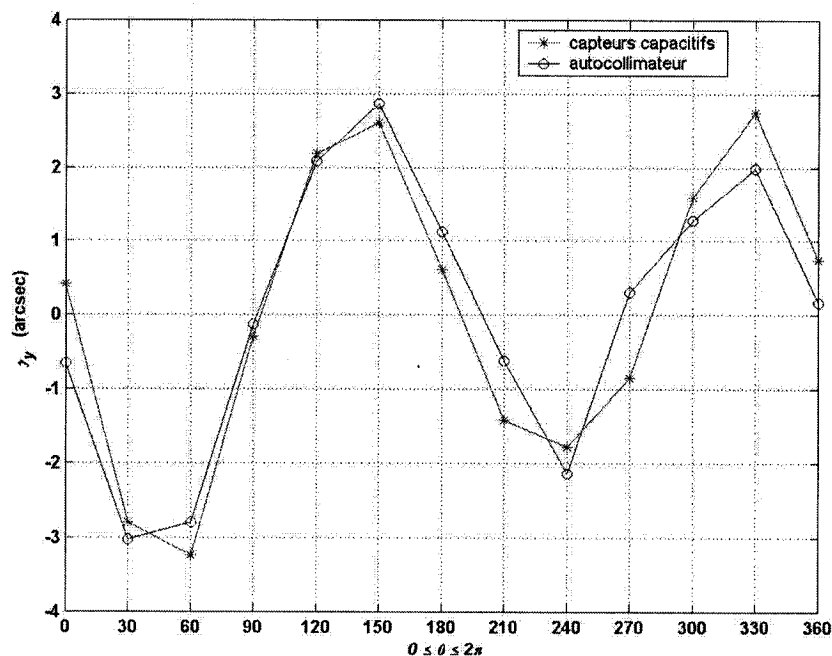


Figure 3.3.4 - Écart γ_y sur la Mitsui Seiki

Le Tableau 3.3.3 résume le biais et l'écart type de la différence entre les deux écarts mesurés pour les deux MOCN.

Tableau 3.3.3 - Écart γ_y mesuré par autocollimateur et par capteurs capacitifs

MOCN	biais (arcsec)	Écart type moyen (arcsec)	Répétabilité de positionnement (arcsec)	Précision de positionnement (arcsec)
Huron KX8-FIVE	2.0	0.74	0.68	4.53
Mitsui Seiki HU-40	0.0	0.64	1.30	7.61

3.4. CONCLUSION

L'objectif général de ce travail était de développer une méthode de mesure des écarts articulaires d'un axe de rotation. Pour atteindre cet objectif, on a utilisé deux montages de mesure: l'autocollimateur et les capteurs capacitifs.

Le premier montage nous a permis de mesurer l'écart de positionnement angulaire (γ_z) et le montage des capteurs capacitifs nous a fourni la mesure des autres composants de l'écart cinématique de l'axe C. On a présenté des exemples d'application sur l'axe d'articulation rotoïde C de deux différents types de MOCN. On doit porter des soins particuliers lors de l'ajustement du montage de mesure afin d'obtenir une bonne qualité de mesure par l'autocollimateur. Nous avons constaté que ce montage a une bonne reproductibilité de mesure (0.2 arcsec).

Étant donné que l'autocollimateur est installé à l'extérieur de la MOCN, les changements thermiques de la machine-outil lors des essais ont un impact négligeable sur l'alignement du faisceau optique. Ces avantages font d'un autocollimateur un bon moyen pour mesurer l'écart cinématique de position angulaire de l'axe de rotation.

En comparant les écarts cinématiques angulaires obtenus sur les deux MOCN, on constate que la répétabilité et la précision de mouvements bidirectionnels pour la Huron KX8-FIVE (entraînement par moteur couple) sont inférieures à celles de la Mitsui Seiki HU-40 (entraînement par pignons et vis sans fin).

Le montage des capteurs capacitifs a permis de mesurer les autres composants de l'écart cinématique de l'axe de rotation (i.e., ε_x , ε_y , ε_z , γ_x et γ_y). La méthode de mesure s'est basée sur l'utilisation du montage d'analyseur de broche, mais pour une application différente, où la broche (et donc la cible) insérée est fixe et le support de mesure se déplace en tournant la table rotative.

Le montage des capteurs capacitifs est reproductible à moins de 0.1 μm pour les composants linéaires radiaux ε_x , ε_y et moins de 0.4 arcsec pour les composants angulaires γ_x et γ_y de l'écart cinématique.

Quant à l'écart ε_z , on obtient une reproductibilité de 1 μm comparativement plus élevée que la reproductibilité des autres écarts. Étant donné que la cible (la

référence de mesure) ne se délace pas par rapport à la broche, l'échauffement de la machine cause le déplacement axial de la table rotative et même de la broche. Ceci affecte l'évaluation de reproductibilité du montage par ce déplacement.

Puisque ce montage est déjà existant, on minimise le coût de l'essai. On peut suivre la même procédure d'installation et d'ajustement que celle du montage d'analyseur de broche, mais avec certains alignements supplémentaires.

En faisant la comparaison des écarts mesurés sur les deux MOCN, on constate que la Huron KX8-FIVE a une meilleure répétabilité et précision pour l'axe C que la Mitsui Seiki HU-40. La comparaison entre l'écart angulaire γ_y mesuré par les capteurs capacitifs et celui mesuré par l'autocollimateur nous indique une bonne similarité de mesures de l'écart γ_y pour les deux montages.

Les méthodes de mesure proposées dans cette recherche ont le désavantage qu'elles ne permettent pas d'utiliser l'autocollimateur et les capteurs capacitifs de façon simultanée. Par conséquent, on obtient les cinq composants de l'écart cinématique de l'axe de rotation (ε_x , ε_y , ε_z , γ_x et γ_y) à un moment différent que le sixième composant (γ_z). Il faut donc essayer de respecter le même état thermique de la MOCN ainsi que la même ambiance pour les deux prises de mesure.

En résumé, on peut utiliser les méthodes proposées dans le but de mesurer les écarts cinématiques articulaires de l'axe de rotation C d'une MOCN avec une bonne précision (inférieur à 0.1 arcsec pour les écarts angulaires et 0.01 μm pour les écarts linéaires)¹.

¹ Voir les annexes A et B

3.5 RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS

Le travail réalisé peut servir dans d'autres projets de recherche, soient l'élaboration de la méthode proposée ou l'utilisation des résultats obtenus par cette méthode.

Les effets d'origine thermique existent toujours dans une machine-outil et lors de prise de mesure même si des soins particuliers sont pris afin de minimiser ces effets. Pourtant, dans un procédé d'usinage, souvent les effets d'origine thermique sont considérables et donc il sera d'une grande utilité de pouvoir étudier l'impact de ces effets sur les écarts d'un axe de rotation dans des conditions définies. Il est donc avantageux d'étudier les effets d'origine thermique sur les écarts obtenus dans ce projet en ajoutant des capteurs de température à certains endroits sur la machine-outil.

La mesure des écarts de l'axe de rotation A d'une MOCN n'est pas faisable par la méthode proposée dans cette recherche car le déplacement de l'axe A change l'orientation de la cible par rapport au capteur, ce qui rend le montage de mesure non efficace. L'amélioration de cette méthode de mesure afin de l'adapter pour l'utilisation pour l'axe A est un des domaines de recherches proposés.

La modélisation et la compensation d'erreurs des machines-outils sont des principaux domaines de recherche en matière d'augmentation de la précision de celles-ci. Les résultats obtenus dans cette recherche nous permettent d'envisager la compensation d'erreur de machine. Il est donc intéressant de développer un modèle mathématique des écarts cinématiques de l'axe de rotation pour des écarts mesurés par la méthode proposée.

Une fois le modèle des écarts des axes de rotation développé, on peut intégrer ce modèle avec les modèles existants pour les axes linéaires de la machine afin de générer un simulateur d'usinage à quatre ou à cinq axes.

RÉFÉRENCES

- [1] ISO 230-7 (2005). Code d'essai des machines-outils – Partie 7. Exactitude géométrique des axes de rotation.
- [2] SCHLICKSBIER, T. and BRAASCH, J. (2001). "On the Accuracy of Rotary Tables". *Laser Metrology and machine performance V: Volume34* P.81-89.
- [3] SACHOT M., "Fraiseuses et centres d'usinage" Techniques de l'ingénieur, B 7 160 (En ligne) <http://www.techniques-ingenieur.fr/affichage/DispMain.asp?ngcmId= B7160&file=20060125214005-b7160/b7160-1.htm#I1.1> (Consulté le 24-04-2006)
- [4] FERREIRA, P.M. and RICHARD LIU, C. (1973). "A Method for Estimating and Compensating Quasi static Errors of Machine Tools". *Journal of Engineering for Industry*: Vol. 115, P. 149-159
- [5] SLOCUM, A.H. (1992). *Precision machine design*, Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers. p.750.
- [6] SUH, S.H. and JUNG, S.Y. (1998). "Calibration of Rotary Table in Multi-Axis Machine Tools". (En ligne) <http://www.sme.org/cgi-bin/get-item.pl?MR98-183&2&SME&> (Consulté le 24-04-2006)
- [7] RAMESH, R., MANNAN, M.A. and POO, A.N. (2000). "Error compensation in machine tools – a review. Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent error". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. [En ligne]. 40:9. 1235-1256.
- [8] SUH, S.H., LEE, E.S. (1998). "Error Modelling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools", *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*:14:656-663
- [9] SCHRODER, W., BRAASCH, J. and SCHLICKSBIER, T. (1992). "A new 6-D measuring device for rotary table calibration". *Laser metrology and machine performance*: pp. 149-156
- [10] ISO 230-2 (1997-12-15). Code d'essai des machines-outils – Partie II. Organisation internationale de normalisation, deuxième édition.

- [11] OUESLATI, H. et MAYER, J.R. (2004). Mémoire de maîtrise 'Étalonnage des écarts angulaires de l'axe de rotation d'une MOCN. École Polytechnique de Montréal, département de génie mécanique.
- [12] CLOUTIER, G.M. et MAYER, J.R.R. (1999) "Modélisation de machine en fabrication mécanique", Cours offert au département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal.
- [13] Instruction Manual, Advanced Spindle Analyser Version 7, Lion Precision
- [14] Operating Manual, ELCOMAT 3000 for S/N >600, Version 02/2004, MÖLLER-WEDEL OPTICAL
- [15] ALLEN, N., 2004. Analyseur de Broche. Département de Génie mécanique, École Polytechnique de Montréal.
- [16] Course Manual; Data Acquisition and Signal Conditioning. National Instrument Corporation. 2003. Vol. 1-3.

ANNEXE A : PROTOCOLE D'UTILISATION DE L'AUTOCOLLIMATEUR

L'autocollimateur est un instrument qui détecte, avec une haute précision, des petits déplacements angulaires d'un miroir par un faisceau optique collimatée. Cependant, afin d'exploiter la haute précision de cet instrument, il faut bien respecter les directives indiquées dans le guide d'utilisation [14] ainsi que dans ce protocole d'utilisation. De plus, l'installation et la manipulation de cet appareil requièrent une attention particulière afin de le protéger contre dommages possibles.

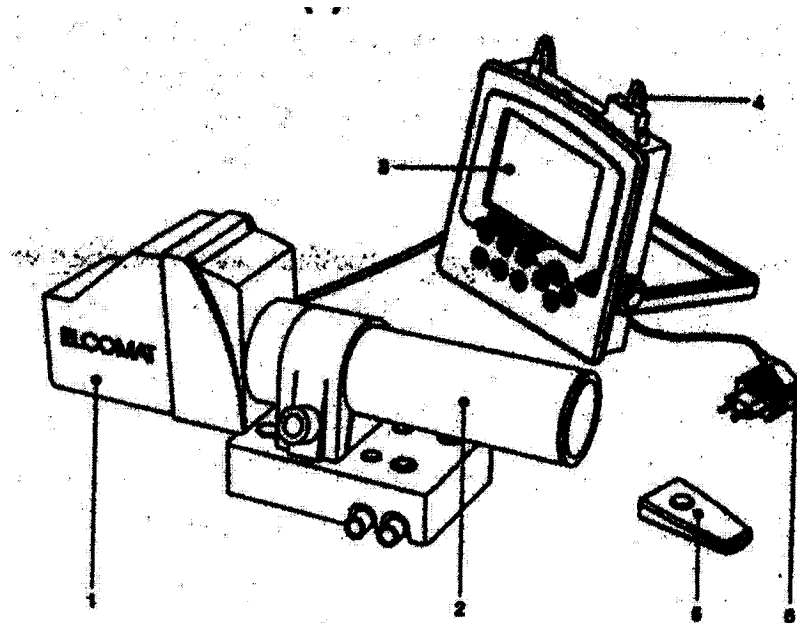


Figure A.1 - Schéma de ELCOMAT 3000¹

Description d'autocollimateur :

L'autocollimateur qui est utilisé dans cette recherche est de modèle ELCOMAT 3000 fabriqué par la compagnie MÖLLER-WEDEL OPTICAL GmbH. Comme indiqué à la Figure ci-dessous, les composants principaux de cet appareil sont: la tête optoélectronique d'autocollimation avec deux capteur d'haute résolution (1), le tube d'objectif (2), l'unité de commande avec un écran LCD (3), les câbles d'interface (4), une télécommande (5) et le bloc d'alimentation (6).

¹ Site web de la compagnie Moeller-Wedel (www.moeller-wedel-optical.com/)

Le Tableau ci-dessous présente les spécifications techniques de ELCOMAT 3000. Pour plus de détail, voir le manuel d'opération [14].

Tableau A.1 - Spécifications techniques de ELCOMAT 3000

Échelle totale		±1050"	
Échelle de mesure		< 200 mm	±1000"
	Distance autocollimateur/miroir	< 3000 mm	±500"
		< 7500 mm	±100"
Justesse de mesure	À chaque 20" d'étendue de mesure		±0.1"
	Pour L'étendue de mesure entière		±0.25"
Résolution de l'écran			0.005"
Reproductibilité			0.05"
Distance maximale			25.00 m
Longueur d'onde			660 nm
Condition d'opération		-10°C à 40°C et RH < 85%	

Montage de mesure

Dans le montage de mesure par l'autocollimateur, un polygone avec 12 miroirs, installés à des distances égales sur les faces, est positionné sur la table rotative. Le faisceau optique émis par l'autocollimateur est aligné avec ce polygone et reflété par les miroirs. Le désalignement angulaire de la table rotative est mesuré par l'appareil.

La réalisation de cette application exige certains matériels et ajustements lesquels sont mentionnés comme suit :

Matériels du montage de mesure

Autocollimateur : Comme expliqué au début de ce protocole, un autocollimateur de modèle ELCOMAT 3000 est utilisé pour ce montage de mesure.

Support ajustable : La tête de mesure de l'appareil doit être immobilisée à l'aide du support ajustable (Figure A.2). Deux vis d'ajustement sur ce support servent à

aligner l'appareil avec l'axe de rotation afin de minimiser les désalignements du montage.

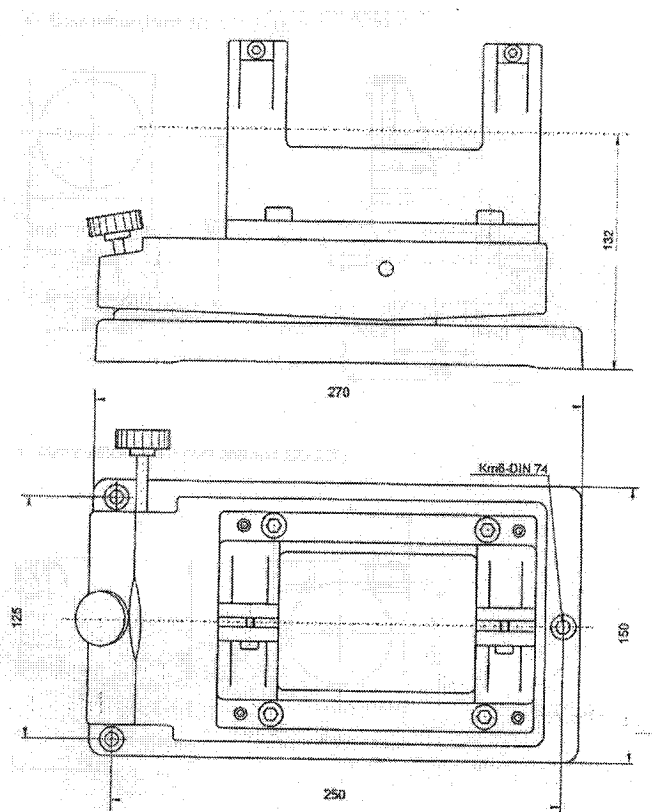


Figure A.2 - Support ajustable de ELCOMAT 3000¹

Polygone : Des miroirs équidistants, précisément attachés sur les faces d'un polygone, constituent le moyen de mesure de désalignement de l'axe de rotation (Figure A.3). Le polygone utilisé dans ce montage est constitué par douze miroirs. Par conséquent, le montage de mesure a la possibilité de mesurer le désalignement angulaire de l'axe de rotation à chaque 15 degrés.

