

Titre: Analyse des dispersions quasi-statiques des machines-outils multi-axes
Title: axes

Auteur: Roxanne Andrian
Author:

Date: 2001

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Andrian, R. (2001). Analyse des dispersions quasi-statiques des machines-outils multi-axes [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7055/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7055/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Clément Fortin, & René Mayer
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

ProQuest Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600

UMI[®]

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DES DISPERSIONS QUASI-STATIQUES DES MACHINES-OUTILS
MULTI-AXES

ROXANNE ANDRIAN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR
(GÉNIE MÉCANIQUE)
AOÛT 2001



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

0-612-71305-9

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

ANALYSE DES DISPERSIONS QUASI-STATIQUES DES MACHINES-OUTILS
MULTI-AXES

présentée par: ANDRIAN Roxanne

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. CLOUTIER Guy, Doctorat, président

M. FORTIN Clément, Ph.D., membre et directeur de recherche

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

M. BARON Luc, Ph.D., membre

M. KRAVTCHENKO Igor, Doctorat, membre

REMERCIEMENTS

Ma gratitude va à mon directeur de recherche, monsieur Clément Fortin, pour son dévouement envers la formation de jeunes et moins jeunes chercheurs, pour son enthousiasme sans faille pour tout ce qui concerne la recherche universitaire. Il s'est montré toujours attentif au développement des qualités d'organisation de la pensée scientifique de ses étudiants et au perfectionnement de leurs aptitudes de communication. Je lui suis très reconnaissante, je lui dois tout mon parcours pendant mes années à l'École Polytechnique et toute ma carrière va être marquée par ces années d'université et par la formation scientifique apprise auprès de Monsieur Clément Fortin.

Mes remerciements vont aussi à mon codirecteur de recherche, monsieur René Mayer, qui m'a aidée à définir et, par la suite, à réaliser et à interpréter les recherches et les travaux expérimentaux effectués. Son talent pour le travail scientifique, et l'exploration de tous les aspects d'un sujet m'ont appris les exigences et les défis d'une démarche scientifique complète. Avec beaucoup de patience et de talent pédagogique, Monsieur René Mayer a suivi de très près l'écriture, la partie innovatrice et la finalisation de la thèse, en m'apprenant l'approche systématique qui est nécessaire pour compléter un tel ouvrage.

Je remercie aussi à Monsieur Guy Cloutier pour son support et son enthousiasme envers le développement de la partie de simulation et ce, dès le début de la thèse et jusqu'à la fin. Ces connaissances mathématiques m'ont aidée à plusieurs reprises à surmonter d'apparentes routes fermées, dans le processus de formalisation et d'interprétation des calculs.

Je remercie également tout le corps académique et administratif de l'École Polytechnique pour m'offrir cette extraordinaire ouverture dans ma carrière, pour leur professionnalisme et support, pour l'atmosphère unique de recherche et de développement intellectuel.

RÉSUMÉ

Le but poursuivi dans la présente recherche est le développement d'un modèle de diagnostic rapide et de suivi dans le temps de l'état géométrique d'une machine-outil, en utilisant des données acquises par le procédé de palpage électronique ("touch probing"). Le palpage peut être réalisé soit sur des parties fixes existantes dans la structure et situées à l'intérieur de l'espace de travail de la machine-outil, soit sur des artefacts spéciaux. Une séance initiale de tests constitue l'ensemble des résultats de référence par rapport auxquels le modèle analyse les résultats des séances ultérieures de tests.

En utilisant les résultats de référence et actuels de palpage ainsi que les données nominales connues du centre d'usinage, comme par exemple sa topologie, sa géométrie et les coordonnées articulaires, le modèle évalue et prédit le comportement géométrique de la machine à trois niveaux de diagnostic. Le premier niveau est centré sur les valeurs des erreurs résultantes aux points de touche et indique l'état des axes de mouvement. Suite à plusieurs séances de tests, ce niveau peut tracer un historique du comportement géométrique de chaque axe de mouvement et met en évidence les axes de mouvement qui se sont dégradés. Le deuxième niveau fait ressortir les paramètres géométriques d'écart ou les ensembles de paramètres géométriques d'écart qui sont la cause probable de la dégradation de l'état géométrique de la machine-outil. Finalement, le troisième niveau fait une estimation de l'effet de la variation de l'état géométrique de la machine en des points appartenant aux éléments géométriques d'une pièce qui doit être usinée ou mesurée par la machine.

La présente recherche est développée à partir de connaissances acquises dernièrement dans le domaine des dispersions d'usinage. La contribution originale concerne les trois niveaux du modèle.

Pour le premier niveau, l'originalité de la méthode de diagnostic et de suivi consiste dans le développement d'une stratégie de palpation et l'utilisation des éléments géométriques de mesure qui ont des orientations précises par rapport aux axes de mouvement. Le deuxième niveau est original en ce qui concerne l'évaluation des paramètres géométriques d'écart et le développement des matrices de sensibilité des axes de mouvement. La propagation des estimés de variations des paramètres géométriques d'écart sur la pièce, dans le troisième niveau du modèle, est originale en ce qui concerne la considération des tolérances de positionnement et l'interprétation de l'effet de la dégradation de l'état géométrique d'une machine-outil sur les éléments géométriques appartenant à la pièce.

L'efficacité de la méthode est validée par une double procédure, une de simulation numérique et une deuxième constituée d'expériences pratiques.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is the development of a model for the diagnostic and monitoring of the geometric status of a machine tool, by using data acquired by touch probing. The touch probing can be performed on built-in fixed parts of the machine tool structure located in its work envelope, or on special artifacts. An initial testing session constitutes the reference data set, with respect to which the model analyzes the results coming from subsequent test sessions.

Using as input the probing results and the already known machining center nominal data, as for example its topology, geometry and joint coordinates, the model evaluates and predicts the geometrical performance of the machine by developing three diagnostic levels. The first level is concerned with the resulting errors at the touch points, and indicates the moving axes status. Following several test sessions, this level presents graphically the historic status of each axis geometric performance and points out the degenerating axes. The second level points out which are the faulty geometric parameters, or parameter sets, which are the cause of the geometric status degeneration of the machine tool. Finally, the third level estimates the effect of the machine tool geometric degradation at points situated on the part features to be machined or measured by the machine.

The present research is developed considering the latest knowledge in the field of machining dispersions. The original contribution concerns all three levels of the model. For the first level, the originality of the diagnostic and follow-up procedure consists in the development of a touch probing strategy and in the use, for measuring purposes, of features having certain orientations with respect to the moving axes. The second level is original in all that covers the geometric parameter evaluation and the development of the moving axes sensitivity matrix. The propagation of the geometric parameters in order to estimate the variations on

the work piece, at the third level of the model, is original for the part concerning the positioning tolerances and the evaluation of the effect of the machine tool geometric status degeneration on the part features.

The presented methodology is validated both by a numerical simulation and by practical experiments.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES.....	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xx
LISTE DES ANNEXES.....	xxiv
 INTRODUCTION.....	 I
 CHAPITRE 1: LE CONCEPT GÉNÉRAL DE PROPAGATION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES D'ÉCART.....	 13
1.1 Schéma et interprétation cinématique des machines-outils.....	13
1.1.1 Configuration de la machine-outil.....	13
1.1.2 Paramètres géométriques d'écart de la machine-outil.....	16
1.1.2.1 Paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire PGÉV.....	16
1.1.2.2 Paramètres géométriques invariables en fonction de la coordonnée articulaire.....	18
1.2 Hypothèses fondamentales et spécifiques.....	20
1.3 Matrices homogènes associées aux paramètres géométriques d'écart.....	24
1.3.1 Forme générale de la matrice de transformation.....	24
1.3.2 Matrices homogènes attachées aux paramètres géométriques d'écart variables $F(d)$	25
1.3.3 Matrices de transformation entre deux axes consécutifs $D(d)$	26

1.3.4 Matrices homogènes attachées aux paramètres géométriques invariables nominaux $D_{1,d}$	27
1.3.5 Matrices homogènes attachées aux paramètres géométriques d'écart invariables $D_{2,d}$	27
1.3.6 Matrice des grands déplacements $D_3(d)$	28
1.3.7 Équation de fermeture de la chaîne cinématique.....	30
1.3.8 Matrice jacobienne.....	34

CHAPITRE 2: LE MODÈLE DE DIAGNOSTIC ET DE SUIVI DE L'ÉTAT GÉOMÉTRIQUE DES MACHINES-OUTILS.....	37
2.1 Introduction.....	37
2.2 Diagnostic et suivi de l'état géométrique au niveau des axes de déplacement d'une machine-outil: niveau 1.....	40
2.2.1 Stratégie de palpation.....	40
2.2.1.1 Objectifs du modèle théorique quant à la conception de la stratégie de palpation.....	40
2.2.1.2 Contraintes du modèle théorique quant à la conception de la stratégie de palpation.....	41
2.2.1.3 Contraintes spécifiques.....	41
2.2.1.4 Contenu de la stratégie de palpation.....	42
2.2.2 Artefact de palpation.....	45
2.2.3 Données de palpation ω	49
2.2.4 Processeur des données de palpation.....	49
2.2.4.1 Erreur résultante d'échelle de l'axe de mouvement linéaire et erreur résultante axiale de l'axe de mouvement de rotation.....	50
2.2.4.2 Erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement linéaire et erreur radiale de l'axe de rotation.....	52