¹ Site web de la compagnie Moeller-Wedel (www.moeller-wedel-optical.com/)

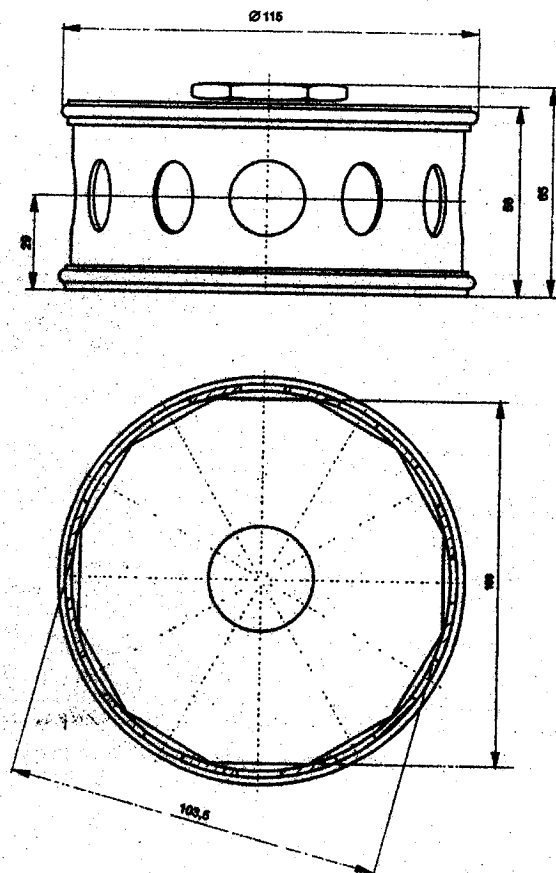


Figure A.3 - Polygone de mesure à 12 miroirs¹

Plaque d'ajustement : Comme indiqué à la section 2.1.1, le désalignement du montage de mesure peut introduire une erreur dans les valeurs mesurées. Une de ces erreurs principales est causée par le non-parallélisme entre l'axe du polygone et l'axe de rotation. La plaque d'ajustement est attachée sur la table rotative et en dessus le polygone sera installé. Les trois vis d'ajustements servent à aligner les deux axes de façon qui est expliquée dans ce protocole. Ainsi, des anneaux élastiques sont utilisés afin d'ajuster la plaque sur la surface de la table.

¹ Site web de la compagnie Moeller-Wedel (www.moeller-wedel-optical.com/)

Trépied : Le trépied utilisé dans ce montage est celui du laser interféromètre Renishaw qui était déjà existant au laboratoire. Ce trépied est fabriqué par un alliage d'aluminium. Il a donc un coefficient d'expansion thermique minimal.

Plaque du trépied : Cette plaque est utilisée pour installer le support ajustable d'autocollimateur sur le trépied à l'aide de trois vis.

Attachement laser : Cet attachement laser est conçu et fabriqué afin de rendre l'alignement d'autocollimateur avec le polygone facile et rapide. Il contient une diode laser, le boîtier et une pile. Précaution : le faisceau laser émis par la diode peut être nuisible si elle est orientée directement vers les yeux.

Installation :

Ce protocole explique les étapes à suivre afin d'installer les composants, mettre en fonction et ajuster le montage de mesure par l'autocollimateur. Pour le montage et l'utilisation de l'appareil d'autocollimateur, voir le manuel d'opération [14].

Faire la zéro machine de la MOCN avant de procéder à l'installation du montage de mesure.

À l'aide un chiffon, nettoyer la surface de la table rotative de tous les débris et de l'huile

Poser et positionner la plaque sur la table selon ses trous et ceux de la table. Le centre de la plaque doit être positionné au centre de la table rotative.

Insérer les anneaux élastiques en dessous de chaque trou de la plaque et serrer la plaque à l'aide des boulons jusqu'à ce que la plaque soit serrée sur la table. Cependant, une force excessive peut endommager les anneaux élastiques.

Poser le polygone sur la plaque et positionner au centre. Il faut éviter de toucher les miroirs ou respirer directement vers les miroirs du polygone. À l'aide de boulon, attacher le polygone sur la plaque en exerçant une force minimale de serrage, de sorte que le polygone puisse tourner sans une force excessive.

Poser le trépied en face de la machine et ajuster la hauteur approximativement avec la hauteur de la table. Ensuite, aligner le trépied à l'aide des niveaux pour qu'il soit

horizontal. Il est nécessaire que les éléments de fixations du trépied soient bien serrés et que le trépied soit bien installé à sa place.

Installer la plaque du support sur le trépied et fermer les vis d'installation. La plaque doit être attachée sur le trépied avec un serrage suffisant pour qu'il n'y n'ait pas de jeu entre la plaque et le trépied.

Attacher le support d'ajustement sur la plaque à l'aide des trois vis qui sont fournies.

Selon les directives fournies dans le manuel d'opération de l'appareil [14], fixer la tête de mesure dans le support d'ajustement, attacher les autres composants d'autocollimateur et mettre l'appareil en marche.

Installer l'attachement laser sur le tube de la tête d'autocollimateur et allumer le laser.

Ajuster la hauteur du trépied avec le miroir du polygone pour que le faisceau laser soit verticalement positionné au centre du miroir.

Le même ajustement est requis afin de positionner le faisceau laser au centre du miroir. Pour ce faire, tourner le polygone dans sa position. Une fois le faisceau laser est bien ciblé au centre du miroir, serrer la vis du polygone sur la plaque.

Enlever prudemment l'attachement laser sans déplacer la tête d'autocollimateur.

Démarrer la machine-outil et exécuter le programme code G afin de procéder au test désiré.

Alignement du montage :

Alignement du montage est composé en deux étapes : préliminaire et secondaire. L'ajustement préliminaire nous permet d'aligner l'autocollimateur avec un miroir du polygone. L'ajustement secondaire nous aidera à réaliser un alignement qui minimisera l'effet de l'excentricité du montage.

a) Alignement préliminaire

Une fois le faisceau laser est positionné au centre du miroir de polygone, il faut s'assurer que le faisceau reflété par le polygone est capté par l'autocollimateur.

Cette image peut être capturée rapidement dans le mode 'Crossline' de l'écran d'autocollimateur. Pourtant, dans la majorité des cas, l'image n'est pas capturée dès le premier ajustement.

Puisque l'attachement laser est installé à la tête de mesure, le retour du faisceau laser sur son point de départ nous assure de la bonne convergence du faisceau optique d'autocollimateur.

Afin de capturer le signal nommé X (Figure ci-dessous) sur l'écran de l'appareil, la vis d'ajustement horizontal du support doit être légèrement tournée. La préférence est d'avoir le signal X près du zéro car cela nous facilite l'ajustement à la fin du montage. De plus, la plage de mesure par l'autocollimateur est de $0,8^\circ$ pour chaque signal et, en conséquence, une valeur absolue de X et Y proche de zéro nous permettra d'exploiter une plage de mesure qui est plus étendue.

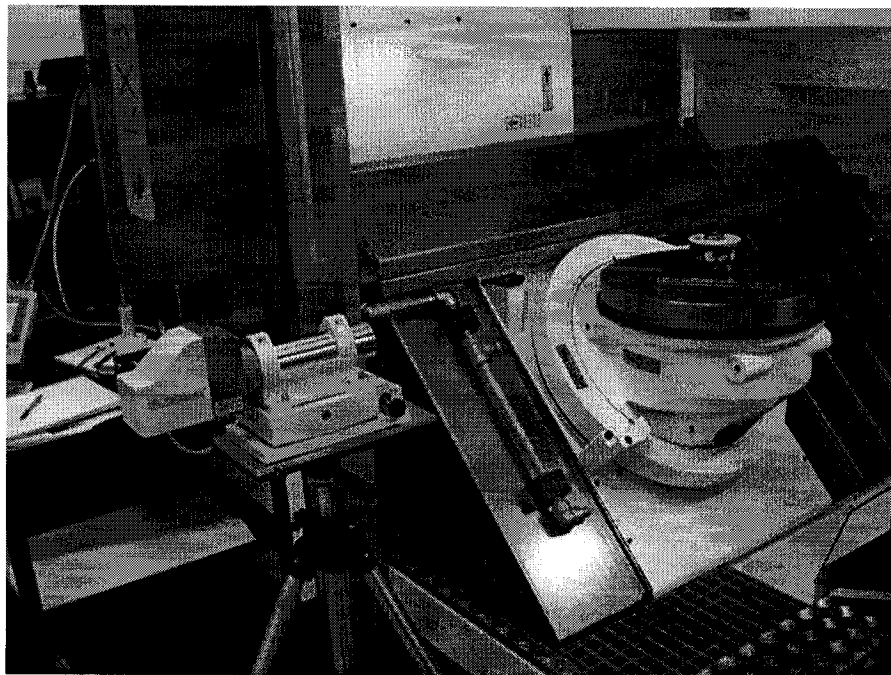


Figure A.4 - Exemple du montage de mesure par autocollimateur

b) Alignement secondaire

À l'aide de l'armoire de commande de la machine-outil, tourner la table rotative à 180° (la direction de l'axe X d'autocollimateur selon la figure ci-dessus).

Mesurer la variation du signal Y par rapport à sa valeur initiale. Afin de minimiser cette déviation, régler la moitié de cette différence à l'aide de la vis d'ajustement d'autocollimateur. Ensuite, régler l'autre moitié de la différence par les vis d'ajustement de la plaque du polygone. Il est conseillé de faire tourner ces vis toujours dans la même direction de serrage afin d'éviter l'éventuel effet du jeu d'inversion.

Retourner la table à sa position initiale (0°) et remesurer la déviation du signal Y.

Répéter les étapes 1 à 3 jusqu'à ce que cette déviation de Y entre les positions 0° et 360° soit minimale.

Ensuite, répéter les étapes 1 à 3 pour les positions 90° et 270° .

Le fait qu'il existe trois vis d'ajustement sur la plaque du polygone exige un réajustement simultané pour sur les angles 0° , 90° , 180° et 360° .

L'alignement secondaire aide aussi à minimiser l'effet de non-parallélisme du polygone avec l'axe de rotation.

Conditions de mesure:

Il est conseillé de minimiser la distance entre l'autocollimateur et le polygone afin de minimiser l'effet de turbulence d'air et d'améliorer l'environnement de mesure.

Pour s'assurer d'un équilibre thermique du montage avant et lors de la prise de mesure, les composants du montage doivent être exposés à la température ambiante du laboratoire avant d'entreprendre l'installation. De plus, après avoir démarré l'autocollimateur, il est conseillé d'attendre au moins 30 minutes avant la prise de mesure. Cela permet de se rendre à une équilibrer après l'échauffement de l'appareil.

La variation de la température d'ambiante doit rester inférieure à $\pm 1^\circ\text{C}$. Un changement de 1°C dans la température peut influencer les résultats jusqu'à 0.1 de arc seconds.

Le montage mécanique doit être libre des contraintes de distorsion et approximativement sans la vibration causée par la machine-outil ou d'autres sources de vibration à la proximité du montage.

Certificat de calibration de Elcomat:

Kalibrierzertifikat Certificate of Calibration

Seite 1 von 2

Page 1 of 2

Elektronischer Autokollimator
Electronic Autocollimator

ELCOMAT 3000Ident-Nr. / P/N **229 919**

Meßkopf - Nr.
Measuring head S/N **679**

Erstkalibrierung
Initial calibration ☒

Zentralgerät - Nr.
Control unit S/N **679**

Wiederholte Kalibrierung
Re-calibration ☐

Meßvorgang / Measuring procedure

Genauigkeitsüberprüfung des ELCOMAT 3000 mit dem MÖLLER-WEDEL-Präzisionsrundtisch Nr. PG 0480 und als Referenznormal Spiegelpolygon Typ 355462-3. Die Meßergebnisse sind auf nationale Normale rückführbar.
Accuracy check of ELCOMAT 3000 with MÖLLER-WEDEL precision round table No. PG 0480, reference standard: Reflecting polygon, type 355462-3. The measuring results can be traced back to national standards:

Spiegelpolygon Typ / Reflecting polygon type **355462-3**
Geräte-Nr. / Serial-No. **103**
Kalibrierzeichen / Calibration mark **3143 PTB 95**

Alle Meß- und Prüfmittel unterliegen der Prüfmittelüberwachung des QM-Systems der MÖLLER-WEDEL GmbH, zertifiziert nach DIN EN ISO 9001.
All measuring and test equipment is calibrated by the quality system from MÖLLER-WEDEL GmbH, certified according to DIN EN ISO 9001.

Meßergebnis / Measuring result

Abweichungen bei Meßabstand 0.1 m / Deviation at measuring distance 0.1m	garantierter Wert / guaranteed value	X - Achse X - Axis	Y - Achse Y - Axis
innerhalb 20° / within 20° (abs. ± 100°):	± 0.10 "	± 0.04"	± 0.03"
gesamter Meßbereich / total range (abs. ± 1000°):	± 0.25 "	± 0.07"	± 0.09"

Elcomat 3000 Nr. / S/N : 679

Seite 2 von 2
Page 2 of 2
 Richtungsabweichungen, bezogen auf den Einstellwert ["] :
 Deviations of direction, relating to set value ["] :

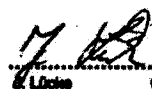
Einstellwert Set - value	X-Achse X-Axis			Y-Achse Y-Axis		
	+ 0 -			+ 0 -		
1008.00	0.00			0.00		
884.00	0.00			0.00		
720.00	0.00			0.00		
576.00	0.00			0.00		
432.00	0.00			0.00		
288.00	0.00			0.05		
144.00	0.00			0.05		
0.00	0.00			0.00		
- 144.00	-0.05			-0.05		
- 288.00	-0.05			-0.05		
- 432.00	-0.05			-0.05		
- 576.00	-0.05			-0.05		
- 720.00	0.00			-0.05		
- 884.00	0.00			-0.05		
- 1008.00	0.00			-0.05		

 Umgebungstemperatur während der Messung : $(20 \pm 0.5) ^\circ \text{C}$.
 Ambient temperature during measurement : $(20 \pm 0.5) ^\circ \text{C}$.

 Der ELCOMAT 3000 ist mit dem Zeichen versehen: Kalibriert 06/04
 The ELCOMAT 3000 is labeled: Calibrated

 MÖLLER - WEDEL OPTICAL GmbH
 Rosengarten 10
 D-22880 Wedel

Wedel, den 23.06.04


 L. Lücke Qualitätsmanager

Certificat de calibration du miroir polygonal:



MÖLLER-WEDEL OPTICAL

A HAAG-STREIT COMPANY

Kalibrierzertifikat

Certificate of Calibration

Nr. 282- 5313

Gegenstand / Subject : 12 – Flächenpolygon 2"
Polygon with 12 Surfaces 2"
Ident-Nr./ P/N : 205 313
Serien-Nr./ S/N : 282
Auftrags-Nr. / Order No.: 12342

Meßvorgang

Die Messung des oben angegebenen Polygons erfolgte unter Verwendung optischer Referenznormale. Alle Meß- und Prüfmittel unterliegen der Prüfmittelüberwachung des QM-Systems der MÖLLER-WEDEL GmbH, zertifiziert nach DIN EN ISO 9001. Die Meßergebnisse sind auf nationale Normale rückführbar.

Measuring Procedure

Measurement of the above mentioned polygon was performed with optical reference. All measuring and test equipment is calibrated by the quality system from MÖLLER-WEDEL GmbH, certified according DIN EN ISO 9001. The measuring results are traceable to national standards.

Spiegelpolygon Typ / Reflecting polygon type 355462-3
Geräte-Nr. / S/N 103
Kalibrierzeichen / Calibration mark 3143 PTB 95

Meßergebnis

Gemessen wurde jeweils der Winkel zwischen zwei angrenzenden Flächen. Der reduzierte Richtungsfehler, nach VDE/VDI 2605, wurde errechnet.

Measuring Result

The angle between two adjacent surfaces were measured. The reduced directional error according to VDE/VDI 2605 was calculated.

Flächenpaar/ Pair of Surfaces	Teilungswinkel / Splitting Angle	Abweichung / Deviation	Fläche / Surface	Richtungsfehler reduziert / Directional Error reduced
1 – 2	30 °	0,53 °	1	0,22 °
2 – 3	30 °	- 0,54 °	2	0,75 °
3 – 4	30 °	- 0,30 °	3	0,21 °
4 – 5	30 °	- 0,34 °	4	- 0,09 °
5 – 6	30 °	0,05 °	5	- 0,43 °
6 – 7	30 °	0,31 °	6	- 0,38 °
7 – 8	30 °	0,03 °	7	- 0,07 °
8 – 9	30 °	- 0,31 °	8	- 0,04 °
9 – 10	30 °	0,11 °	9	- 0,35 °
10 – 11	30 °	0,19 °	10	- 0,24 °
11 – 12	30 °	0,52 °	11	- 0,05 °
12 – 1	30 °	- 0,25 °	12	0,47 °

Die Meßunsicherheit beträgt 0,3° / The measuring uncertainty amounts to 0,3°.