2.2.5 Erreur de perpendicularité.....	53
2.2.5.1 Test de l'ellipse.....	53
2.2.5.2 Procédure de calcul.....	53
2.2.6 Validation numérique de la procédure utilisée pour le niveau 1 du modèle.....	56
2.2.6.1 Vérification du fonctionnement du processeur de niveau 1.....	56
2.2.6.2 Vérification du fonctionnement quand l'artefact est monté avec une erreur d'alignement.....	58
2.3 Diagnostic et suivi de l'état géométrique au niveau des paramètres géométriques d'écart d'une machine-outil: niveau2.....	61
2.3.1 Matrice de sensibilité, S.....	61
2.3.2 Analyse des PGÉV en fonction de résultats des tests.....	66
2.4 Erreurs résultantes aux éléments géométriques de la pièce à usiner et la faisabilité de la pièce: niveau 3.....	73
2.4.1 Procédure de calcul.....	73
2.4.1.1 Génération des points-images.....	74
2.4.1.2 Interpolation des valeurs $\Delta\omega$ dans les points-image.....	75
2.4.1.3 Matrice de sensibilité S_i	75
2.4.1.4 Solution du système d'équations $\Delta\omega_{\text{intp},i} = S_i * \Delta q_i$	76
2.4.1.5 Estimation des erreurs résultantes aux points de la pièce.....	78
2.4.1.6 Faisabilité des éléments géométriques et de la pièce en général.....	80
2.5 Le simulateur du modèle. Validation numérique des niveaux 2 et 3.....	82
2.5.1 Fonctionnement du simulateur.....	82
2.5.2 Donnée d'entrée: machine-outil simulée.....	83
2.5.3 Donnée d'entrée : l'ensemble des éléments géométriques.....	84
2.5.4 Action du simulateur: comparer les résultats réels avec ceux prédits.....	84
2.5.5 Donnée de sortie: résultats de la simulation.....	85

2.6 Présentation de l'interface du modèle.....	89
CHAPITRE 3: VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE.....	92
3.1 Validation expérimentale du niveau 1 du modèle.....	92
3.1.1 Étalonnage des axes X et Y de la machine-outil.....	93
3.1.1.1 Introduction.....	93
3.1.1.2 Procédure expérimentale.....	96
3.1.1.3 Procédure de calcul des paramètres géométriques d'écart.....	98
3.1.1.4 Paramètres géométriques obtenus et graphiques.....	100
3.1.2 Mesures obtenues en utilisant l'artefact à marches. Processeur du niveau 1.....	104
3.1.2.1 Artefact utilisé.....	104
3.1.2.2 Stratégie de palpation.....	105
3.1.2.3 Résultats et conclusions de la stratégie de palpation.....	106
3.1.3 Calcul des erreurs résultantes en utilisant les valeurs des paramètres géométriques d'écart identifiés suite à l'étalonnage.....	109
3.1.4 Étalonnage de l'axe de mouvement C de la machine-outil.....	112
3.1.4.1 Introduction.....	112
3.1.4.2 Procédure expérimentale.....	113
3.1.4.3 Procédure de calcul des paramètres géométriques d'écart.....	114
3.1.4.4 Paramètres géométriques obtenus et graphiques.....	115
3.1.5 Mesures obtenues en utilisant l'artefact circulaire. Processeur du niveau 1.....	117
3.1.5.1 Artefact utilisé.....	117
3.1.5.2 Stratégie de palpation.....	118
3.1.5.3 Résultats et conclusions.....	120
3.1.6. Calcul des erreurs résultantes des axes en utilisant les valeurs	

des PGÉV obtenus suite à l'étalonnage; comparaison avec les erreurs mesurées.....	125
3.1.7. Identification des erreurs de perpendicularité entre deux axes de mouvement linéaires en utilisant le test de l'ellipse.....	130
3.1.7.1 Principe de la méthode.....	130
3.1.7.2 Étalonnage du palpeur sur la machine-outil. Erreur d'étalonnage du palpeur.....	130
3.1.7.3 Étalonnage du palpeur de la machine à mesurer tridimensionnelle...	132
3.1.7.4 Non-circularité de l'artefact.....	133
3.1.7.5 Analyse de l'ellipse. Résultats.....	135
3.2 Validation expérimentale du niveau 2 du modèle.....	135
3.2.1 Résultats du processeur du niveau 2.....	135
3.3 Validation expérimentale du niveau 3 du modèle.....	144
3.3.1 Résultats du processeur du niveau 3.....	144
3.3.2 Calcul des erreurs résultantes à des points appartenant à la pièce.....	147
3.3.3 Résultats des mesures de palpage effectuées directement sur la pièce et comparaison avec les deux autres méthodes d'identification des erreurs résultantes sur ses éléments géométriques....	148
CONCLUSION.....	153
RÉFÉRENCES	156
ANNEXES.....	165

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0.1 Dispositifs utilisés pour mesurer les erreurs géométriques des machines-outils.....	9
Tableau 2.1 Test de palpé pour l'axe de mouvement X dans la direction Z, Omnimill 60.....	44
Tableau 2.2 Exemple des valeurs retournées par le palpeur, Omnimill 60.....	49
Tableau 2.3 Matrice de sensibilité utilisée pour le centre d'usinage Omnimill 60, présentée sous la forme d'un tableau et avec les termes regroupés par type de paramètre sur les colonnes.....	64
Tableau 2.4 Matrice de sensibilité utilisée pour le centre d'usinage Mitsui Seiki, présentée sous la forme d'un tableau et avec les termes regroupés par type de paramètre sur les colonnes.....	65
Tableau 2.5 Représentation de la matrice logique de la matrice de sensibilité A en forme de tableau (centre d'usinage Omnimill 60).....	70
Tableau 2.6 Tableau représentant le résultat du niveau 2 (Omnimill 60).....	71
Tableau 2.7 Allure générale de la réponse fournie par le simulateur.....	86
Tableau 3.1 Sensibilité de chaque test aux paramètres géométriques (d=axe teste, φ =direction de palpé).....	137
Tableau 3.2 Représentation de la matrice A en forme de tableau logique (Matsuura).....	138
Tableau 3.3 Résultat du processeur de niveau 2, Matsuura.....	139

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Centre d'usinage à cinq axes Matsuura.....	15
Figure 1.2	Schéma cinématique de la machine Matsuura.....	15
Figure 1.3	Les 6 erreurs géométriques d'écart variables en fonction de la position articulaire, pour l'axe de mouvement X.....	16
Figure 1.4	Les six paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire de l'axe C	18
Figure 1.5	Représentation des paramètres géométriques linéaires invariables en fonction de la coordonnée articulaire.....	19
Figure 1.6	Représentation des paramètres géométriques angulaires d'écart invariables de l'axe de mouvement X.....	20
Figure 1.7	Représentation de la machine-outil Matsuura.....	25
Figure 1.8	Grand déplacement de x selon l'axe de mouvement X.....	28
Figure 1.9	Grand déplacement de c selon l'axe de mouvement C.....	29
Figure 1.10	Schéma cinématique générale d'une machine-outil.....	31
Figure 2.1	Diagramme du modèle de diagnostic et de suivi de l'état géométrique d'une machine-outil.....	38
Figure 2.2	Artefact linéaire à marches montée parallèlement à l'axe cartésien X.....	43
Figure 2.3	Exemple de stratégie de palpé pour l'axe de mouvement B.....	43
Figure 2.4	La palette utilisée pour les mesures sur la machine Omnimill 60.....	47
Figure 2.5	Schéma de l'artefact réalisé pour les mesures sur la machine Mitsui Seiki...48	
Figure 2.6	Exemple de calcul et graphique de la variable ω_{var}	50
Figure 2.7	Mauvais alignement de l'artefact de mesure selon la normale à la surface d'appui.....	51
Figure 2.8	Représentation des étapes de calcul du processeur du niveau 1.....	52
Figure 2.9	Représentation de l'ellipse obtenue quand les axes de mouvement X et Y	

ne sont plus perpendiculaires.....	54
Figure 2.10 Validation numérique du niveau 1 du processeur, montrée pour le test 3.....	57
Figure 2.11 Validation numérique du niveau 1 du processeur, montrée pour le test 2.	
Étude quand l'artefact est monté avec une erreur d'alignement.....	60
Figure 2.12 Exemple de résultats obtenus en utilisant le prototype 'Performance Monitoring' appliqué au centre d'usinage Omnimill60(Données simulées)..	69
Figure 2.13 Imprimé de l'écran pendant le fonctionnement du prototype 'Performance Monitoring'	72
Figure 2.14 Schéma montrant les deux options pratiques pour obtenir les valeurs q_{act}	79
Figure 2.15 Algorithme de fonctionnement du simulateur.....	83
Figure 2.16 Estimation du taux de succès du modèle pour le cas 1 de résolution, en fonction de la largeur du domaine de variation des PGÉV (en %).....	87
Figure 2.17 Estimation du taux de succès du modèle pour le cas 2 de résolution, en fonction de la largeur du domaine de variation des PGÉV (en %).....	89
Figure 2.18 Représentation de la structure du prototype informatique 'Performance Monitoring' (tiré du Guide de l'utilisateur).....	91
Figure 3.1 Représentation de l'organigramme de validation expérimentale du niveau 1 du modèle.....	92
Figure 3.2 Représentation schématique des axes linéaires de la machine Matsuura.....	93
Figure 3.3 Représentation de l'erreur de perpendicularité de la machine Matsuura, comme ayant effet d'une erreur de rectitude.....	95
Figure 3.4 Représentation de la plaque à trous (en mm).....	96
Figure 3.5 Vue du dessus d'un trou et représentation des points de touche, de 1 à 6, à l'intérieur du trou.....	98
Figure 3.6 Graphe du PGÉV d'échelle de l'axe de mouvement X, $e_x(x_m)$	101
Figure 3.7 Graphe du PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y $e_y(x_m)$	102