MÖLLER - WEDEL OPTICAL GmbH
Rosengarten 10
D-22880 Wedel

Wedel, den 21.06.2004

[Signature]
J. Lücke Qualitätswesen

ANNEXE B : PROTOCOLE D'UTILISATION DES CAPTEURS CAPACITIFS

Le montage de mesure par capteurs capacitifs nous permet de mesurer les cinq composants de l'écart de l'axe de rotation (ε_x , ε_y , ε_z , γ_y et γ_z).

Le montage de mesure est constitué de cinq capteurs capacitifs installés sur une base fixée à la table rotative. Une cible à deux billes sera installée sur la broche et mise au centre des capteurs. Les écarts de l'axe de rotation seront mesurés par capteurs capacitifs lors du déplacement angulaire de la table rotative.

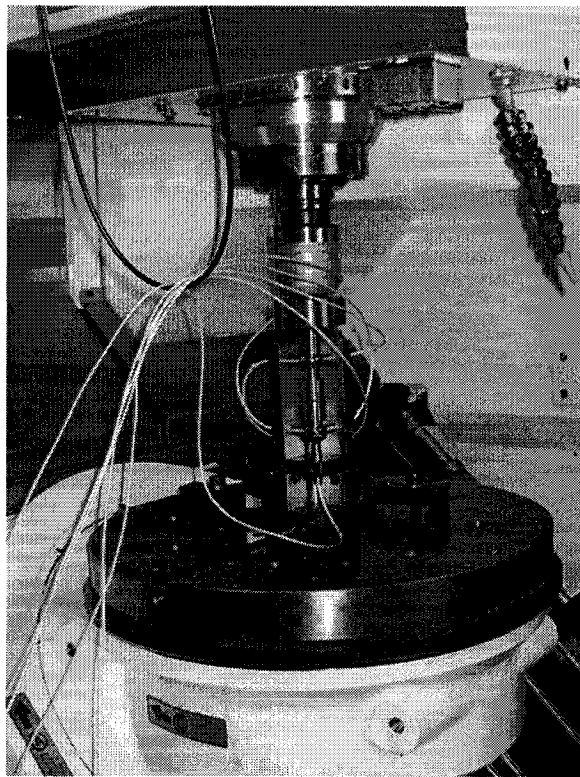


Figure B.1 - Exemple du montage de mesure par capteurs capacitifs

L'équipement et les composants destinés à cette application sont majoritairement pris de ceux utilisés dans l'analyseur de broche "*Lion Precision*". Dans le cas d'analyse de broche, la cible est installée sur la broche et suit la rotation de celle-ci, tandis que les capteurs capacitifs sont fixes sur la table rotative de la machine-outil. Contrairement, adaptées à l'application de cette recherche, la table rotative est l'élément tournant et la cible est considérée comme la référence fixe.

Puisque le manuel d'opérateur et une guide d'utilisation de "*Lion Precision*" sont déjà disponibles [13], ce protocole est consacré aux aspects particuliers du montage qui sont adaptés à l'application dans cette recherche.

Matériel :

1- Capteurs

Cinq capteurs capacitifs "*Lion Precision*" de modèle C1-C sont fournis avec le système. Les capteurs sont munis d'une protection concentrique du champ magnétique pour ce dernier reste dans une zone cylindrique entre le capteur et la cible. De plus, chaque capteur capacitif contient un capteur thermique qui permet de mesurer la température et compenser l'effet de la température sur la mesure. Le Tableau ci-dessous présente une brève spécification technique de ces capteurs capacitifs :

Tableau B.1 - Spécifications du capteur capacitif *Lion-Precision C1-C*

La portée de calibration du capteur C1-C				
Portée standard (Pouce)	Portée fine (Pouce)	Portée ultrafine (Pouce)	Diamètre (Pouce)	Longueur du câble (Pied)
0,005-0,015	0,003-0,005	0,0008-0,0012	0,375	6

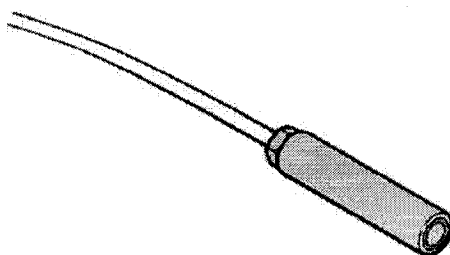


Figure B.2 - Schéma du capteur capacitif¹

2- Support à capteurs

¹ Site web de la compagnie Lion Precision (www.lionprecision.com/)

Le support est formé de trois morceaux assemblés selon la configuration désirée. Ces morceaux sont fabriqués du même matériau (ST-416) afin de respecter un coefficient thermique proche de celui de la machine-outil [13]. Pour cette configuration, les trois morceaux (la base, le support tri-capteurs et celui bi-capteurs) doivent être montés.

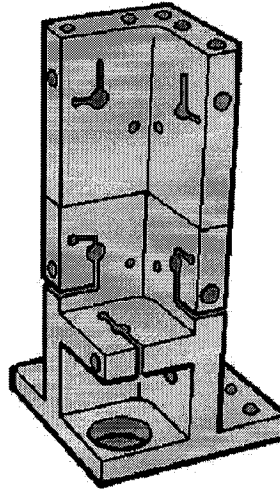


Figure B.3 - Support des capteurs à trois morceaux¹

3- Pièce de centrage

Afin de pouvoir facilement centrer le support au centre de la table rotative, une pièce de centrage est conçue et fabriquée. Cette pièce est insérée dans le trou du centre de la table (s'il y a lieu). Sur l'autre bout de cette pièce, la base du support sera insérée.

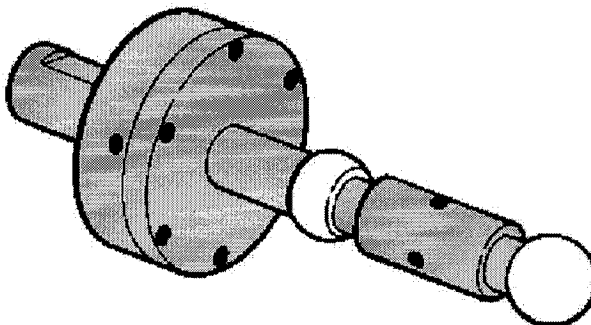
4- Cible

Parmi les cibles fournies avec le système *Lion Precision*, celle à deux billes est nécessaire pour cette expérimentation. La dimension de la cible est indiquée au Tableau ci-dessous:

¹ Site web de la compagnie Lion Precision (www.lionprecision.com/)

Tableau B.2 - Dimensions de la cible à deux billes

Diamètre (pouce)	Distance entre les billes	L'erreur de circularité
1.00	3.00 pouces	< 5 μ in

Figure B.4 - Schéma de la cible à deux billes¹

5- Conditionneur

Le conditionneur DMT22 (Figure B.5) convertit la distance mesurée par capteurs au voltage analogue qui sera acheminé vers l'ordinateur. Plus de détails sur le conditionneur sont données au manuel d'instruction d'analyseur de broche [13].

¹ Site web de la compagnie Lion Precision (www.lionprecision.com/)

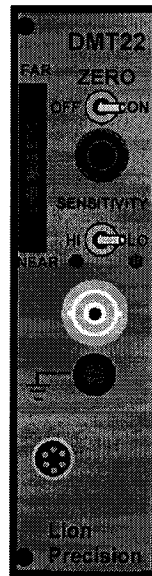


Figure B.5 - Conditionneur du signal DMT22

6- Boîtier DB7

Le boîtier contient cinq conditionneurs DMT22, un module de température et la sortie des données des capteurs vers la carte d'acquisition des données d'ordinateur.

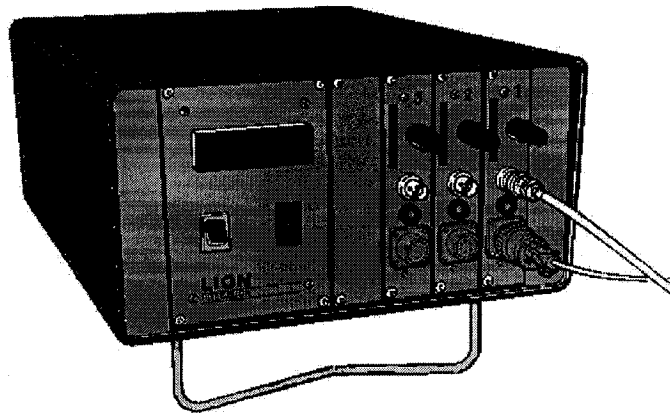


Figure B.6 - Boîtier DB7

7- Carte d'acquisition des données

Une carte d'acquisition des données est utilisée pour convertir des signaux analogues aux signaux numériques qui seront rentrés et traités dans un ordinateur. Un module PXI-1000B de National Instruments qui est un ensemble intégré des cartes d'acquisition des données et un ordinateur sont utilisés dans cette recherche.

8 – Logiciel d'acquisition des données

Une fois les signaux numériques sont générés, un logiciel d'acquisition et de traitement des données est requis. Ce logiciel doit permettre de définir des paramètres d'acquisition (e.g, fréquence d'échantillonnage, la borne maximale et minimale du voltage, etc.) et d'enregistrer les valeurs désirées. Un code de LabVIEW est conçu et développé pour l'acquisition des données par capteurs capacitifs et adaptés à cette application de mesure des écarts des axes rotatifs. Plus de détail ainsi que le programme sont présentés à l'annexe blabla.

Installation :

Avant d'installer le montage de mesure, il faut s'assurer du bon état du matériel décrit dans la section précédente.

Préparations :

La surface de la table rotative doit être nettoyée des coupeaux et de toutes autres substances en utilisant un chiffon.

Installer le boîtier DB7, et le module PXI1000B sur une table à côté de la machine-outil et à une distance respectant la longueur des câbles des capteurs.

Brancher le boîtier et le module à la prise d'alimentation électrique.

Utiliser des câbles coaxiaux afin de connecter la sortie BNC des modules DMT22 à l'entrée de la carte PXI-4472 du module PXI-1000B.

Après avoir branché les câbles, allumer l'ordinateur et le boîtier.

Nettoyer la cible à deux billes avec un chiffon propre et de l'alcool afin d'enlever la couche d'huile et la poussière. En tout temps, il faut respecter la même précaution qu'avec les cales étalons quant à la manutention de la cible. Il ne faut pas toucher la surface des billes avec les mains nues afin d'éviter l'éventuelle apparition de la rouille.

Installation du support :

Pour les tables rotatives qui ont un trou de centrage, utiliser une pièce de centrage afin de bien centrer le support au centre de la cible. Cela aide à approcher le plus possible l'axe de rotation et l'axe formé par capteurs et, par conséquent, à minimiser l'excentricité. Pour la machine Huron KX-8, une pièce de centrage est déjà fabriquée. Si la table n'a pas de trou de centrage, un indicateur à cadran doit être installé à la broche et le centrage doit être réalisé sur le trou au milieu de la base du support.

Une fois le support est centré sur la table rotative, en utilisant les pinces de maintien, garder le support à sa position.

La table est supposée effectuer une rotation (max. 420°) qui est limitée par la longueur des fils des capteurs. Il est conseillé de voir la direction de rotation et installer le support de façon à ne pas endommager les fils dans les deux directions d'aller-retour.

De plus, il est possible d'aligner les deux faces du support avec les deux axes d'articulations linéaire de la machine afin de pouvoir exprimer les écarts de l'axe dans un repère machine. Pour cela, aligner les faces du support avec les deux axes d'articulation de la machine selon la configuration. Un indicateur à cadran est monté sur la broche et est accoté à une face du support. En déplaçant l'axe, la variation de l'indicateur doit être minimisée par l'ajustement du support à sa place.

Serrer les pinces à la fin d'ajustement.

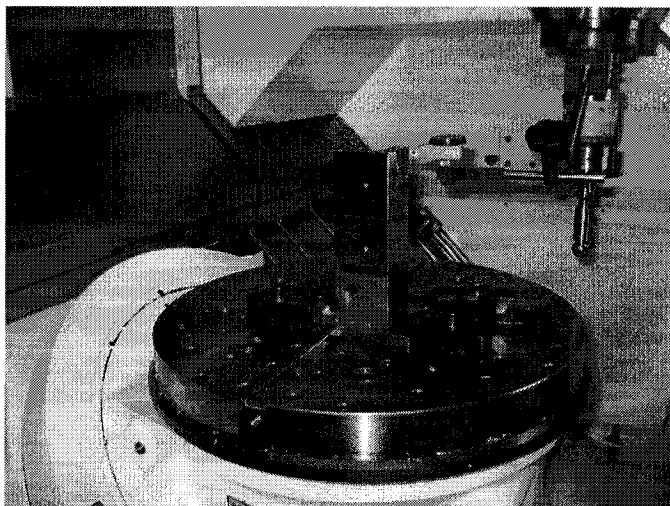


Figure B-7 - Alignement du support sur la table avec cadran
Installation des capteurs:

La façon d'installer les capteurs sur le support est identique à celle d'analyseur de broche. Il est conseillé de prendre des mesures nécessaires afin de protéger les fils de tous risques d'endommagement. La surface des capteurs doit être bien nettoyée. Les précautions à respecter lors d'utilisation des capteurs capacitifs sont identiques à celles des cales étalons.

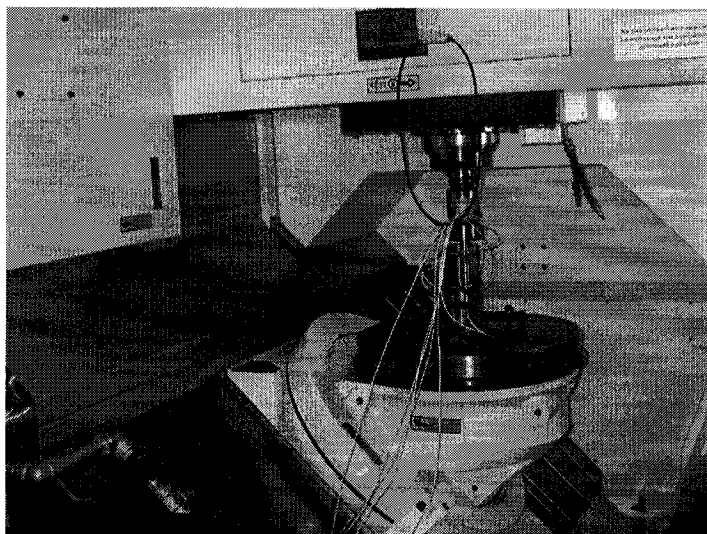


Figure B-8. Schéma du montage du support et des capteurs

Installation de la cible :

Insérer la cible dans la broche et serrer la, comme indiqué dans le guide d'instruction de l'analyseur de broche [15]. Ensuite, déplacer les axes afin de positionner la broche au centre de la table rotative. Il faut bien surveiller les déplacements afin d'éviter toute collision entre la broche et les capteurs ou le support. Ne pas toucher les billes des cibles pour éviter la formation des rouilles sur ces surfaces.

Ajustement :

Positionner la cible en X, Y et en Z en l'alignant approximativement par rapport aux positions des capteurs.

Approcher le capteur Z à la cible manuellement.

En déplaçant la cible dans le plan X-Y (ou le plan qui est normal à la broche) positionner la cible au centre du capteur Z. Pour cela, d'abord positionner la cible dans une direction en surveillant la lumière indicatrice de ce capteur sur le boîtier. Une fois la cible est positionnée au centre du capteur, immobiliser cette direction et répéter la même étape pour l'autre direction.

Éloigner manuellement le capteur Z de la cible et approcher le capteur X (ou Y).

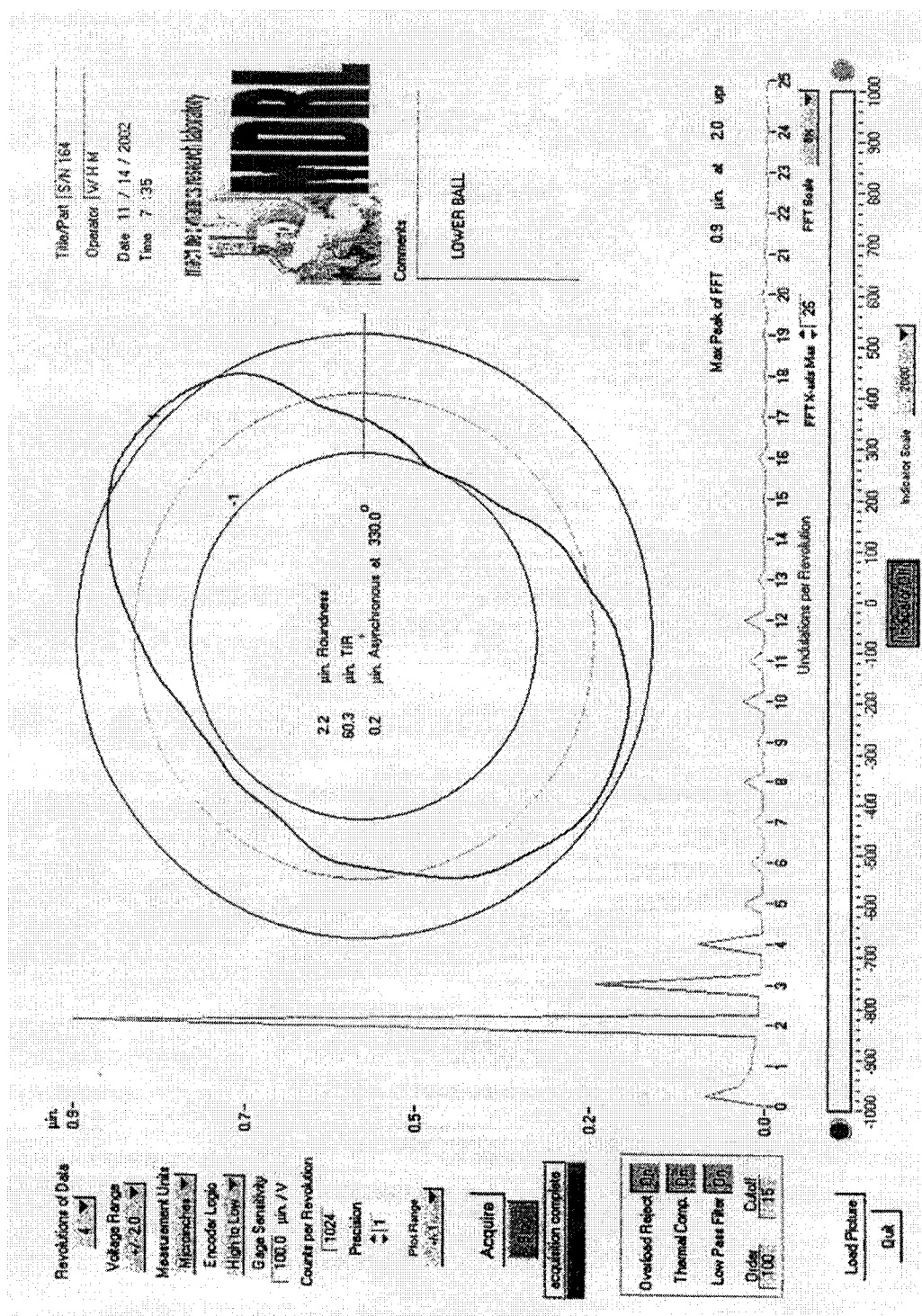
Déplacer la cible dans la direction Z (ou la direction de la broche) et positionner la cible la plus proche possible au capteur X (ou Y) et garder cette position.

Déplacer manuellement les capteurs X, Y et Z jusqu'à ce que les lumières indicatrices de ces capteurs sur le boîtier soient approximativement au milieu de sa course.

Tourner la table rotative lentement et surveiller les distances des capteurs. En déplaçant les capteurs X, Y ou Z garder la variation des distances à l'intérieur de sa course sur le boîtier. Cette course correspond à la portée de mesure par capteurs capacitifs. Il est donc essentiel de la respecter. De plus, cet alignement permet de minimiser l'excentricité du montage causée par le non-parallélisme de la broche et l'axe de rotation.

Verrouiller la broche, si possible, pour que la cible soit immobilisée durant le test.

Certificat de calibration de la cible



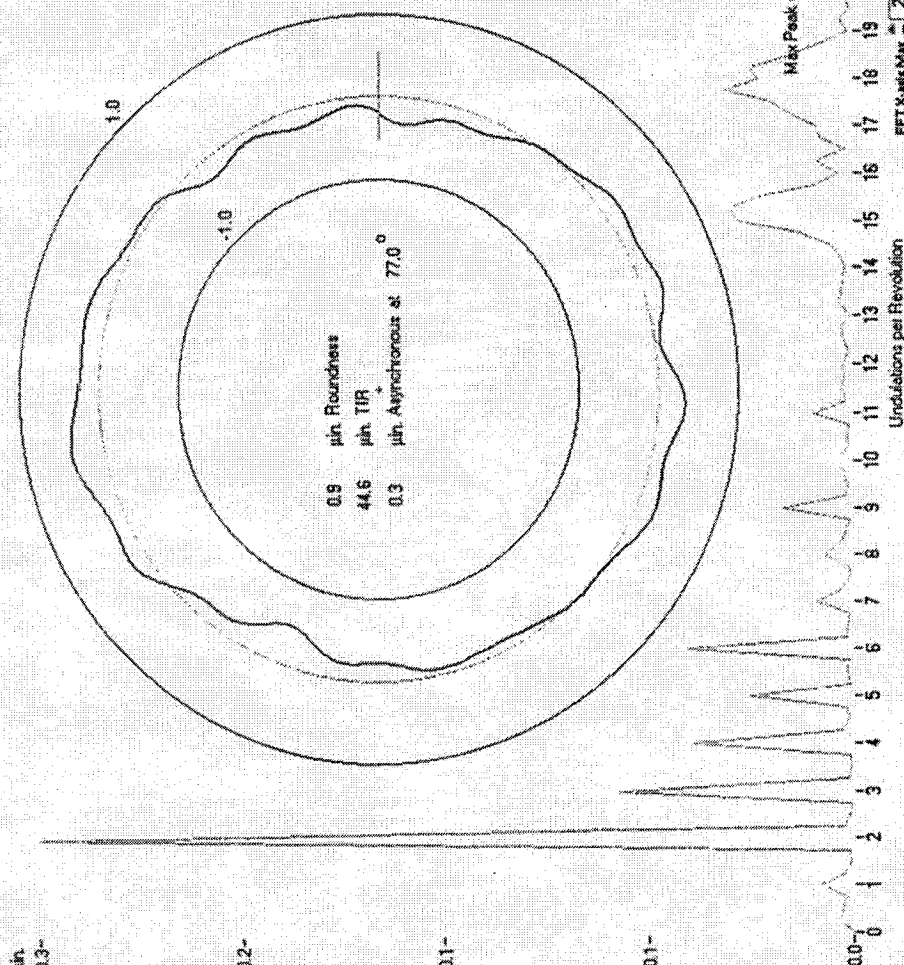
Tape/Pat [S/N 154]
 Operator [VHM]
 Date 12 / 28 / 2002
 Time 17:00

POSTING OF RESULTS REQUIRED BY NIST

MDRL

Comments

TOP BALL
 JOB # 68512



Revolutions of Data 4
 Voltage Range 5/7.20
 Measurement Units Microinches
 Encoder Logic High to Low
 Gate Sensitivity 100.0 µin / V
 Counts per Revolution 1024
 Precision 1
 Plot Ranges 2500
 Acquire 2500
 acquisition complete
 Overload Reject On
 Thermal Comp. On
 Low Pass Filter On
 Order 100
 Cutoff 15

Load Picture
 Qual



Calibration Number: 1871

Output Voltage: +10 to -10 Volts

Measurement Range: 125 to 375 micrometers

Probe Standoff: 250 micrometers

Probe Model: C1-C

Driver Model: DMT22

Channel: 1

Bandwidth: (-3dB): 15000 Hz

Probe Serial: 030301-03

Driver Serial: 030124-06

Sensitivity: LO

Output Sensitivity: 0.08 Volts/micrometers

Customer ID: 1936

Calibration Date: 7/30/03

Order ID: 46241

Calibration Due Date: 7/29/04

Calibration Report for Ecole Polytechnique

Peak to Peak Resolution: 56.25 nanometers (Spec: 120) Linearity Error: 0.05%
 RMS Resolution: 5.00 nanometers (Spec: 15) Total Error: 0.08% (Spec: 0.3%)

Gap	Output	Output converted to	Error
micrometers	Volts	micrometers	micrometers
125.000	10.017	124.790	-0.210
140.625	8.758	140.531	-0.094
156.250	7.502	156.220	-0.030
171.875	6.251	171.859	-0.016
187.500	5.002	187.472	-0.028
203.125	3.752	203.098	-0.027
218.750	2.501	218.742	-0.008
234.375	1.250	234.373	-0.002
250.000	0.000	250.000	0.000
265.625	-1.249	265.614	-0.011
281.250	-2.501	281.266	0.016
296.875	-3.752	296.906	0.031
312.500	-5.002	312.523	0.023
328.125	-6.250	328.120	-0.005
343.750	-7.503	343.783	0.033
359.375	-8.757	359.459	0.084
375.000	-10.000	375.005	0.005

Combined Uncertainty of Calibration = 0.5000 microinches plus 12.9000 microinches/inch of range

Environmental Conditions: Temperature: 23.6 °C Pressure: 735.6 mmHg Humidity: 42.9% RH

Environmental Conditions Measurement IDs: Thermometer ID: 142 Barometer ID: 145 Hydrometer ID: 142

Calibration Equipment IDs: Meter ID: 20 Mechanical Calibrator ID: 88 Function Generator ID: 98

Calibration Procedure ID: T014-6360

* denotes out of spec condition

Technician: Skip Buckmiller

This certificate conforms to ISO 10012-1, Section 4.8

All Lion Precision calibrations are NIST traceable. Detailed traceability information available upon request.

Lion Precision 563 Shoreview Park Road Shoreview, MN 55126 USA
 Phone: (651) 484-8544 Fax: (651) 484-6824 support@lionprecision.com www.lionprecision.com

ANNEXE C : ACQUISITION DE DONNÉES D'AUTOCOLLIMATION

Le transfert des données d'autocollimateur à l'ordinateur se fait par une connexion RS-232. Un code d'acquisition des données est conçu et développé en *LabView* [16] afin de permettre à l'utilisateur de définir certains paramètres de configuration de l'acquisition.

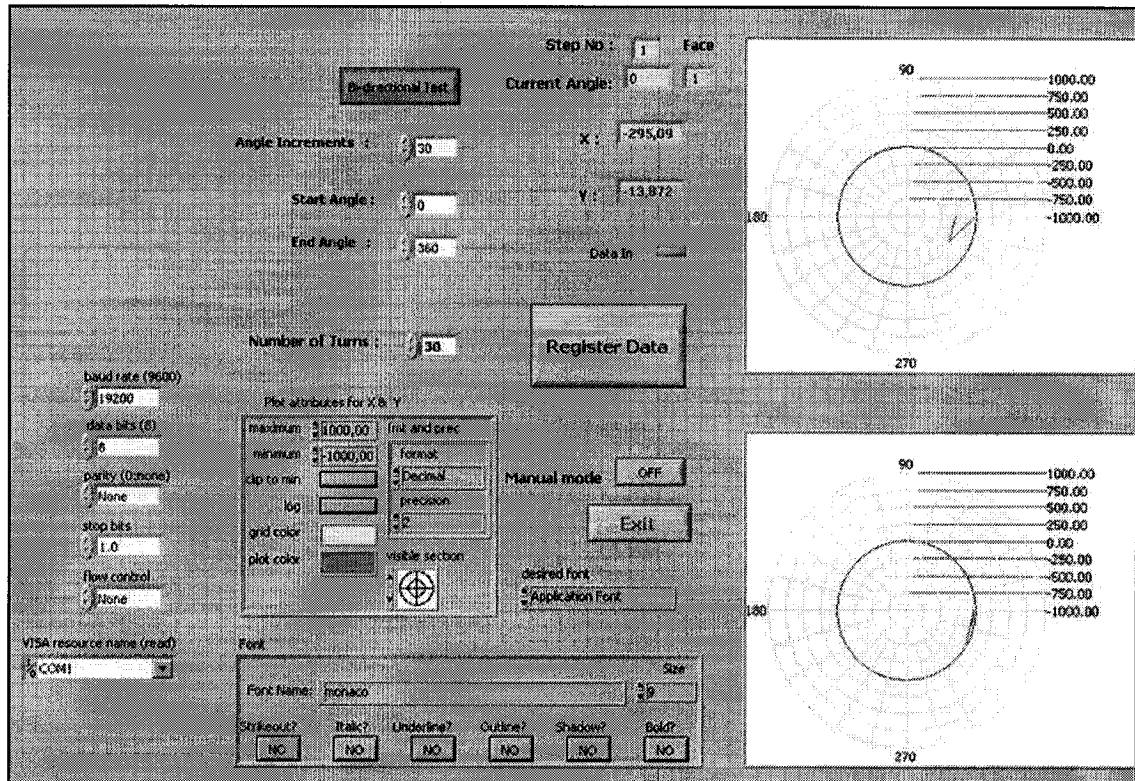


Figure C.1 - Le logiciel d'acquisition des données par l'autocollimateur
L'utilisateur peut choisir les valeurs de ces paramètres ou utiliser les valeurs mises par défaut. Ces paramètres sont les suivants :

Tableau C.1 - Paramètres et configuration de mesure

Paramètres de configuration du parcours		Valeur par défaut
Manual mode (ON/OFF):	Mode d'acquisition (manuel/automatique)	OFF
Bidirectional/Unidirectional:	Test aller/retour ou aller simple	Bidirectional
Angle Increments:	Incrément du déplacement angulaire	30°
Start Angle:	Angle initial de la table	0°
End Angle:	Angle de la table à la fin de l'essai	360°
Number of runs:	Nombre de répétitions du même parcours	1
paramètres d'acquisition		
Samples per channel:	Vitesse d'échantillonnage des canaux	1000 sec ⁻¹
Minimum Value:	Borne minimale de la tension	-10 V
Maximum Value:	Borne maximale de la tension	10 V
Rate:	Fréquence d'échantillonnage	1000,00 Hz
paramètres de Input/Output		
Clock Source:	Source de référence de synchronisation	Onboard Clock
Probe X2, Y2, X, Y et Z:	Source d'entrée sortie (I/O) des capteurs	-

Pour procéder à l'acquisition des données par le code '*Autocollimator*', suivre les étapes ci-dessous :

Démarrer le logiciel *LabView* et le code nommé '*Autocollimator*'. Choisir les paramètres de configuration du code selon l'essai qui est supposé être effectué. Ensuite, appuyer sur le bouton '*Run*' afin de démarrer le code. Le programme d'acquisition des données d'autocollimateur est mis en marche. Pourtant, l'acquisition ne sera pas effectuée jusqu'à ce que l'opérateur ne commande le début d'acquisition par le bouton '*Register Data*'.

Démarrer le code G de la machine-outil qui est développé pour effectuer des déplacements linéaires de la table rotative selon les conditions d'essai (i.e., la période et l'angle des déplacements). Des exemples de code G utilisés dans cette recherche qui sont développés pour deux contrôleurs *Siemens* et *Fanuc* sont donnés à l'annexe (E).

Appuyer sur le bouton '*Register Data*' du programme '*Autocollimator*' et ensuite sur le bouton '*Start*' du contrôleur de la machine-outil.

Si le code est configuré pour prendre des mesures de façon manuelle, il faut appuyer sur le bouton '*Acquire Data*' à chaque moment où les données doivent être enregistrées. Sinon, le programme fera l'acquisition selon la période définie et s'arrêtera à la fin de l'essai.

À la fin d'acquisition, le programme demandera le nom du fichier à enregistrer et un nom par défaut est proposé. Modifier le nom au besoin et appuyer sur l'icône *OK* pour que le programme soit terminé.