Figure 3.8 Graphe du PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement Y dans la direction X, $e_x(y_m)$	103
Figure 3.9 Graphe du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement Y, $e_y(y_m)$	103
Figure 3.10 Graphe du lacet de l'axe de mouvement Y, $\gamma_z(y_m)$	104
Figure 3.11 Schéma de l'artefact linéaire à marches.....	105
Figure 3.12 Représentation de l'erreur résultante de l'axe de mouvement X dans la direction X, avant et après le traitement de données par le processeur du niveau 1.....	107
Figure 3.13 Représentation de l'erreur résultante de l'axe de mouvement Y dans la direction X.....	108
Figure 3.14 Représentation de l'erreur résultante d'échelle de l'axe de mouvement X..	110
Figure 3.15 Représentation de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement Y dans la direction X.....	111
Figure 3.16 Représentation schématique de la machine Matsuura dans la variante à 2 axes de mouvement linéaires et un axe de mouvement de rotation.....	112
Figure 3.17 Schéma de la procédure de palpée sur une rangée centrale de la plaque à trous, pour effectuer l'étalonnage de l'axe de mouvement C de la palette...	114
Figure 3.18 Graphe du PGÉV radial de l'axe de mouvement C dans la direction X, $e_x(c)$	116
Figure 3.19 Graphe du PGÉV radial de l'axe de mouvement C dans la direction Y, $e_y(c)$	116
Figure 3.20 Graphe du PGÉV angulaire d'échelle de l'axe de mouvement C, $\gamma_z(c)$	117
Figure 3.21 Schéma de l'artefact circulaire.....	118
Figure 3.22 Schéma de mesure de l'erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction X.....	119
Figure 3.23 Schéma de mesure de l'erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction Y.....	119

Figure 3.24 Schéma de mesure de l'erreur résultante axiale de l'axe de mouvement C dans la direction Z.....	120
Figure 3.25 Schéma de déviation du point de palpation P quand l'artefact est tourné de l'angle m	121
Figure 3.26 Variation de l'erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction X.....	122
Figure 3.27 Variation de l'erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction Y.....	123
Figure 3.28 Variation de l'erreur résultante axiale de l'axe de mouvement C dans la direction Z.....	124
Figure 3.29 Situations possibles de mauvais alignement angulaire.....	124
Figure 3.30 Comparaison des variations des erreurs résultantes mesurées avec celles calculées, pour l'axe de mouvement C dans la direction X.....	126
Figure 3.31 Comparaison des variations des erreurs résultantes mesurées avec celles calculées, pour l'axe de mouvement C dans la direction Y.....	127
Figure 3.32 Erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction X suite au traitement d'annulation de l'erreur d'alignement de l'artefact.....	128
Figure 3.33 Erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction Y suite au traitement d'annulation de l'erreur d'alignement de l'artefact.....	129
Figure 3.34 Étalonnage du palpeur de la machine-outil. L'échelle radiale est en mm....	132
Figure 3.35 Étalonnage du palpeur de la MMT. L'échelle radiale est en mm.....	133
Figure 3.36 Non-circularité de l'artefact mesuré sur la machine-outil (en mm).....	134
Figure 3.37 Erreurs résultantes obtenues à deux séances de diagnostic différentes.....	136
Figure 3.38 Représentation du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement X obtenu par étalonnage direct.....	140
Figure 3.39 Représentation du PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y obtenu par étalonnage direct.....	141

Figure 3.40 Graphe du PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y.....	142
Figure 3.41 Graphe du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement Y.....	142
Figure 3.42 Graphe du lacet de l'axe de mouvement Y obtenu par étalonnage direct....	143
Figure 3.43 Représentation de la pièce spéciale utilisée pour la validation du niveau 3.....	146
Figure 3.44 Schéma des points choisis sur la pièce pour valider le niveau 3.....	147
Figure 3.45 Comparaison des erreurs géométriques résultantes obtenues par les trois techniques, dans le cas des surfaces de type trou et dans la direction X.....	149
Figure 3.46 Comparaison des erreurs géométriques résultantes obtenues par les trois techniques, dans le cas des surfaces de type trou et dans la direction Y.....	149
Figure 3.47 Comparaison des erreurs géométriques résultantes obtenues par les trois techniques, dans le cas des surfaces de type marche et dans la direction X.....	150
Figure 3.48 Représentation du taux de succès du modèle en fonction de la tolérance imposée.....	152

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

- A, B, C — axe de mouvement de rotation d'une machine-outil qui tourne autour d'une des trois directions i, j , et k .
- a, b, c — variable ou coordonnée articulaire selon l'axe de mouvement A, B ou C .
- $C_0, C_1, \dots, C_n$ -- coefficients du polynôme qui simule le paramètre géométrique.
- $C_{k-1,k}^w$ — matrice de transport et qui représente l'effet donné par le torseur E_k associé à l'articulation k sur la pièce dans le repère de l'élément géométrique de la pièce.
- d — l'axe en mouvement et une des composante de la matrice-colonne λ_{acc} .
- d_1 à d_n — repères des articulations de la branche cinématique de droite c'est-à-dire celle qui lie le repère de la fondation à l'outil.
- Dt_{max} — variable de la stratégie de palpéage qui représente l'intervalle dans lequel le palpeur va chercher la cible.
- Dt_{appr} — variable de la stratégie qui est la distance sécuritaire sur laquelle le palpeur se déplace à basse vitesse jusqu'au point nominal de contact
- $D(d)$ — matrice homogène de transformation associée à l'axe en mouvement de la machine-outil et qui exprime les paramètres géométriques invariables en fonction de la coordonnée articulaire et les grands mouvements de l'axe.
- D_{wt} — matrice homogène de transformation qui ferme la chaîne cinématique et qui exprime les erreurs de positionnement de l'outil sur l'élément géométrique de la pièce.
- $e_x(d), e_y(d), e_z(d), \gamma_x(d), \gamma_y(d), \gamma_z(d)$ — les six paramètres géométriques variables en fonction de la coordonnée articulaire.
- f — matrice colonne à trois éléments des erreurs de positionnement de l'outil dans le repère de l'élément géométrique.
- $F(d)$ — matrice homogène de transformation associée à l'articulation de la machine-outil et qui exprime les paramètres géométriques variables en fonction de la

coordonnée articulaire.

g_1 à g_m — repères des articulations de la branche cinématique de gauche c'est-à-dire celle qui lie le repère de la fondation à la pièce.

i , j , et k , — vecteurs attachés au repère de l'articulation et qui sont orientés dans la direction des axes linéaires de mouvement de la machine-outil.

k -- facteur d'endommagement.

J — matrice jacobienne de positionnement des articulations d'une chaîne cinématique.

L — matrice complémentaire orthogonale de la matrice de sensibilité **S**.

MMT — machines à mesurer tridimensionnelle

MO — machine-outil

O1, O2... — repère de l'articulation de la machine-outil.

PGÉV — paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire selon l'axe en mouvement.

PGÉI — paramètres géométriques d'écart invariables en fonction de la coordonnée articulaire de l'axe en mouvement.

Pt — notation pour indiquer un point dans l'espace.

p — matrice de position pour le cas général et qui entre dans la composition de la matrice de transformation.

$\mathbf{p}_{k-1,k}^w$ — matrice de dimension 3×1 qui représente la position entre les articulations $k-1$ et k par rapport au repère w .

q — le torseur de la totalité des paramètres géométriques variables en fonction de la coordonnée articulaire d'une machine-outil.

rd — nombre aléatoire réel généré dans l'intervalle $[0 \ 1]$.

R — matrice de rotation pour le cas général et qui entre dans la composition de la matrice de transformation.

R_f — repère du bâti de la machine-outil.

$R_{k-1,k}$ — la matrice de rotation 3×3 entre les articulations $k-1$ et k de la machine-outil.

- S** — matrice de sensibilité.
- t** — repère de l'outil de la machine-outil.
- T** — tolérance de position imposée aux éléments géométriques ponctuels.
- u** — vecteur dans l'espace nul de **S** crée dans le point Pt.
- w** — repère de l'élément géométrique sur la pièce à usiner.
- X, Y, Z** — axe linéaire de mouvement d'une machine-outil parallèle à une des trois directions Cartésiennes.
- x, y, z** — variable ou coordonnée articulaire selon l'axe de mouvement X, Y ou Z.
- $\gamma_{x,s}, \gamma_{y,s}, \gamma_{z,s}$ — les erreurs angulaires de l'axe de mouvement **s** autour des directions i_s, j_s et k_s qui sont des paramètres géométriques invariables en fonction de la coordonnée articulaire.
- Δf** — variation des erreurs de positionnement de l'outil dans le repère de l'élément géométrique.
- Δq** — variation des paramètres géométriques variables en fonction de la position articulaire.
- $\Delta \omega$** — les données de palpation filtrées par le niveau 1 du modèle de diagnostic.
- ε_k — le torseur des paramètres géométriques de l'articulation **k**, ayant les trois premiers termes égaux aux paramètres géométriques linéaires et les trois derniers égaux aux paramètres géométriques angulaires.
- ϵ_{lim} — valeur maximale de variation du paramètre géométrique.
- θ** — variable de la stratégie de palpation qui contient les coordonnées et l'orientation des points de touche par rapport au repère Cartésien de la machine.
- λ_{axe}** — variable de la stratégie de palpation qui est la matrice-colonne des directions des axes de mouvement de la machine testés par palpation.
- λ_{touche}** — variable de la stratégie de palpation qui est la matrice-colonne des directions de touche du palpeur.
- μ, ν, ξ** — coefficients des fonctions utilisées pour l'étalonnage à plaque à trous.