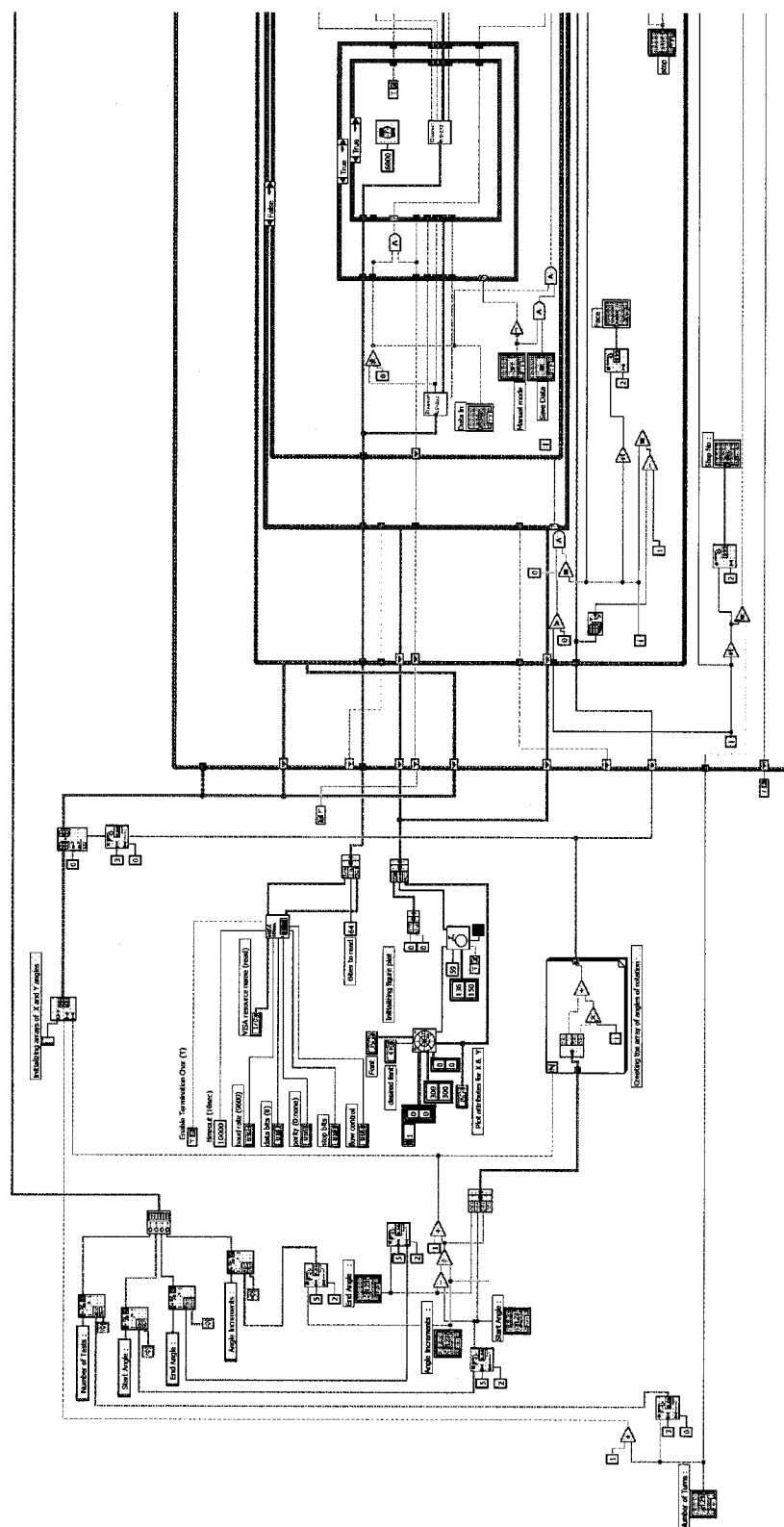


Figure C.2 - Schéma du code LabVIEW pour autocollimateur - page 1

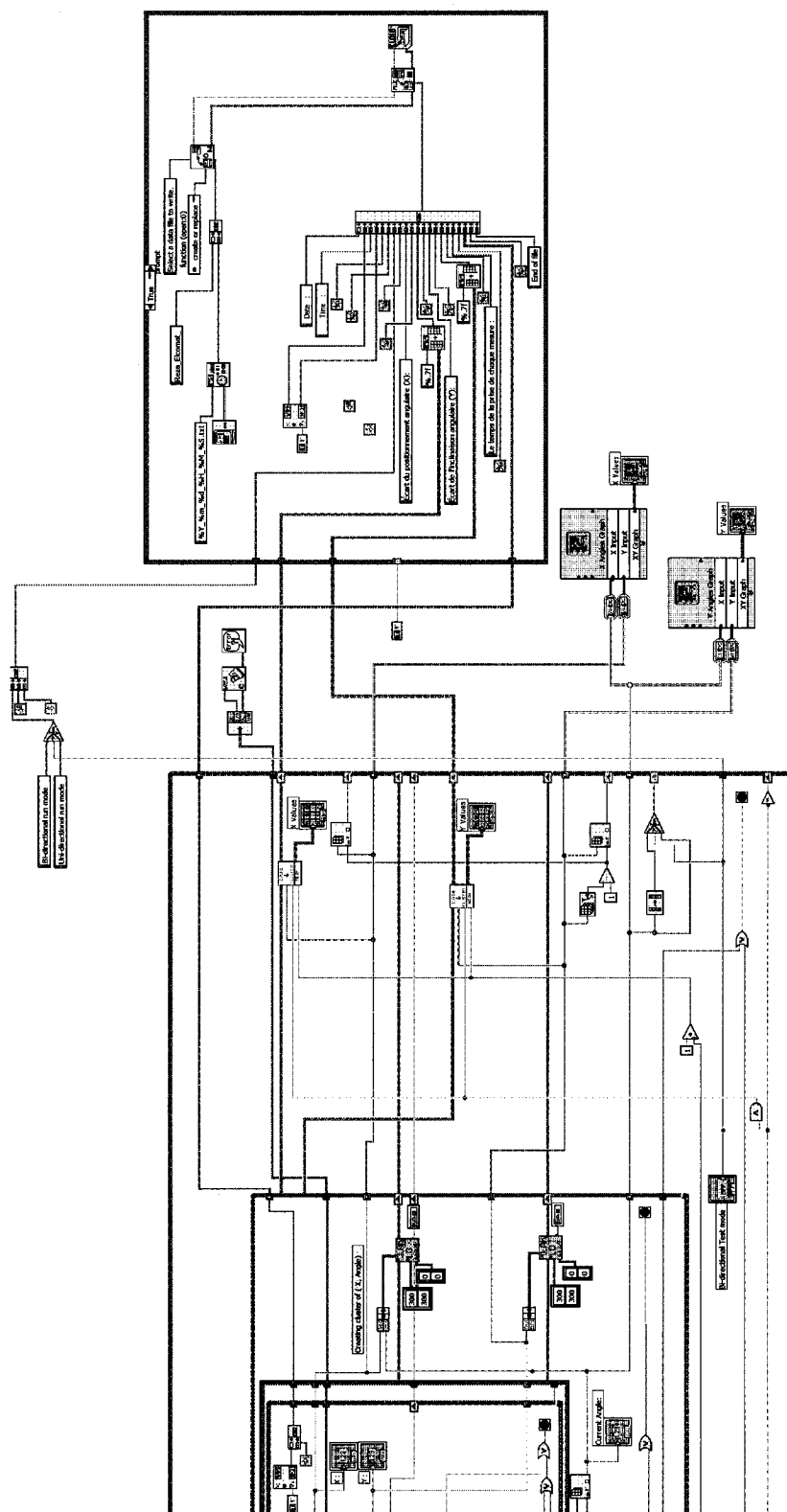


Figure C.3 - Schéma du code LabVIEW pour autocollimateur - page 2

ANNEXE D : ACQUISITION DE DONNÉES DES CAPTEURS CAPACITIFS

Puisque le logiciel du système *Lion Precision* est uniquement conçu pour effectuer les essais d'analyse de broche, un logiciel d'acquisition des données est développé en *LabView* afin de pouvoir prendre des mesures pour l'application définie dans cette recherche.

Le code permet à l'utilisateur de définir certains paramètres de configuration de l'acquisition pour effectuer des essais selon des conditions d'essai différentes.

Figure D.1 - Logiciel d'acquisition des données par capteurs capacitifs

L'utilisateur peut choisir les valeurs de ces paramètres ou utiliser les valeurs mises par défaut. Ces paramètres sont les suivants :

Tableau D.1 - Paramètres et configuration de mesure

Paramètres de configuration du parcours		Valeur par défaut
Manual mode (ON/OFF):	Mode d'acquisition (manuel/automatique)	
Bidirectional/Unidirectional:	Test aller/retour ou aller simple	
Angle Increments:	Incrément du déplacement angulaire	
Start Angle:	Angle initial de la table	
End Angle:	Angle de la table à la fin de l'essai	
Number of runs:	Nombre de répétitions du même parcours	
paramètres d'acquisition		
Samples per channel:	Vitesse d'échantillonnage des canaux	1000 1/sec
Target Shape Correction Factor:	Facteur de correction de l'effet de la géométrie (1= plat, 0.928 = Sphère)	0.928
Minimum Value:	Borne minimale de la tension	-10 V
Maximum Value:	Borne maximale de la tension	10 V
Rate:	Fréquence d'échantillonnage	1000,00 Hz
paramètres de Input/Output		
Clock Source:	Source de référence de synchronisation	Onboard Clock
Probe X2, Y2, X, Y et Z:	Source d'entrée sortie (I/O) des capteurs	

Pour procéder à l'acquisition des données par le code '`capacitance_sensors`', suivre les étapes ci-dessous:

Démarrer le logiciel *LabView* et le code nommé '`capacitance_sensors`'. Choisir les paramètres de configuration du code selon l'essai qui est supposé être effectué. Ensuite, appuyer sur le bouton '*Run*' afin de démarrer le code. Le programme d'acquisition des données des capteurs capacitifs est mis en marche. Pourtant, l'acquisition ne sera pas effectuée jusqu'à ce que l'opérateur ne commande le début d'acquisition par le bouton '*Register Data*'.

Démarrer le code G de la machine-outil qui est développé pour effectuer des déplacements linéaires de la table rotative selon les conditions d'essai (i.e., la

période et l'angle des déplacements). Des exemples de code G utilisés dans cette recherche qui sont développés pour deux contrôleurs *Siemens* et *Faunuc* sont donnés à l'annexe E.

Appuyer sur le bouton '*Register Data*' du programme '*capacitance_sensors*' et ensuite sur le bouton '*Start*' du contrôleur de la machine-outil.

Si le code est configuré pour prendre des mesures de façon manuelle, il faut appuyer sur le bouton '*Acquire Data*' à chaque moment où vous désirez que les données soient enregistrées. Sinon, le programme fera l'acquisition selon la période définie et s'arrêtera à la fin de l'essai.

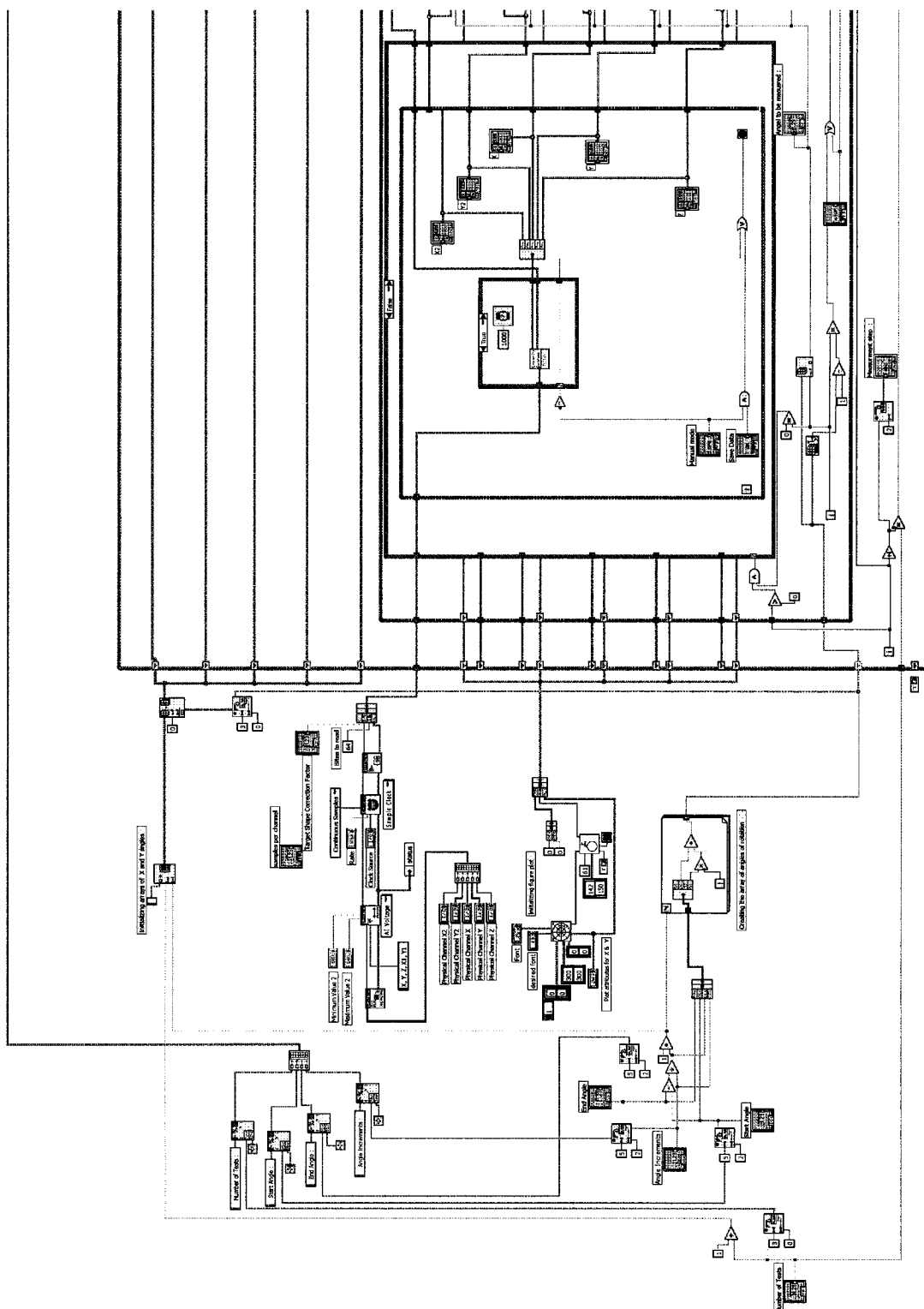


Figure D.2 - Schéma du code LabVIEW pour capteurs capacitifs - page 1

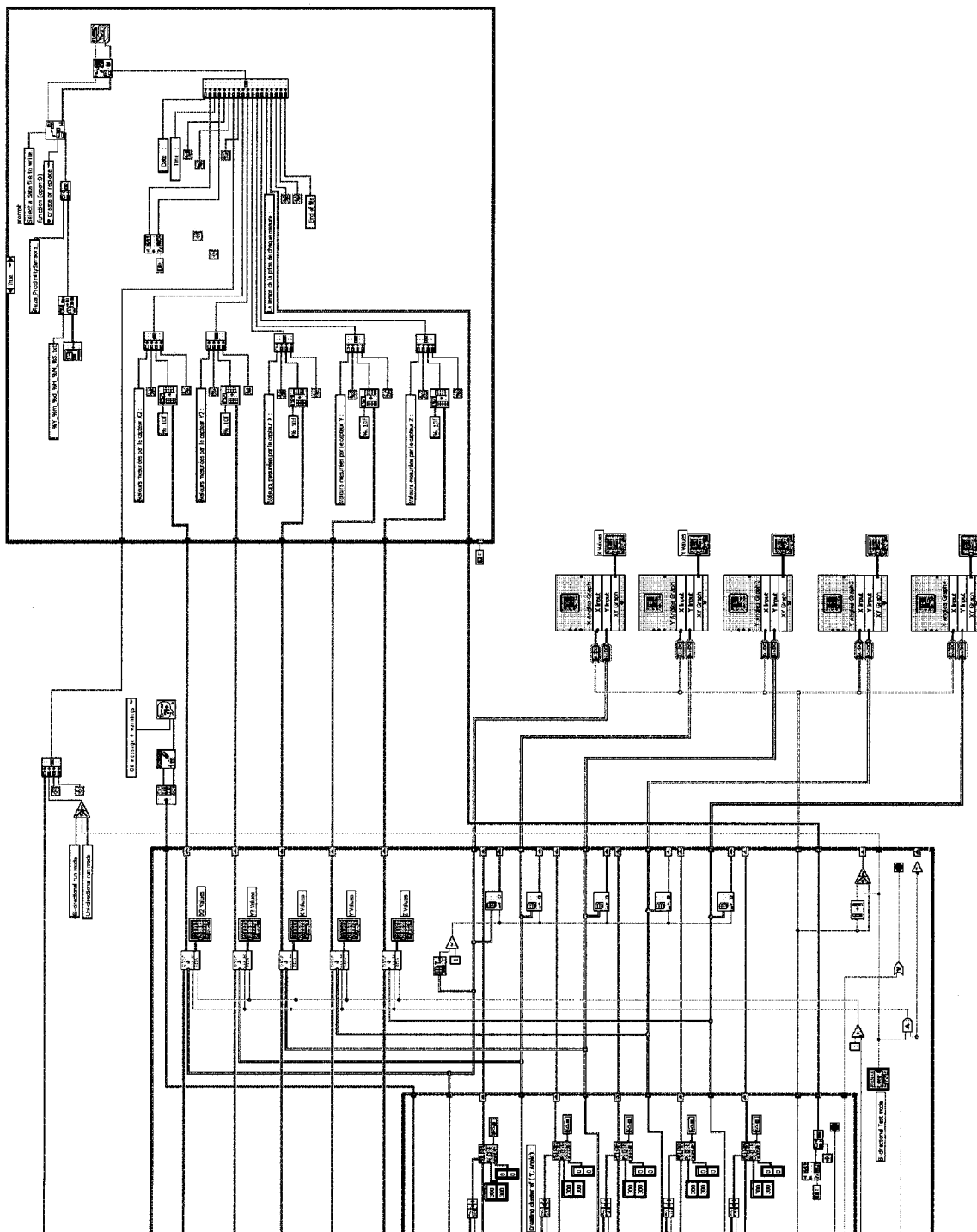


Figure D.3 - Schéma du code LabVIEW pour capteurs capacitifs - page 2

ANNEXE E : PROGRAMMES DE CODE G

HURON KX8-FIVE :