ϕ — une des composantes de la matrice-colonne des directions d'approche du palpeur

λ_{touche}

ω — les valeurs de palpation.

ω_{act} — les données actuelles de palpation.

ω_{ref} — les données de palpation de référence.

ω_{mmt} — les données de palpation obtenues par la MMT.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A: HYPOTHÈSE DES PETITS PARAMÈTRES. CALCUL DES MATRICES DE ROTATION.....	165
ANNEXE B: CONFIGURATION DES CENTRES D'USINAGE OMNIMILL 60 ET MITSUI SEIKI. GRAPHIQUES ET VALIDATION NUMÉRIQUE DU NIVEAU 1 DU MODÈLE.....	168
ANNEXE C: GRAPHIQUES ET VALIDATION NUMÉRIQUE DU NIVEAU 1 DU MODÈLE -- ÉTUDE DE L'ERREUR D'ALIGNEMENT.....	198
ANNEXE D: MATRICE DE SENSIBILITÉ DE LA MACHINE-OUTIL MITSUI SEIKI.....	213
ANNEXE E: GUIDE DE L'UTILISATEUR (EN ANGLAIS).....	215
ANNEXE F: REPRÉSENTATION DES ERREURS RÉSULTANTES DES AXES DE MOUVEMENT X ET Y, MATSUURA	231
ANNEXE G: REPRÉSENTATION DES ERREURS RÉSULTANTES DE L'AXE DE MOUVEMENT C, MATSUURA.....	235
ANNEXE H: RÉSULTATS DU PROCESSEUR DE NIVEAU 3 SUR LA PIÈCE SPÉCIALE, MATSUURA.....	238

INTRODUCTION

Dispersions dues aux paramètres géométriques d'écart des machines-outils

Les dispersions d'usinage des pièces sont l'un des problèmes majeurs du monde technique depuis l'invention des machines-outils. La pièce usinée doit être conforme à son dessin. Malheureusement ce n'est pas toujours le cas et ses éléments géométriques sont parfois hors de l'enveloppe de tolérance demandée.

L'amélioration de la performance d'une machine-outil en termes de précision est devenue de plus en plus importante dans l'usinage moderne. Ceci est principalement due aux demandes de précision dimensionnelle accrue des pièces usinées ainsi qu'aux tendances de production de petits lots de pièces. Une autre tendance qui se manifeste actuellement est la volonté d'associer au prix de fabrication, les coûts élevés pour la correction des paramètres d'usinage (Eishennawy, 1989).

L'automatisation à tous les niveaux de fabrication par l'utilisation des machines multi-axes à commande numérique, des robots et des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) a eu comme effet la recherche plus intensive de solutions pour améliorer la précision de réalisation des pièces. Les méthodologies et par conséquent les modèles associés varient des modèles de corrélation des paramètres de la machine (avance ou vitesse variable, optimisation des fonctions de transfert) aux modèles de représentation des matrices d'erreurs. Dernièrement la méthode la plus utilisée est celle qui utilise la cinématique des corps rigides. La théorie la plus employée pour une machine à trois axes est le développement des modèles à 21 paramètres géométriques d'écart mesurables. Les machines-outils sont des ensembles (P.M. Ferreira, 1986, G. Zhang 1988, J.A. Soons et P.H. Schellekens, 1992) de composants mobiles réunis par des articulations: le bâti et la colonne, la colonne et la tête de la broche,

le bâti et la table, la table et la palette etc. Pour les machines lourdes qui usinent des pièces massives en dégrossissage, le poids des pièces et des dispositifs de montage peuvent avoir comme effet des erreurs d'origine élastique orientées verticalement dans la chaîne cinématique de la machine (P.H. Schellekens, J.A. Soons, H. Spaan, V. Looock, E. Trapet, J. Dooms, H. de Ruiter, 1993). Quatre-vingt pour cent des machines-outils existantes dans le monde sont de grandeur moyenne ou petite, et ce type de problèmes n'est pas dominant. En plus (P.H. Schellekens e.a, 1993), leurs structures sont assez rigides pour supporter non seulement les poids mentionnés mais aussi les forces de coupe, sans qu'un déplacement significatif soit enregistré dans les axes de mouvement de la machine.

Plusieurs stratégies de modélisation des paramètres géométriques d'écart ont été développées (S.Sartori et G. Zhang, 1995): des méthodes de mesure et compensation en temps réel des erreurs via le contrôleur numérique de la machine-outil, de correction de la position du repère de la pièce, ou des méthodes basées sur le contrôle périodique de la machine-outil (J. Mou et G.R. Liu, 1995, et J. Mou, 1996). Dans les dix dernières années les chercheurs se sont penchés sur l'approche de la compensation de l'erreur pendant l'usinage.

Il y a un besoin réel de déterminer des méthodes fiables afin d'éliminer les erreurs de forme en fraisage sur des centres d'usinage multi-axes, d'une façon rapide et économique. Le modèle de compensation de l'erreur de forme élaboré par Dinauer, Duffie et Philpott (1993) est conçu à partir de la représentation de la surface usinée par des éléments de surfaces bi-cubiques. Après un fraisage de dégrossissage on procède à l'inspection de la surface par palpage, suivie par l'analyse de l'erreur et par une opération de finition qui a comme but d'annuler les erreurs de forme détectées. L'erreur est déterminée selon la normale à l'élément de surface ("patch"). L'analyse de l'erreur et la génération de la trajectoire de l'outil se déroulent pendant environ 50 minutes pour les surfaces planes, et beaucoup plus pour les surfaces complexes.

Le modèle élaboré par K. Yamazaki (1989) permet le traitement des données et la compensation de l'erreur. C'est un modèle en temps réel qui calcule à chaque instant la quantité de matériau enlevé par usinage. Un certain paramètre d'usinage, par exemple l'avance, est adapté continuellement à la quantité fluctuante de matériau enlevé; ainsi est assuré la constance des forces de coupe. Le résultat de cette procédure est la diminution de l'erreur de forme sur la surface usinée. Cependant les valeurs numériques des erreurs compensées restent inconnues. Le contrôle de la quantité de matériau présente l'avantage de prédire la surcharge de l'outil due à une profondeur de coupe trop grande qui peut mener à la destruction de l'outil. Le modèle est surtout utile pour les opérations de dégrossissage soient-elles de fraisage ou de brochage, quand le danger de faire croître brusquement la profondeur de coupe sans s'en rendre compte est réel à cause d'irrégularités de surface qui existent sur la pièce issue de la fonderie ou de la forge.

Un modèle très connu est celui de la modélisation de l'erreur résultante des mesures par étalonnage, appliqué aux machines à mesurer tridimensionnelles (Schellekens, Soons, Spaan, Looock, e.a.,1993). La précision de ces machines dépend de sources variées d'erreur: des déformations géométriques, thermiques, dynamiques, ainsi que des déformations du palpeur même. Le modèle qu'on discute ici considère exclusivement les paramètres géométriques d'écart, qui sont définis dans le chapitre 1. Pour réaliser l'étalonnage des paramètres géométriques d'écart, chaque paramètre est mesuré (par exemple perpendicularité entre les axes de mouvement, rectitude des axes linéaires, etc). Ces mesures représentent les données d'entrée pour un algorithme mathématique construit sur les principes de la cinématique des corps rigides. Le modèle fournit les composantes du paramètre géométrique d'écart dans l'espace pièce.

Des résultats valides ont été obtenus dans les dernières années en utilisant la cinématique des corps rigides pour compenser partiellement l'erreur d'usinage pour des machines-outils. Le modèle de J.A.Soons, F.C.Thews et P.H.Schellekens (1992) est un de ceux-là. Les auteurs

démontrent qu'il y a 21 paramètres géométriques d'écart pour un centre d'usinage à 3 axes. Pour ce modèle comme pour d'autres modèles qui traitent l'erreur des centres d'usinage, la sélection des paramètres géométriques d'écart significatifs est essentielle pour la suite de la procédure. En plus, cette sélection ainsi que les valeurs de ces paramètres significatifs constituent ensemble le diagnostic de l'état actuel de la machine-outil. Les valeurs des paramètres doivent être réévaluées périodiquement à cause de l'usure continue du système technologique, par conséquent les paramètres géométriques d'écart doivent être réévalués périodiquement. Le modèle attache son système de référence global au bâti de la machine-outil. Les composants de la structure sont identifiés comme dans une chaîne cinématique, à partir de la pièce jusqu'au bout de l'outil.

Pour les machines-outils ayant des erreurs géométriques prononcées et pour lesquelles les déformations dues aux forces d'usinage sont relativement faibles, ce modèle d'analyse peut compenser en bonne partie l'erreur de forme propagée sur la pièce.

D'autres contributions importantes dans ce domaine sont celles de P.M.Ferreira et C.R.Liu (1986), suivies par celles menées par l'équipe de B.V.Kreng, C.R.Liu et C.N.Chu (1992). Les premiers analysent l'état géométrique quasi-statique en représentant les paramètres géométriques d'écart par des polynômes de degré n . C'est une méthode empirique qui peut être implémentée dans une structure de type réseau à neurones à plusieurs niveaux ("multi-layers").

Dans le modèle développé par B.V.Kreng, C.R.Liu et C.N.Chu (1992), les auteurs renoncent à l'approche précédente qu'ils ont trouvée complexe et lente, et utilisent la méthode de la cinématique des corps rigides. Quant aux erreurs dues aux forces dynamiques qui ont un effet sur les tolérances de forme de la pièce, les auteurs apprécient que ces déformations, dues en grande partie aux forces d'usinage, peuvent être contrôlées en dehors du modèle de calcul,

en:

- assurant une structure rigide de la machine-outil et des dispositifs de montage;
- ajustant les paramètres d'usinage de la machine;
- trouvant des solutions pour l'amortissement des vibrations.

On connaît actuellement plusieurs études ou recherches en cours qui ont comme sujet la modélisation de l'état géométrique des machines-outils. Par contre, la propagation des erreurs calculées sur les éléments géométriques d'une pièce usinée ainsi que la comparaison de ces erreurs avec les tolérances imposées reste un domaine ouvert pour la recherche.

La machine à mesurer tridimensionnelle, dont la représentation cinématique est similaire à celle de la machine-outil, est le sujet de nombreuses recherches. Une machine à mesurer tridimensionnelle virtuelle est en cours de réalisation (Sartori et Zhang, 1995). Des laboratoires et industries en Allemagne, Pays Bas et Grande Bretagne travaillent actuellement à un projet de recherche de la Communauté Européenne pour réaliser la MMT virtuelle.

Le comportement de la MMT virtuelle proposée par les chercheurs Kunzmann, Trapet et Wäldele (1993) est simulé sur un ordinateur. Les modèles des paramètres géométriques d'écart et des erreurs thermiques sont archivés dans la mémoire de l'ordinateur. Les données d'entrée sont: les conditions environnementales, les températures de la pièce à usiner, les mesures nécessaires et la procédure de mesure (la stratégie de mesure: le nombre, la distribution et l'accès des points de mesure; la succession des opérations de mesure; les trajets de mesure etc.). Toutes ces opérations faites sur MMT sont facilement simulées directement sur l'écran de l'ordinateur. La MMT virtuelle fournit l'erreur de mesure et l'incertitude de l'erreur prédite.

Le plus récent modèle de calcul en temps réel des erreurs d'usinage a été signalé dans un

article de synthèse (Sartori, Zhang, 1995) qui décrit l'état global des recherches dans le domaine. Ce modèle (Shellekens, Soons, Spaan, Looock, Trapet, 1994) est une application pour une machine-outil à cinq axes de la technique de compensation de l'erreur en temps réel. Le modèle prend en compte les paramètres géométriques d'écart, les erreurs thermiques et les erreurs dues aux forces de coupe. Les 18 paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire sont mesurés à la fois directement et par des méthodes d'étalonnage indirecte de la machine-outil. Ensuite ils sont transmis à un ordinateur externe. Le modèle des paramètres géométriques d'écart variable inclut la longueur de l'outil et son orientation. Un logiciel assure le traitement des données fournies par les capteurs de température et de force et additionne aux paramètres géométriques d'écart variables les erreurs thermiques et celles dues aux efforts de coupe. Le modèle fournit le vecteur de l'erreur du bout de l'outil, exprimé en coordonnées Cartésiennes. Les résultats sont sauvegardés dans des tableaux. Ces tableaux sont transmis à la commande numérique du centre d'usinage à chaque minute. Le processeur de la commande numérique fait la compensation des axes, en soustrayant les erreurs résultantes calculées aux positions théoriques.

Diagnostic et suivi de l'état géométrique des machines-outils

Dans une étude de synthèse des méthodes employées dernièrement dans la détermination des paramètres géométriques d'écart des articulations des machines-outils (S. Sartori, 1995), l'auteur identifie les conditions à remplir par n'importe quelle méthode utilisée pour faire des mesures.

- la condition d'identité: La machine doit être étalonnée en utilisant de façon prépondérante les axes de mouvement qui sont utilisés le plus pendant l'usinage. L'utilisation de la machine pendant l'étalonnage doit être similaire à son utilisation pendant l'usinage.
- la condition de la totalité d'information: Les mesures sont le résultat des erreurs manifestées dans tout l'espace de travail de la machine.
- la condition de simplicité: Les instruments utilisés pour effectuer les mesures ne sont pas chers et sont faciles et rapides à réaliser ou à manipuler, sans avoir des connaissances spécifiques. La facilité de transport de l'équipement de mesure est aussi à considérer.
- la justesse et la répétabilité des résultats: L'incertitude de mesure des erreurs ne doit pas dépasser la plus petite valeur des paramètres géométriques d'écart des articulations de la machine-outil. Les mesures doivent être répétées à intervalles de temps réguliers, sans que l'incertitude des données ne dépasse jamais les valeurs des paramètres géométriques d'écart.

Les méthodes de mesure des machines-outils qui sont utilisées actuellement sont soit des méthodes directes, soit des méthodes indirectes ou d'auto-étalonnage. Les méthodes directes utilisent un équipement spécifique pour mesurer chaque source d'erreur individuelle. Les applications pratiques les plus connues de ces méthodes sont celles qui utilisent un repère différent pour chaque paramètre géométrique d'écart, ainsi que celles qui utilisent un seul instrument monté dans un repère unique pour mesurer plusieurs paramètres géométriques

d'écart à la fois.

Parmi les méthodes directes qui utilisent des repères différents pour chaque mesure, les équipements les plus connus sont ceux à base de faisceau laser. Par exemple, le paramètre géométrique d'écart variable linéaire d'échelle, le paramètre géométrique d'écart variable de rectitude et le paramètre géométrique d'écart variable angulaire peuvent être déterminés en utilisant les accessoires appropriés. L'avantage principal des ces méthodes directes est qu'elles sont très bien documentées et développées. Les désavantages sont le besoin d'acheter et maintenir des instruments très chers et que la condition de simplicité n'est pas réalisée. Le dernier désavantage découle du fait que ces méthodes directes ne peuvent pas être automatisées et qu'elles nécessitent la présence d'un opérateur spécialisé. En plus, pour les méthodes laser, la détermination de l'indice de réfraction de l'air et l'alignement de l'instrument sont obligatoires. Quelques exemples d'équipement dans la catégorie des méthodes directes à repère différent sont donnés à la table 1.1. La deuxième catégorie de méthodes directes est celle qui utilise un seul instrument dans un seul repère pour mesurer plusieurs paramètres géométriques d'écart à la fois. Un instrument de mesure tridimensionnel utilisé couramment est la barre à billes ("ball bar").

Les méthodes indirectes sont des méthodes qui utilisent des artefacts montés dans l'espace de travail de la machine-outil pour effectuer les mesures. Les paramètres géométriques d'écart de la machine sont déterminés suite à des calculs de résolution des systèmes d'équations linéaires ou linéarisées et d'habitude ils sont sur-déterminés. Pour résoudre le système d'équations on utilise les techniques classiques des moindres carrés. Les artefacts les plus utilisés sont la plaque à billes et la plaque à trous. Ces artefacts sont étalonnés et ils sont mesurés par la machine même (H.Kunzmann, E. Trapet, F. Waldele, 1990). Ils sont montés dans des positions différentes sur la palette de la machine, mais en gardant le repère des coordonnées de la plaque parallèle aux axes de la machine. En comparant les résultats

des mesures dans des points voisins, par exemple les mesures appartenant aux points ayant les mêmes coordonnées x et y , on peut séparer les paramètres géométrique d'écart spécifiques à l'axe de mouvement Z seulement. Les calculs sont basés sur le traitement des variations des mesures d'une position à l'autre. L'avantage principal est la facilité de détermination des paramètres géométriques d'écart, mais le désavantage est la longueur de la procédure. Dans le tableau 0.1, les paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire sont notés PGÉV.

Tableau 0.1 Dispositifs utilisés pour mesurer les paramètres géométriques d'écart des machines-outils (tirée et traduite de S. Sartori, 1995)

Paramètre géométrique d'écart	Appareillage
PGÉV linéaire d'échelle $e_i(j)$, $i=j$ - un PGÉV par articulation	• Interféromètre laser • Cales étalons • Calibre étagé • Plaque à billes ou à trous étalonnée
PGÉV de rectitude $e_i(j)$, $i \neq j$ - deux PGÉV par articulation	Dispositif de référence de rectitude: • fils de fer • règle droite mécanique ou optique • faisceau laser Indicateur de déplacement: • capteur capacitif • interféromètre laser et accessoires • photodiode
PGÉV angulaire $\gamma_i(j)$ - roulis, pour $i = j$ - lacet et tangage, pour $i \neq j$	• Auto-collimateur • Interféromètre laser et accessoires • Niveau mécanique • Niveau électronique • Dispositifs de mesure de la rectitude à différents endroits
Perpendicularité	• Équerre mécanique et comparateur • Mesures sur 2 diagonales d'un artefact de longueur
Parallélisme	• Collimateur avec équerre optique • Interféromètre laser avec équerre optique

Les paramètres géométriques d'écart variables sont considérés des fonctions polynomiales

de Legendre $f = \sum C_{pq} u^p v^q$ (J.P. Kruth, 1994 et N. Ferreira, 1986). Les coefficients C_{pq} sont inconnus et il faut les déterminer en spécifiant une condition mathématique des moindres carrés. Par exemple, dans le cas d'un étalonnage d'une machine-outil avec des mesures prises dans un plan sur une grille de points (M.R.Raugh, 1985), la grille doit être symétrique et, quand on fait tourner la grille de 90° autour d'un point de pivotement, la matrice des coordonnées $V_{1r} = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)$ doit se superposer sur les coordonnées V_{2r} d'une rangée voisine de points. À cause des erreurs de mesure, l'alignement de V_{1r} avec V_{2r} n'est pas parfait. On peut formuler la contrainte mathématique des moindres carrés comme suit: déterminer les coefficients C_{pq} en minimisant l'erreur d'alignement entre les V_{jr} ($j = 1, k$). Le résultat de cette contrainte est un système non linéaire qui doit être linéarisé et solutionné.