Cette machine est équipée d'un contrôleur *Siemens*. Le programme en code G ci-dessous est un exemple des programmes qui sont utilisés selon le procédé expérimental. Ce programme peut être modifié afin de répondre aux exigences des autres procédés de mesure.

```
r1 = 0 ;      start angle
r2 = 360;     end angle
r3 = 30;      angle increment
r4 = 360;     feed
r5 = 10;      dwell
r6 = 5;       number of strokes
r9 = 5;       over travel angle
;
r7 = (r1-r9); actual angle
r8 = 0;       actual stroke
m27
spos = 0
g90 g1 c = r7 f = r4
m0
g4 f = r5
while r8 < r6
  while (r7 < r2);    positive direction
  r7 = r7 + r3
```

```
c = r7
g4 f = r5
endwhile
c = r7 + r9
g4 f = r5
c = r7
g4 f = r5
while (r7 > r1);      negative direction
    r7 = r7 - r3
c = r7
g4 f = r5
endwhile
c = r7 - r9
g4 f = r5
c = r7
g4 f = r5
endwhile
m2
```

MITSUI SEIKI HU-40 :

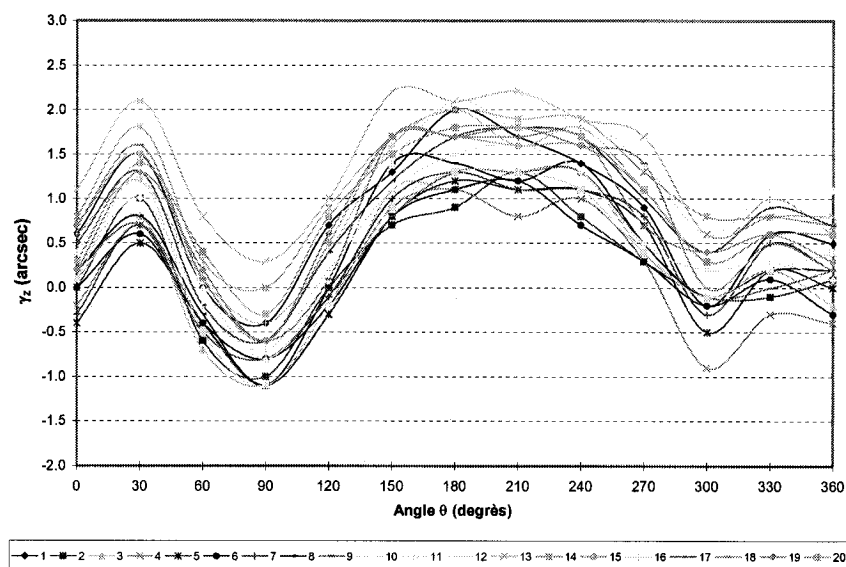
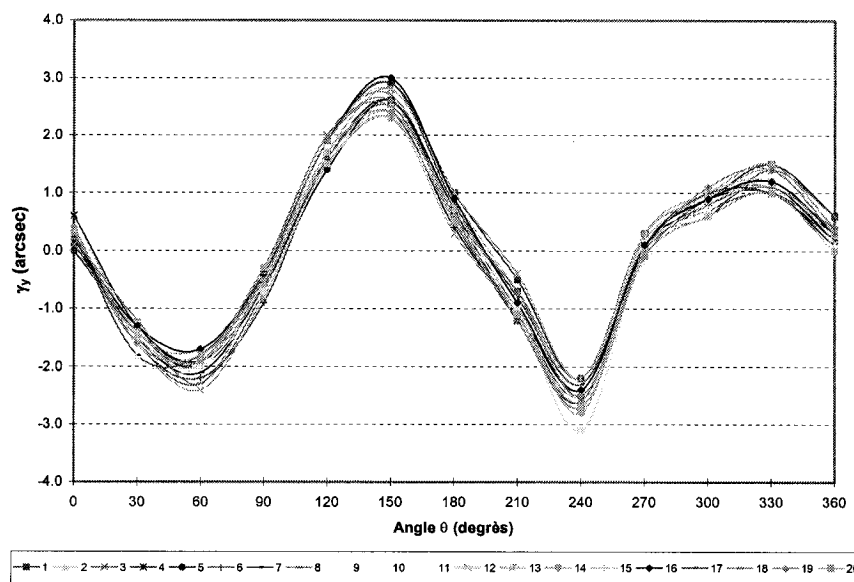
La MITSUI SEIKI HU-40 est équipée d'un contrôleur du modèle *Fanuc*. Ci-dessous, un programme en code G présenté comme un exemple. Ce programme peut être modifié afin de répondre aux exigences des autres essais selon le procédé expérimental.

```
#1=0 (START ANGLE);
#2=360 (END ANGLE);
#3=30 (ANGLE INCREMENT);
#4=360 (FEED);
%
044
#5=2 (DWELL);
#6=15 (NB STROKES);
#7= #1 - #9 (ACTUAL ANGLE);
#8=0 (ACTUAL STROKE);
#9=30 (OVERTRAVEL ANGLE);
G90 G0 B0;
M10;
M13;
G90 G54 G1 C#7 F#4;
M0;
G4 X#5;
WHILE [#8 LT #6] DO 1;
  WHILE [#7 LT #2] DO 2 (POSITIVE DIRECTION);
    #7 = #7 + #3;
```

```
C#7;  
G4 X#5;  
END 2;  
C[ #7 + #9];  
G4 #5;  
C#7;  
G4 X#5;  
WHILE [#7 GT #1] DO 3 (NEGATIVE DIRECTION);  
    #7 = #7 - #3;  
    C#7;  
    G4 X#5;  
END 3;  
C[ #7 - #9];  
G4 #5;  
C#7;  
G4 X#5;  
    #8 = #8 + 1;  
END 1;  
M2;  
%
```

ANNEXE F : DONNÉES DE MESURE PAR AUTOCOLLIMATEUR

Huron KX8-FIVE :

Figure F.1- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction positiveFigure F.2- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction positive

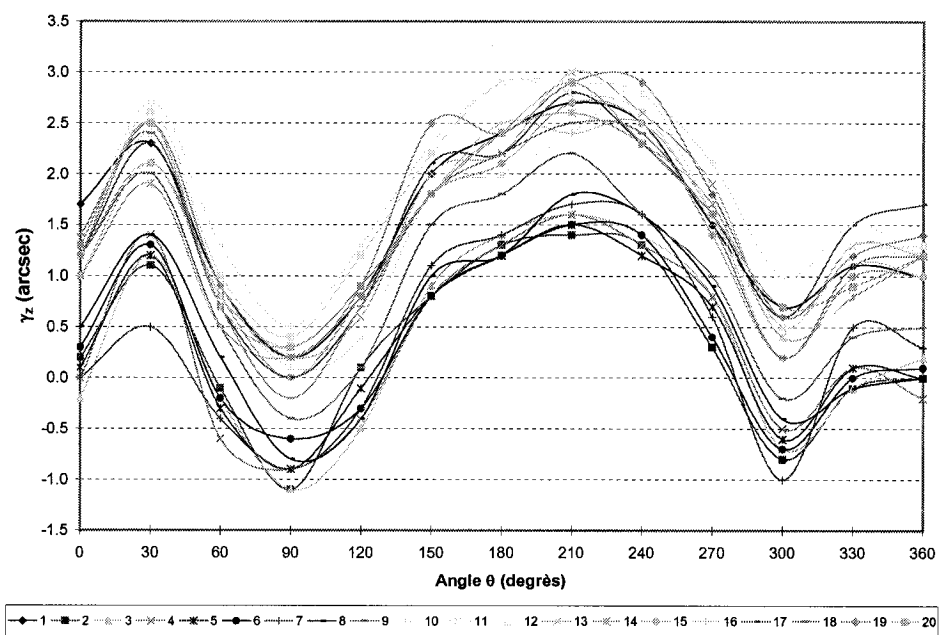


Figure F.3- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction négative

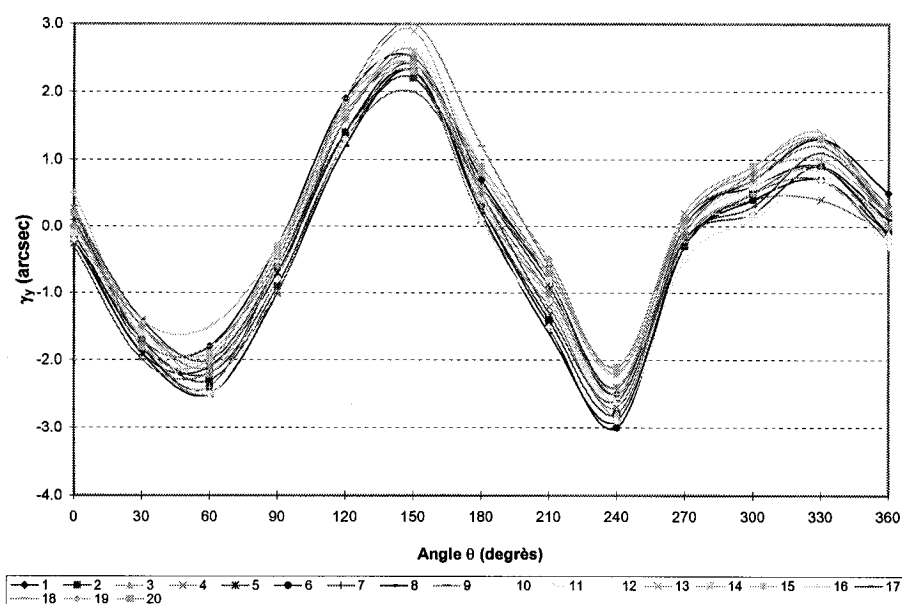


Figure F.4- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction négative

MITSUI SEIKI HU-40:

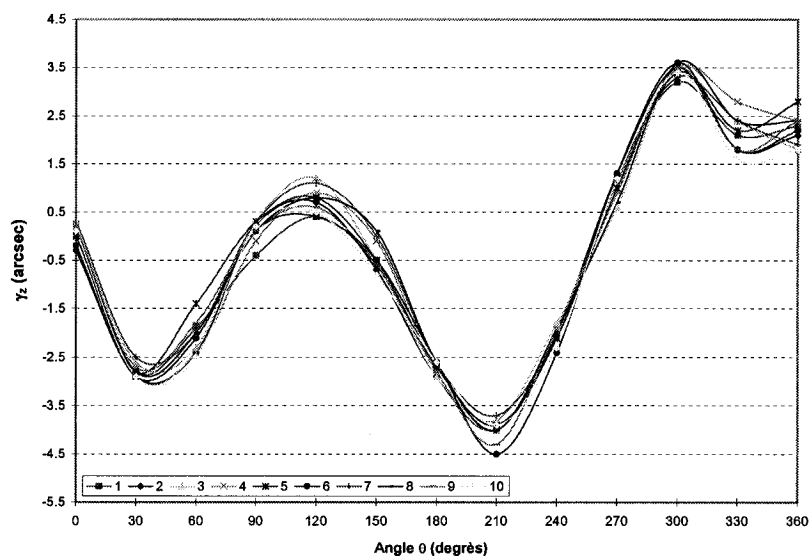


Figure F.5- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction positive

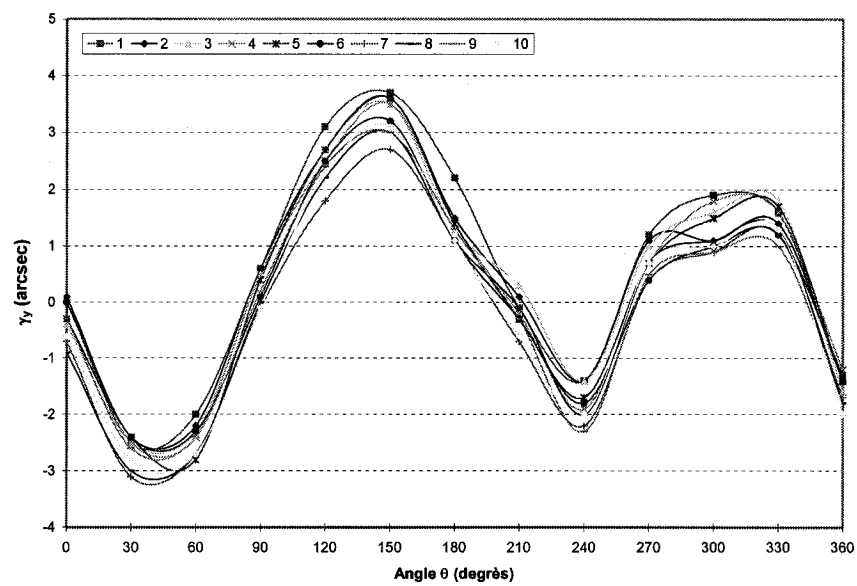


Figure F.6- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction positive

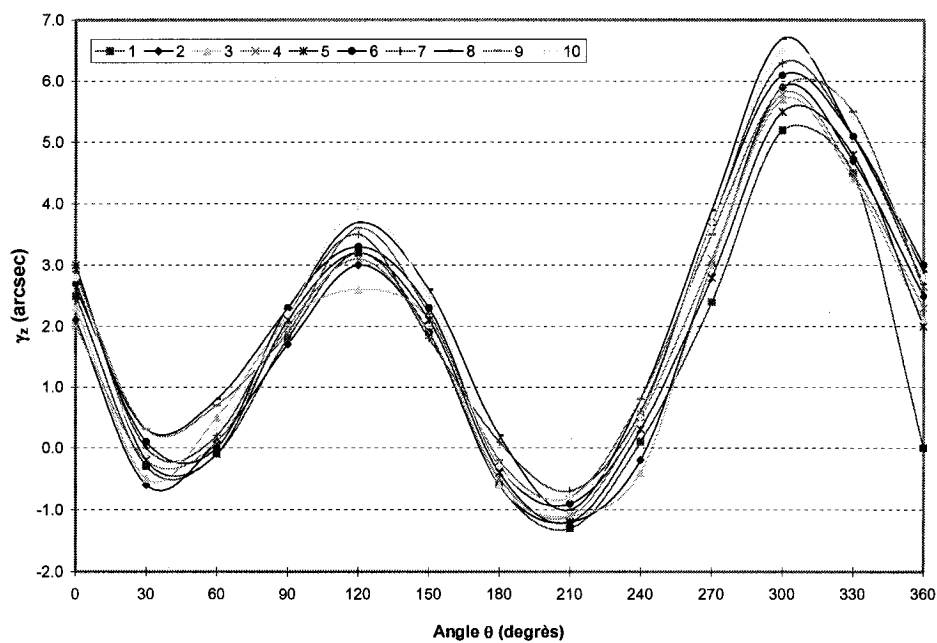


Figure F.7- Écart de positionnement angulaire γ_z pour la direction négative

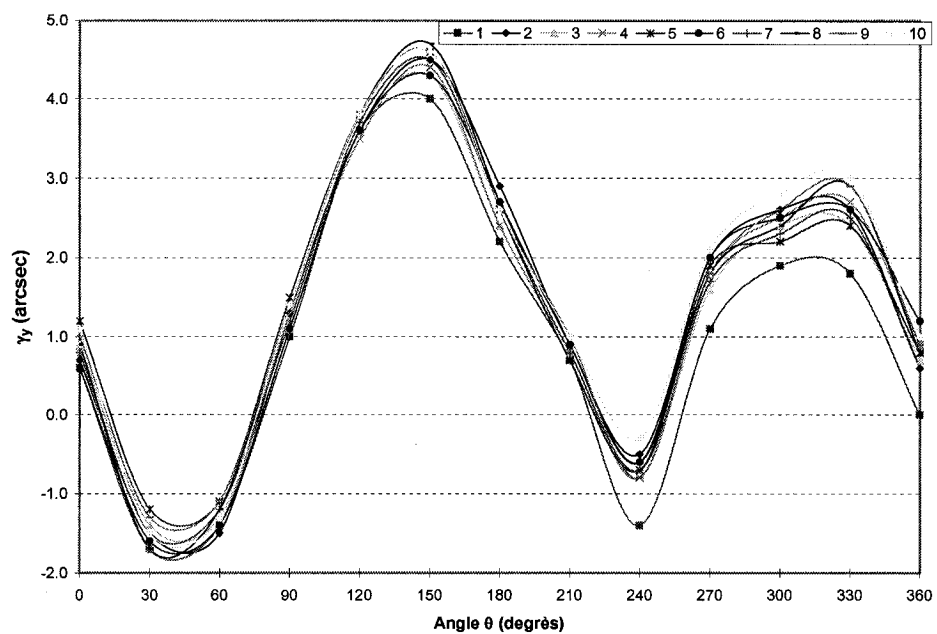
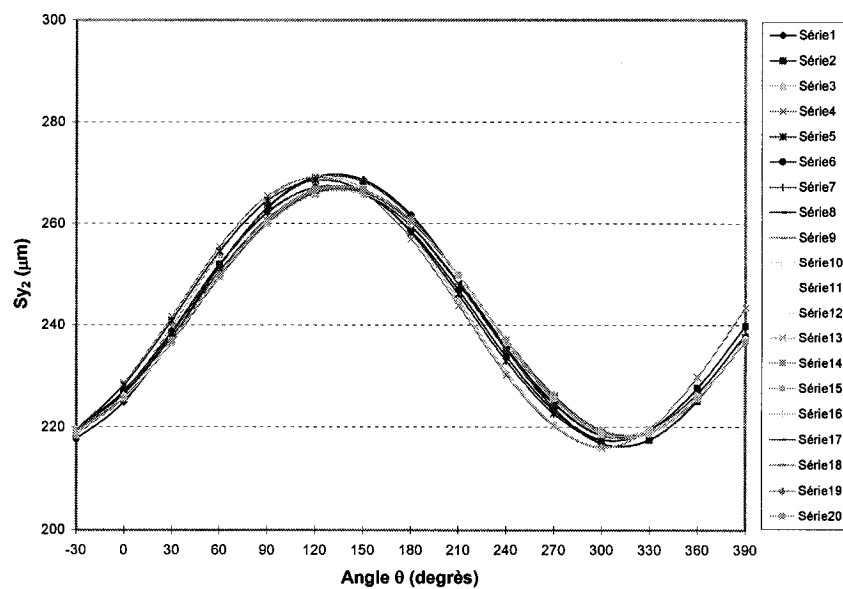
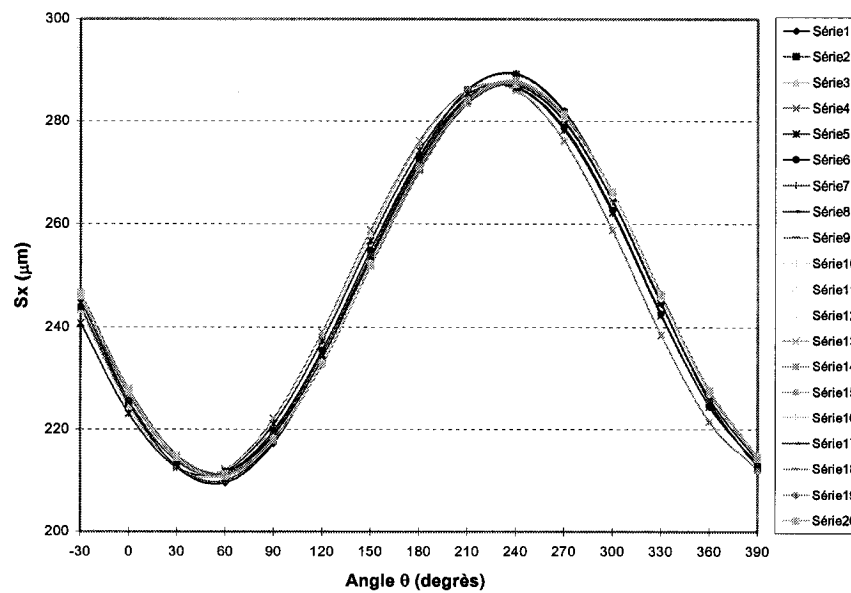


Figure F.8- Écart d'inclinaison angulaire γ_y pour la direction négative

ANNEXE G : DONNÉES DE MESURE PAR CAPTEURS CAPACITIFS

Huron KX8-FIVE :

Figure G.1- Valeurs mesurées S_{y2} sur la Huron KX8-FIVEFigure G.2- Valeurs mesurées S_x sur la Huron KX8-FIVE

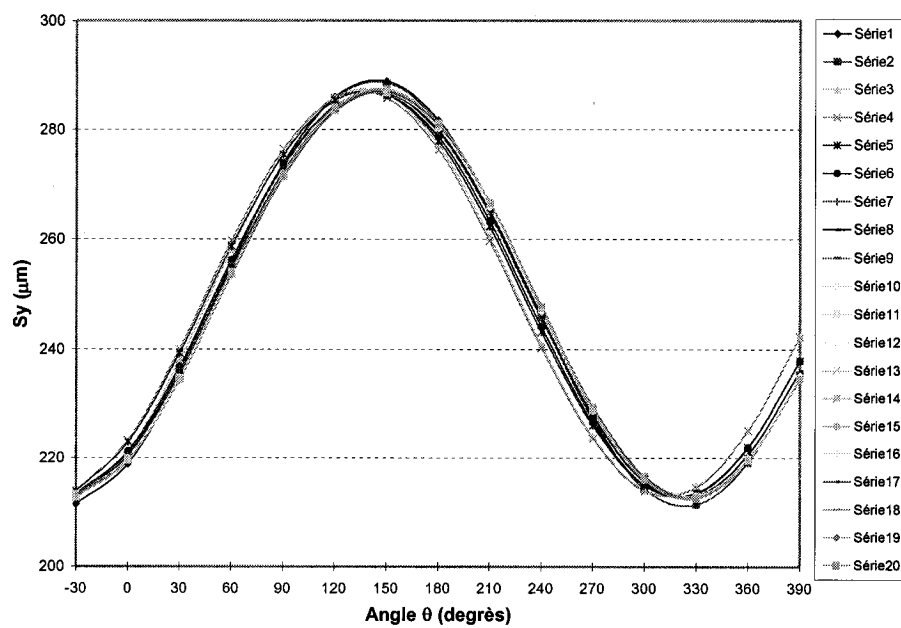


Figure G.3- Valeurs mesurées S_y sur la Huron KX8-FIVE

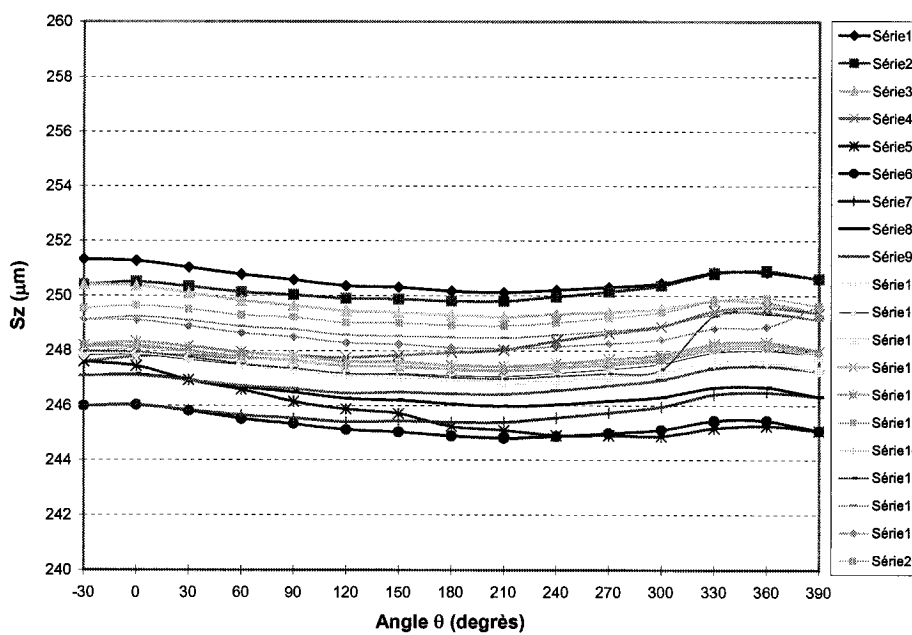


Figure G.4- Valeurs mesurées S_z sur la Huron KX8-FIVE

MITSUI SEIKI HU-40 :

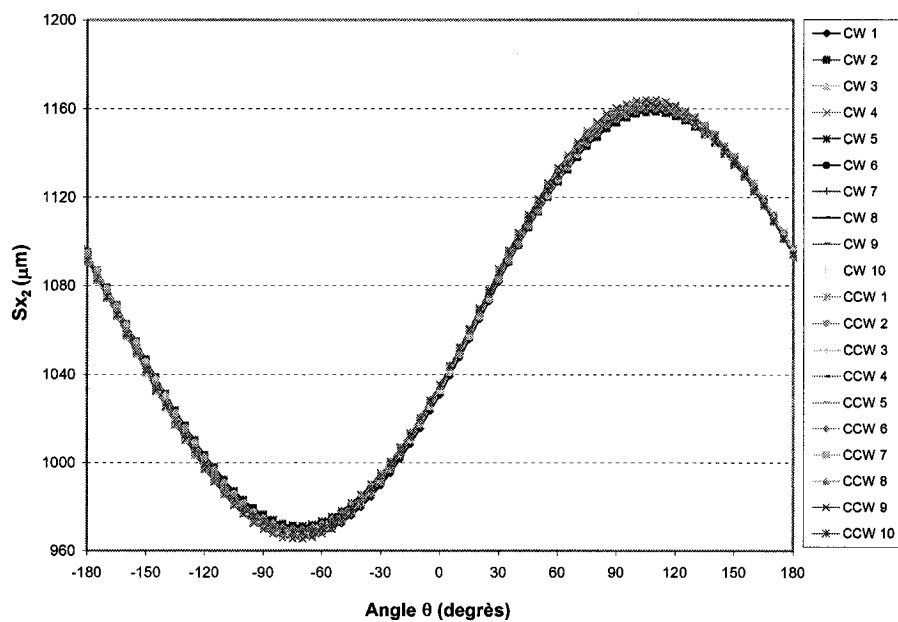


Figure G.5- Valeurs mesurées S_{y2} sur la Mitsui Seiki HU-40

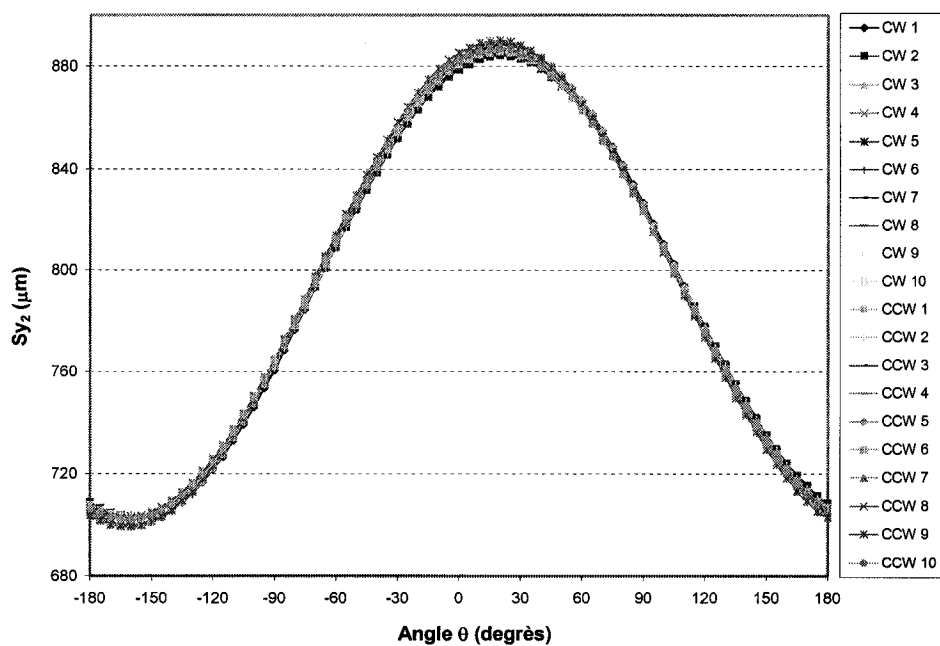


Figure G.6- Valeurs mesurées S_{y2} sur la Mitsui Seiki HU-40

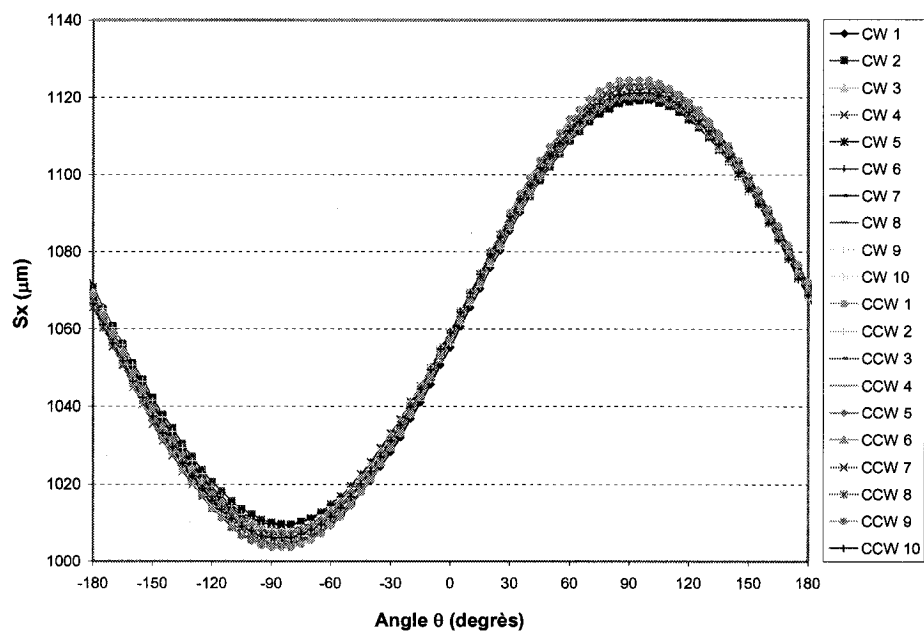


Figure G.7- Valeurs mesurées S_x sur la Mitsui Seiki HU-40

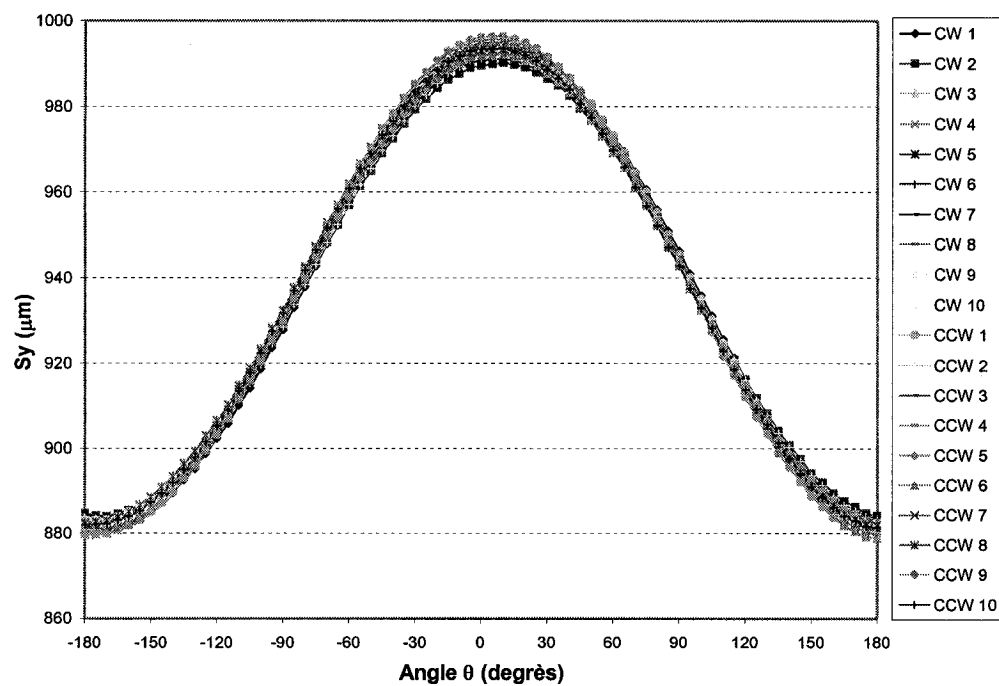


Figure G.8- Valeurs mesurées S_y sur la Mitsui Seiki HU-40

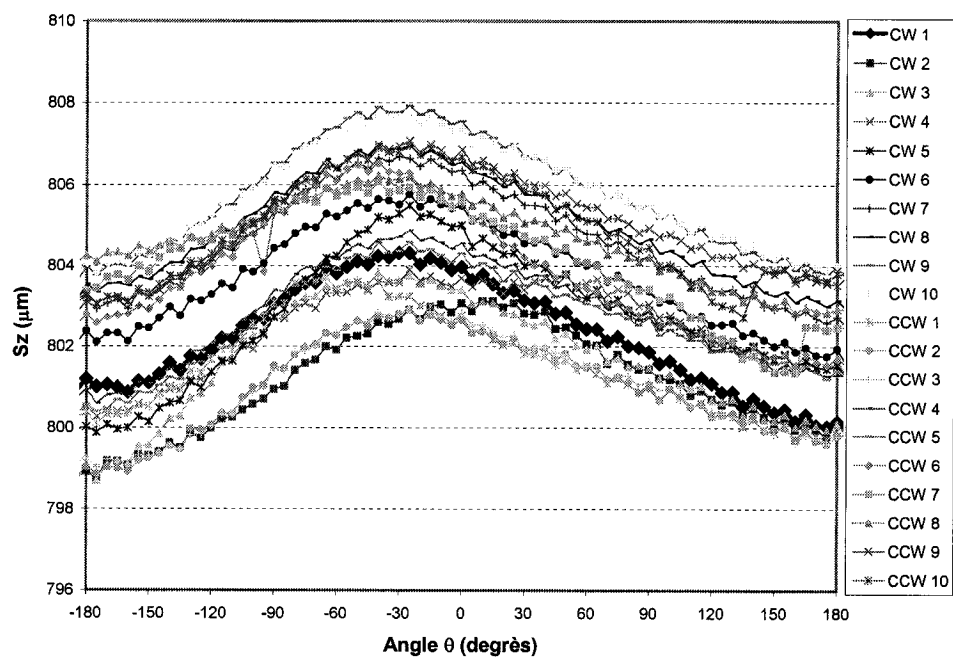


Figure G.9- Valeurs mesurées S_z sur la Mitsui Seiki HU-40

ANNEXE H : ÉCARTS OBTENUS PAR CAPTEURS CAPACITIFS

Résultats de l'essai bidirectionnel sur la Huron KX8-FIVE :