La même méthode de calcul peut être appliquée à l'étalonnage des plaques à trous ou à billes (Charles P.Reeve, 1974) et elle a été utilisée pour étalonner une MMT en utilisant une plaque à billes (J.P.Kruth, P.Vanherck, L.de Jonge, 1994).

Une autre technique pour résoudre le système d'équations, au lieu d'utiliser la méthode des moindres carrés, est de donner des valeurs arbitraires aux paramètres ayant des valeurs beaucoup plus petites que d'autres paramètres (A. Balsamo, 1995, [BAL95]). Cette technique a été appliquée pour l'étalonnage d'un palpeur sur une MMT à trois axes, pendant le palpéage d'un calibre étagé (step gauge).

L'avantage de ces méthodes est que les coûts de fabrication et de mesure des artefacts sont beaucoup moins chers que ceux des méthodes directes. En plus, ces méthodes indirectes peuvent utiliser aussi bien des artefacts calibrés que des artefacts non calibrés -- sauf pour le PGÉV linéaire d'échelle pour lequel du moins une longueur sur l'artefact doit être étalonnée. La procédure de mesure peut être automatisée. Elle est largement indépendante de la température moyenne de l'environnement (tiré de Sartori, 1995). Pour évaluer

l'efficacité des mesures, une technique possible est l'analyse statistique des erreurs résiduelles.

La détermination des paramètres géométriques d'écart d'une machine-outil est inévitablement limitée par les effets de la température sur les mesures. Une précaution initiale qui doit être considérée est de prendre des mesures dans un environnement où la température ne varie pas dans le temps et dans l'espace (S. Sartori, 1995).

Les modèles traitant les paramètres géométriques d'écart des machines-outils ont des limites qui peuvent être resumées comme suit:

- La majorité des modèles traitent les composantes systématiques des paramètres géométriques d'écart, ce qui est parfaitement justifiable du point de vue technique. Dans les cas pratiques, les machines sur lesquelles on va appliquer les modèles présentent des erreurs systématiques qui sont beaucoup plus grandes que les erreurs aléatoires.
- Les résultats des mesures dépendent de la condition thermique de la machine et des objets utilisés pour l'étalonnage. Ce fait incontournable impose la contrainte que toutes les séances de mesure doivent se dérouler dans des conditions similaires aux conditions générales de fonctionnement de la machine pendant l'usinage.
- Les méthodes existantes de mesure des paramètres géométriques d'écart ne peuvent pas permettre la séparation des déformations élastiques, dues aux masses des solides en déplacement, dans la valeur des PGÉV de rectitude. La composante dynamique de la déformation élastique, qui dépend de la vitesse de déplacement des solides mobiles, peut être gardée constante d'une séance de mesure à l'autre en utilisant la même vitesse d'avance, à une valeur qui est dans le domaine usuel des vitesses pendant l'usinage (tiré de Sartori, 1995).

Le sujet de cette thèse est d'actualité dans le domaine de la recherche de nouvelles techniques de diagnostic géométrique des machines outils. En considérant les trois aspects qui gèrent le lancement et l'application des nouveaux projets dans l'industrie, soient-ils le coût, la qualité ou le temps, le modèle proposé répond bien à ces trois exigences. L'économie des coûts apportée par son application réside dans le fait que le modèle intervient dans l'emploi de la machine-outil avant que la pièce soit usinée, donc le modèle fait éviter l'éventualité de rebuter ou d'avoir à réusiner la pièce. Le modèle répond à la question de la qualité du produit fabriqué parce que son objectif est de prédire la faisabilité des éléments géométriques de la pièce à usiner et par conséquent d'améliorer la qualité des produits usinés par une machine donnée. En plus, le modèle offre l'avantage par rapport aux techniques différentes de diagnostic d'être très rapide; le montage des artefacts, l'alignement, les mesures par palpation électronique et le traitement des données se déroulant en moins de trente minutes.

CHAPITRE 1

LE CONCEPT GÉNÉRAL DE PROPAGATION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES D'ÉCART

1.1 Schéma et interprétation cinématique des machines-outils

Les machines-outils ont une structure formée de parties mobiles et de parties fixes qui peuvent être assimilées à des corps rigides en relation géométrique les uns par rapport aux autres. Chacun des composants mobiles supporte un axe de mouvement de la machine-outil. L'approche cinématique d'étude d'une machine-outil implique la connaissance de la topologie et de la géométrie de la machine ainsi que des paramètres géométriques d'écart présents dans les axes de mouvement et entre ceux-ci.

1.1.1 Configuration de la machine-outil

Les machines-outils traitées dans cette thèse sont celles de type sérielle. Dans le cas général elles ont deux chaînes sérielles rattachées à un bâti commun, soit une portant la pièce, l'autre l'outil. Prenons par exemple la machine-outil illustrée à la figure 1.1. La chaîne ou branche pièce a une topologie PPRR (P et R représentent des articulations prismatiques et rotoïdes respectivement) tandis que la branche outil n'est constituée que d'une articulation prismatique P. Cette machine est alors décrite comme étant de topologie CAXYFZ en parcourant les chaînes de la pièce vers l'outil en passant par le bâti (F pour "Frame" en anglais). Les articulations prismatiques sont nommées X, Y et Z car elles demeurent nominalement parallèles au repère du bâti peu importe la configuration articulaire. Les articulations rotoïdes sont nommées A, B, C selon que ces axes de mouvement de rotation soient parallèles aux articulations prismatiques X, Y ou Z, pour des coordonnées articulaires nulles de toutes les articulations rotoïdes. Des repères sont associés à chaque articulation ainsi qu'à l'outil, la

pièce et l'élément géométrique à usiner. La convention de Denavit-Hartenberg n'est pas couramment utilisée dans le domaine des machines-outils. Nous pouvons ainsi placer les repères de chaque articulation avec des axes parallèles aux articulations prismatiques de la machine et aussi décider de leurs positions en translation. Ainsi nous choisirons de positionner les repères près des guides mécaniques afin d'avoir une correspondance mécanique plus forte entre les erreurs de mouvement de ces repères et la source de ces erreurs.

Pour le centre d'usinage à cinq axes de mouvement ayant la configuration de la figure 1.1, les trois mouvements linéaires sont supportés par trois composantes mobiles du centre d'usinage. La palette subit le mouvement de rotation autour de l'articulation C qui est parallèle à l'articulation Z. Le référentiel est situé au centre de rotation de la palette sur la surface plane extérieure au repère noté O1. Une autre articulation centrée en O2 peut assurer une inclinaison de la palette autour de l'axe de mouvement A qui est parallèle à X. La table longitudinale se déplace sur la table transversale selon l'articulation prismatique X et son repère est O3. La table transversale se déplace selon Y par rapport à la fondation R_f du centre d'usinage est son repère est O4. Le bâti a un système de référence attaché au repère R_f . La broche a le repère O5. Le repère de l'outil est noté t. Le repère de la pièce à usiner est w.

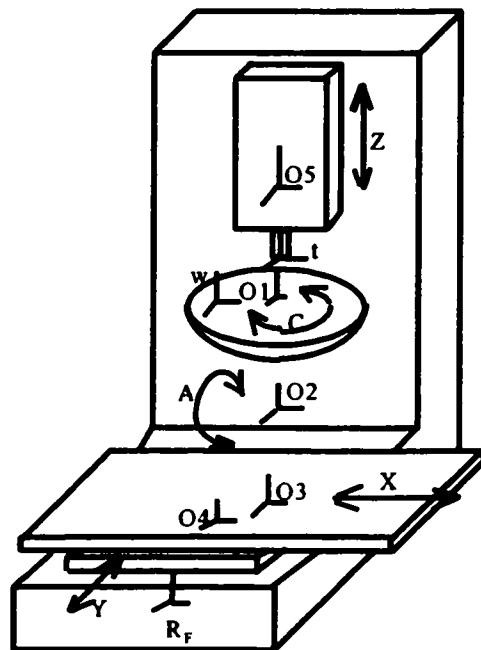


Figure 1.1 Centre d'usinage à 5 axes Matsuura

Le schéma cinématique de ce centre d'usinage est montré à la figure 1.2.