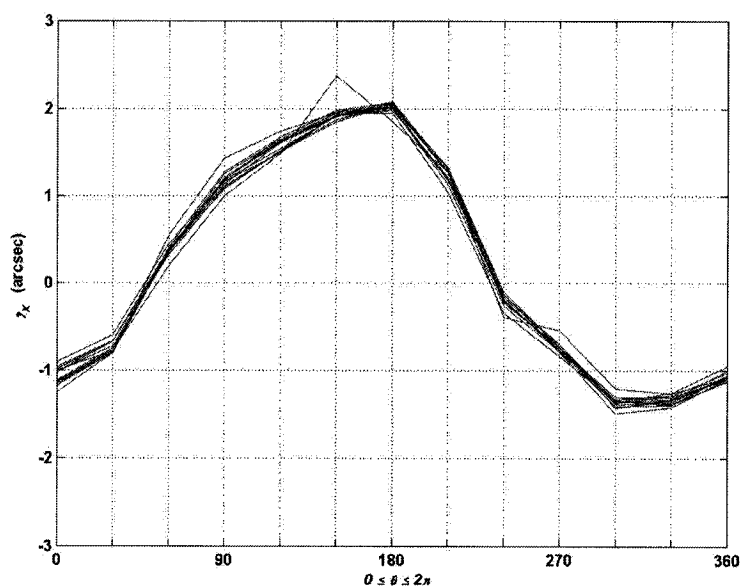


Figure H.1- Écart mesuré γ_x sur la Huron KX8-FIVE

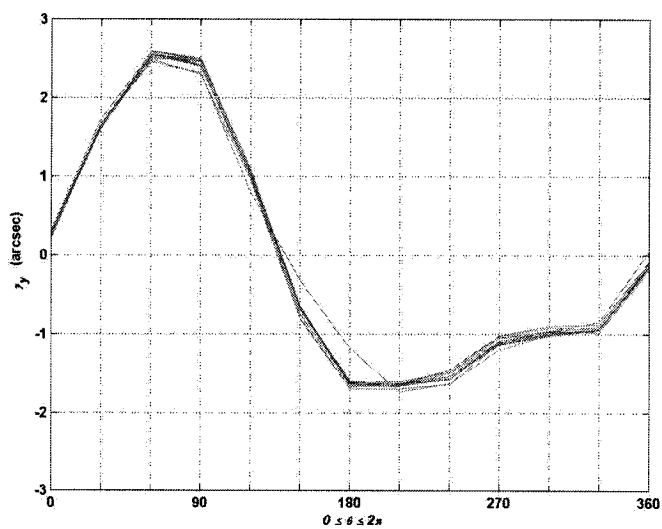


Figure H.2- Écart mesuré γ_y sur la Huron KX8-FIVE

Résultats de l'essai bidirectionnel sur la MITSUI SEIKI HU-40 :

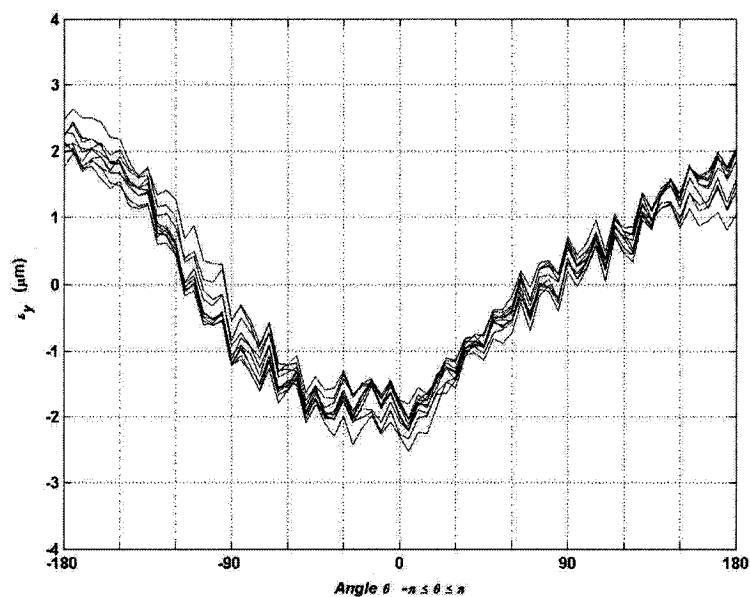


Figure H.3- Écart mesuré ε_y sur la Mitsui Seiki HU-40

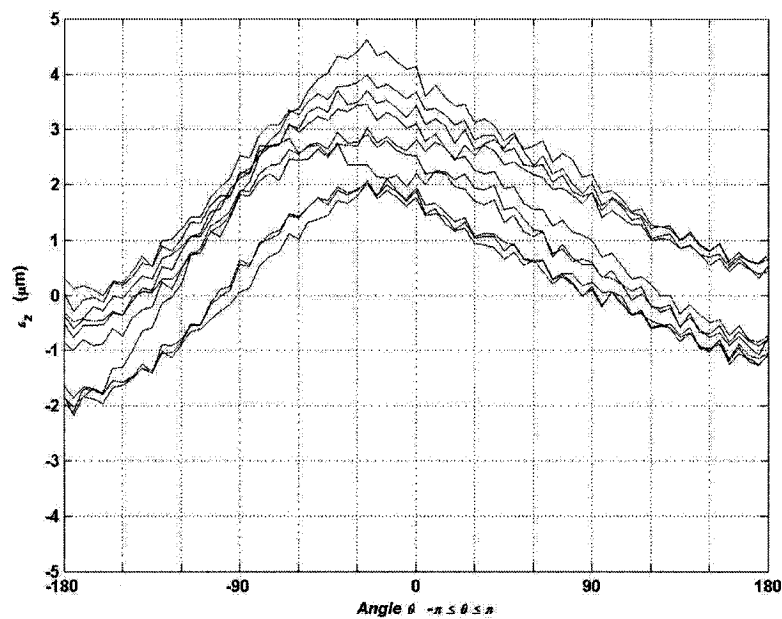


Figure H.4- Écart mesuré ε_z sur la Mitsui Seiki HU-40

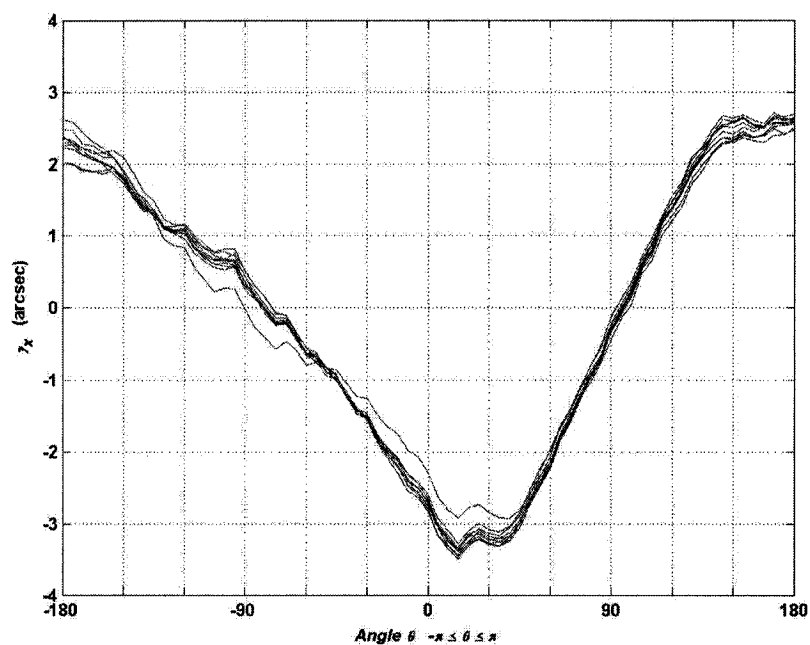


Figure H.5- Écart mesuré γ_x sur la Mitsui Seiki HU-40

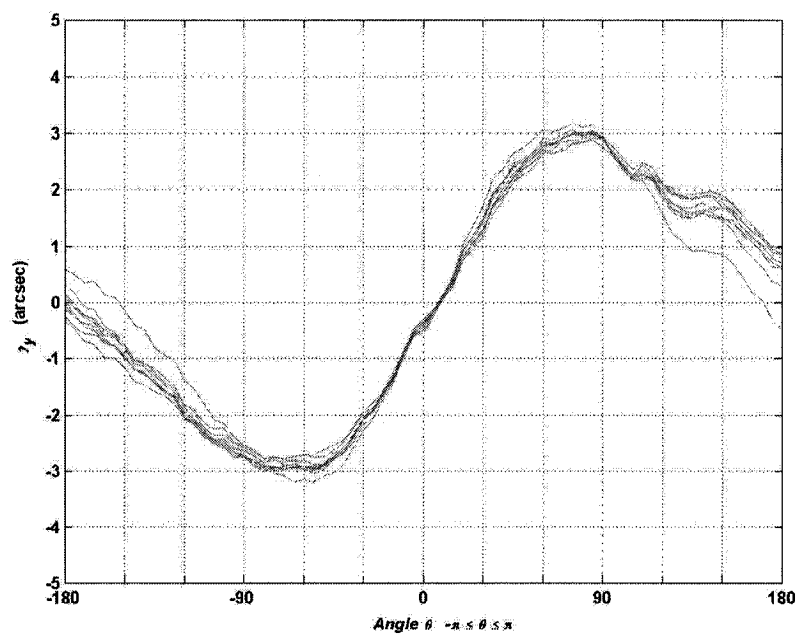


Figure H.6- Écart mesuré γ_y sur la Mitsui Seiki HU-40

Résultats des essais comparatifs sur la MITSUI SEIKI HU-40 :

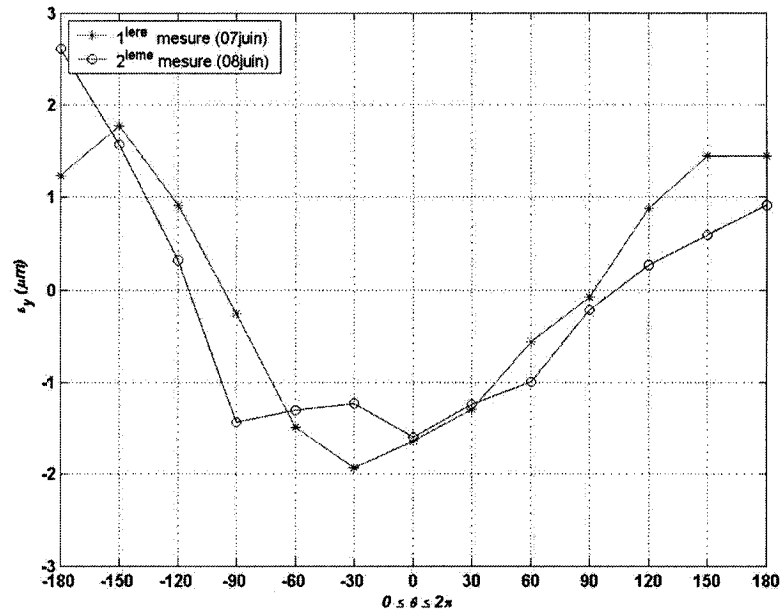


Figure H.7 - Écart linéaire ε_y obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40

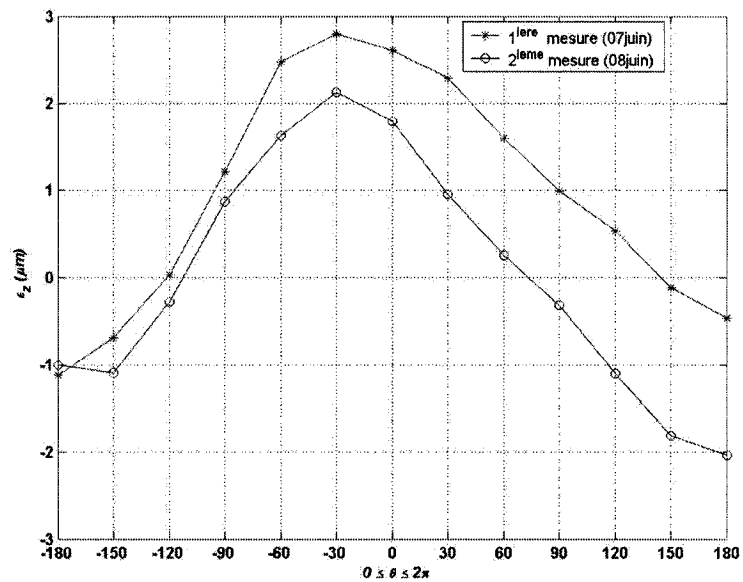


Figure H.8 - Écart linéaire ε_z obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40

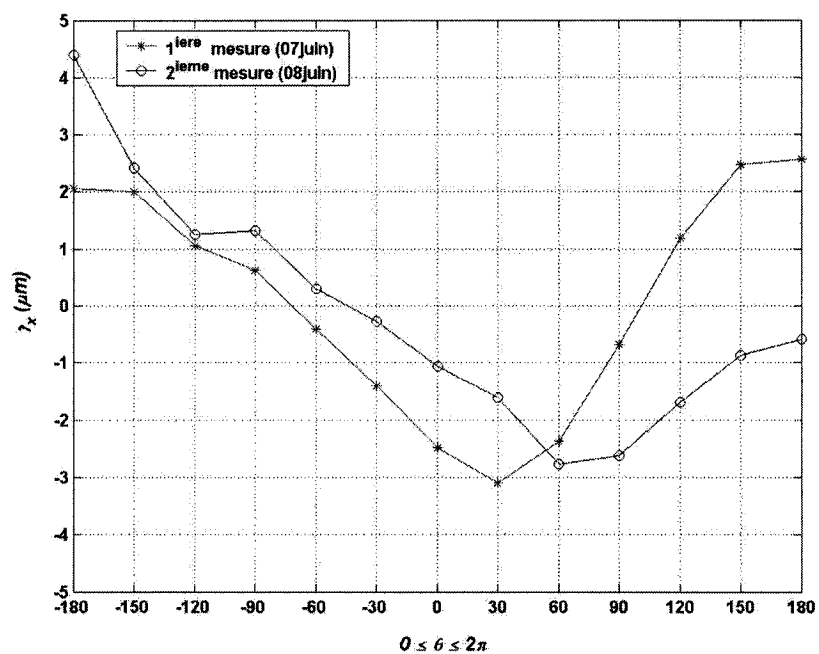


Figure H.9 - Écart linéaire γ_x obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40

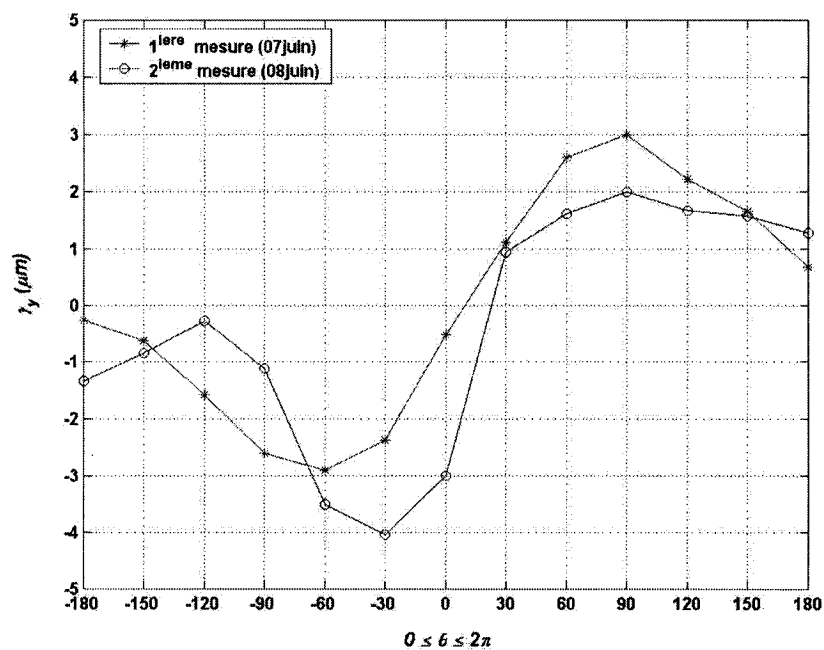


Figure H.10 - Écart linéaire γ_y obtenu sur l'axe C de Mitsui Seiki HU-40