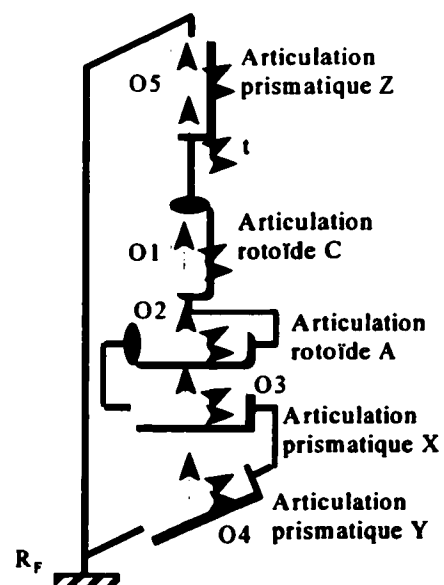


Figure 1.2 Schéma cinématique de la machine Matsuura

1.1.2 Paramètres géométriques d'écart de la machine-outil

1.1.2.1 Paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire PGÉV

Les paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire d'une articulation prismatique incluent les erreurs de position et d'orientation subies par le corps rigide pendant son déplacement. Elles consistent en trois PGÉV linéaires orientées selon les trois axes de mouvement linéaires (un PGÉV linéaire d'échelle et deux de rectitude) ainsi que trois PGÉV angulaires (le roulis, le tangage et le lacet). Ces paramètres sont montrés à la figure 1.3. Chacun de ces paramètres dépend de la coordonnée articulaire du corps le long de l'axe.

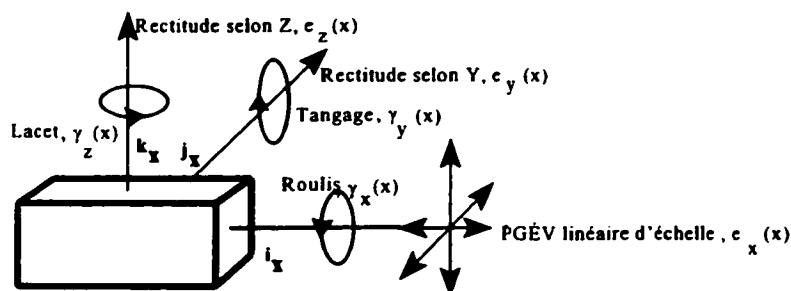


Figure 1.3 Les 6 paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire, pour l'axe de mouvement X

Six paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire sont développés dans chacun des trois axes de mouvement linéaires de la machine-outil. L'indice représente la direction de l'erreur. Pour les articulations prismatiques (ou axes de mouvement linéaires) quand l'indice de e est le même que la coordonnée articulaire, il s'agit du PGÉV linéaire d'échelle, comme par exemple $e_x(x)$ ou $e_z(z)$. Quand l'indice est différent de la coordonnée articulaire, c'est une PGÉV de rectitude. Dans les termes qui suivent, l'axe de

mouvement d , ou la coordonnée articulaire, est n'importe quel axe parmi X, Y ou Z.

$e_x(d)$, $e_y(d)$, $e_z(d)$ -- un PGÉV linéaire d'échelle et deux PGÉV de rectitude;

$\gamma_x(d)$, $\gamma_y(d)$, $\gamma_z(d)$ -- roulis, tangage et lacet (pas nécessairement dans l'ordre).

Par conséquent, un centre d'usinage à trois axes de mouvement linéaires possède 18 paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire. Un ensemble similaire de six paramètres géométriques d'écart variables existe pour chaque axe de mouvement de rotation. La figure 1.4 montre l'axe C de mouvement de rotation qui est nominalement parallèle à l'axe de mouvement Z. Les trois PGÉV de translation linéaire sont un déplacement axial selon la direction de l'axe de mouvement Z, ou k_c , et des déplacements selon les deux autres axes de mouvement linéaires. Les trois PGÉV angulaires incluent une rotation autour du vecteur k_c et deux PGÉV angulaires autour des deux autres axes de mouvement.

L'angle de rotation nominal de l'axe de mouvement C est noté c . Tous les paramètres représentés à la figure 1.4 sont fonction de l'angle c . Dans les notations qui suivent l'axe de mouvement d est un des axes de mouvement de rotation A, B ou C.

$e_x(d)$, $e_y(d)$, $e_z(d)$ -- un PGÉV axial, quand la direction de la déviation notée en indice est parallèle à la direction de l'axe de mouvement de rotation, et deux PGÉV radiaux de l'axe de mouvement;

$\gamma_x(d)$, $\gamma_y(d)$, $\gamma_z(d)$ -- un PGÉV angulaire d'échelle, quand la direction de la déviation notée en indice est parallèle à la direction de l'axe de mouvement de rotation, et deux PGÉV angulaires d'inclinaison de l'axe de mouvement.

Certains auteurs (K. Busch, H. Kunzmann, F. Wäldele, 1984) ont remarqué que les deux PGÉV radiaux d'un axe de mouvement de rotation ne doivent pas être confondues avec leur résultante, qui est appelée aussi erreur radiale, tandis que les deux PGÉV angulaires d'inclinaison donnent l'effet de l'erreur d'inclinaison (en anglais "tilt error") similaire à une erreur de balancement (référée, en anglais, "wobble").

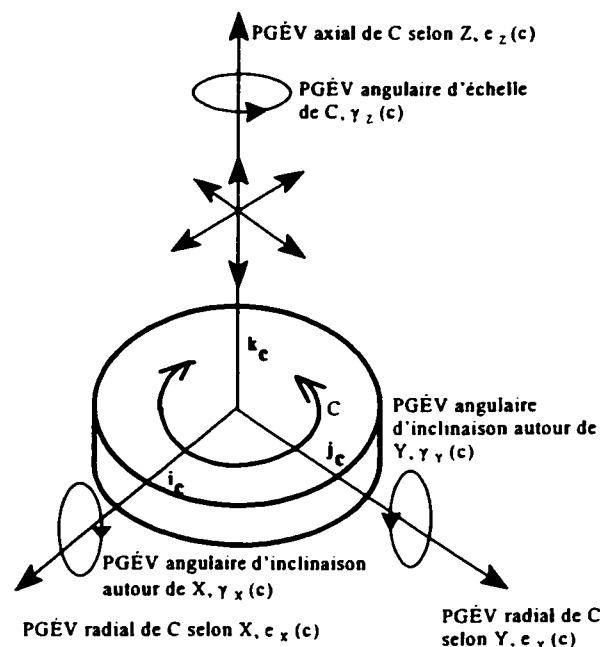


Figure 1.4 Les six paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire de l'axe C

1.1.2.2 Paramètres géométriques invariables en fonction de la coordonnée articulaire

Les paramètres géométriques invariables en fonction de la coordonnée articulaire sont les paramètres qui ne dépendent pas de la position articulaire des axes de mouvement. Selon le modèle de Denavit-Hartenberg deux paramètres angulaires suffisent pour localiser deux articulations prismatiques l'une par rapport à l'autre. Ces deux paramètres sont potentiellement empreints d'erreurs. Cependant nous pouvons définir des paramètres géométriques linéaires pour spécifier une position zéro ou encore la relation entre les guides physiques. Ceux-ci n'auront pas d'écarts associés. Pour décrire plutôt la position entre deux articulations rotoïdes alors les paramètres géométriques linéaires, avec écarts, sont justifiés. Les paramètres géométriques linéaires invariables en fonction de la coordonnée articulaire

sont les composantes du vecteur de position relative entre deux articulations consécutives dans la chaîne cinématique. Ils sont notés avec a_x , a_y , et a_z (voir la figure 1.5)

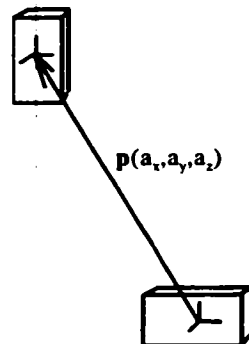


Figure 1.5 Représentation des paramètres géométriques linéaires invariables en fonction de la coordonnée articulaire.

Les paramètres géométriques angulaires invariables en fonction de la coordonnée articulaire sont les orientations des axes de mouvement entre deux repères consécutifs de la chaîne cinématique. Les valeurs nominales de positionnement angulaire entre deux axes de mouvement sont généralement de 0° ou 90° , et les directions des articulations pour la plupart des machines-outils sont assimilées aux directions nominales données par les trois axes linéaires du repère global de la machine-outil.

Les erreurs de positionnement linéaire entre deux axes de mouvement consécutifs rotoïdes sont aussi des invariants (hypothèse des corps rigides) par rapport à la position de l'axe de mouvement. Ces erreurs sont notées avec Δa_x , Δa_y , et Δa_z et sont appelées paramètres géométriques linéaires d'écart invariables en fonction de la coordonnée articulaire ou PGÉI.

Les paramètres géométriques angulaires d'écart invariables de l'articulation d , $\gamma_{x,d}$, $\gamma_{y,d}$, $\gamma_{z,d}$ sont des erreurs angulaires de l'axe courant autour des directions de i , j et k et ne dépendent

pas de la coordonnée articulaire. Ces erreurs représentent physiquement les erreurs de perpendicularité et de parallélisme de l'axe de mouvement (voir la figure 1.6).

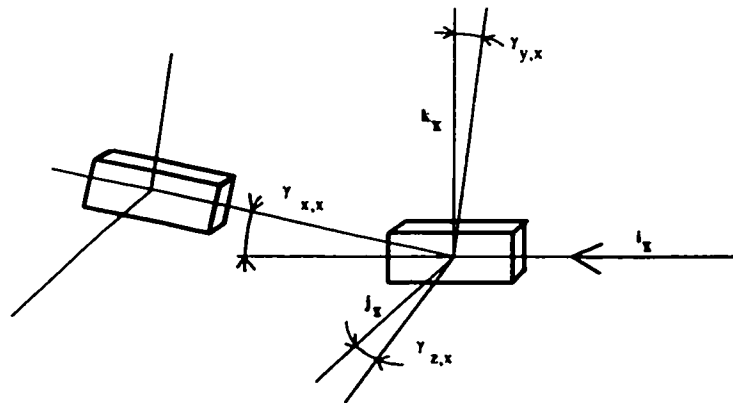


Figure 1.6 Représentation des paramètres géométriques angulaires d'écart invariables de l'axe de mouvement X

En général, deux paramètres géométriques angulaires suffisent pour entièrement spécifier l'état de non-alignement d'un axe de mouvement: cependant un des axes n'aura aucun défaut (étant de référence) et un second n'en aura qu'un seul.

1.2 Hypothèses fondamentales et spécifiques

L'étude des machines-outils, par la théorie du calcul cinématique et de propagation des erreurs géométriques dans l'espace de travail, est possible en utilisant certaines hypothèses. La chaîne cinématique est formée d'une succession de composants mobiles. Les mouvements des composants mobiles subissent des erreurs linéaires et angulaires décrites dans la section précédente. En même temps, chaque axe de mouvement a une pose précise dans l'espace par rapport à l'articulation du composant mobile précédent. Cette pose est définie par des paramètres géométriques invariables en fonction de la coordonnée articulaire (voir la section précédente).

L'hypothèse de corps rigides implique que les paramètres géométriques d'écart d'une articulation sont indépendants des coordonnées articulaires des autres articulations. Chaque paramètre géométrique d'écart n'est donc fonction que d'une coordonnée articulaire, celle de l'articulation à laquelle l'écart est appliqué. Par exemple, le PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Z, $e_z(x)$, dépend seulement de la variable x et ne dépend pas d'y, z, a, b ou c.

Les valeurs des PGÉV linéaires et angulaires des articulations de la chaîne cinématique, ainsi que celles des PGÉI linéaires et angulaires, sont supposées petites. Les matrices jacobiennes seront calculées à partir du modèle cinématique nominal des machines. Cependant, il demeure une excellente approximation en présence des paramètres géométriques relativement petits. Nous l'avons utilisé dans la section de la validation du modèle pour l'étalonnage de la machine Matsuura.

Donc, pour un petit angle γ ,

$$\cos \gamma \sim 1; \sin \gamma \sim \gamma.$$

Le produit entre deux ou plusieurs PGÉV, et / ou PGÉI est supposé négligeable. Par exemple,

$$e_z(x) \gamma_x(y) \sim 0; \quad \gamma_x(x) \gamma_y(z) \sim 0; \quad \gamma_{x,y} \gamma_x(y) \sim 0.$$

Quand les axes de mouvement de la machine-outil se déplacent, il existe l'éventualité très probable que des jeux internes se développent et leur effet n'est pas toujours négligeable. Les machines-outils modernes sont prévues avec des mécanismes de rattrapage des jeux. Avant de commencer les tests par palpé, les déplacements des axes de mouvement doivent être compensés pour les jeux éventuels.

Le phénomène de détérioration géométrique qu'on veut diagnostiquer est un phénomène qui évolue dans le temps. Dans cette perspective il faut prendre soin d'harmoniser les périodes

d'entretien et de maintenance de la machine-outil avec la stratégie de palpéage prévue par le modèle. Dès que des opérations de changements de roulements ou de nettoyage et entretien des guidages et des mécanismes d'avance ont été effectuées, ou d'autres opérations d'amélioration des performances de la machine ont été implémentées, comme par exemple l'installation de capteurs en vue de la compensation de certaines erreurs, les données de référence du modèle doivent être cueillies de nouveau. Les périodes de temps de suivi de l'état géométrique à l'aide du modèle présent doivent être prévues entre deux séances d'inspection et d'entretien de la machine-outil.

Le modèle fonctionne en utilisant des paramètres géométriques ponctuels, et n'utilise pas des variables distribuées. Les données d'entrée, les variables intermédiaires et les réponses fournies par le modèle sont toutes développées dans des points précis.

Le modèle traite la composante systématique des écarts. On considère que cette composante est beaucoup plus grande que celle dite aléatoire. Des phénomènes aléatoires peuvent influencer les mesures des paramètres géométriques, dues par exemple aux sources thermiques extérieures à la machine.

L'effet des sources d'erreurs aléatoires mentionnées peut être diminué en prenant des précautions comme, par exemple, en éloignant toutes les éventuelles sources thermiques externes (pour réduire l'effet de sources thermiques). Quant aux erreurs de source inconnue intervenant pendant le déplacement des axes de mouvement, en faisant répéter les tests de palpéage nous calculons une moyenne de l'erreur des mesures selon la coordonnée articulaire.

L'erreur de montage de l'origine du repère de l'artefact suite au montage sur la palette de la machine est du même ordre de grandeur que la composante systématique des paramètres géométriques d'écart.

L'effet de l'erreur d'alignement de l'artefact pour le modèle présent a été simulé numériquement. Les résultats obtenus, qui sont commentés plus en détail dans les sections 3.2. et 3.3., démontrent que l'erreur d'alignement a un effet sur les mesures concernant les axes de mouvement de rotation de la machine.

Le modèle fonctionne dans l'hypothèse que la température de l'espace de travail ne varie pas ni pendant les tests, ni d'une séance de tests à l'autre. Un autre aspect est que les résultats des mesures dépendent de la condition thermique de la machine et des objets de référence utilisés. Ce fait incontournable impose la contrainte que toutes les séances de mesure doivent se dérouler dans des conditions similaires aux conditions générales de fonctionnement de la machine pendant l'usinage.

l'hypothèse mentionnée au-dessus, qui semble la plus exigeante, impose la condition suivante du bon fonctionnement du modèle: Les mesures doivent se dérouler quand la machine est rendue dans le même état thermique d'une séance de tests à l'autre. Ceci peut être réalisé, soit en chauffant la machine de l'état froid jusqu'à une ou deux heures de fonctionnement quasi-statique de ses axes de mouvement, soit en accomplissant les tests immédiatement après le fonctionnement en usinage pendant plusieurs heures de la machine.

Le modèle actuel ne permet pas le calcul et l'extraction des déformations élastiques, dues aux forces inertielles résultant des accélérations. Cet inconvénient peut être contourné. La composante dynamique de la déformation élastique, qui dépend de la vitesse et des accélérations des composants mobiles, peut être gardée constante d'une séance de mesure à l'autre en utilisant les mêmes vitesses et accélérations, à une valeur qui est dans le domaine usuel des vitesses pendant l'usinage. Le modèle est alors capable d'annuler l'effet systématique constant des déformations élastiques.

1.3 Matrices de transformation homogènes associées aux paramètres géométriques d'écart

Nous attachons des matrices homogènes de transformation $F(s)$, par exemple $F(c)$, $F(a)$, $F(x)$, $F(y)$ ou $F(z)$, aux paramètres géométriques d'écart variables. Des matrices $D(s)$, par exemple $D(c)$, $D(a)$, $D(x)$, $D(y)$ ou $D(z)$, sont attachées aux paramètres géométriques invariables et aux déplacements selon les axes de mouvement. La figure 1.7 représente les matrices de transformation homogènes dans la chaîne cinématique de la machine Matsuura.

1.3.1 Forme générale de la matrice de transformation

Les matrices de transformation homogènes sont des matrices 3x3 de rotation R complétées à droite par une matrice colonne 3x1 de position p et en bas par une matrice ligne 1x4 qui aura toujours comme éléments $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$, soit,

$$T_{\text{gen}} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.1]$$

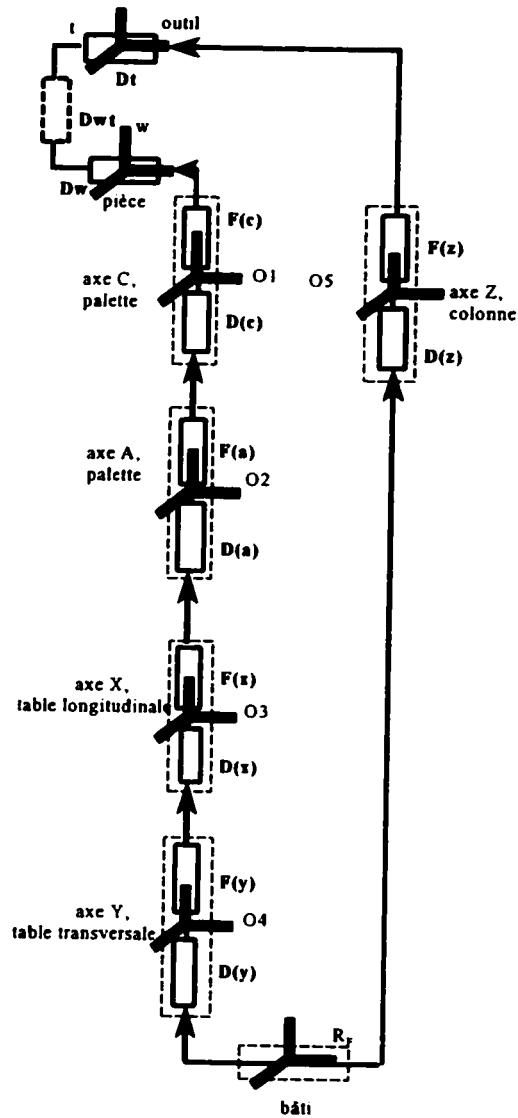


Figure 1.7 Représentation de la machine-outil MATSUURA

1.3.2 Matrices homogènes attachées aux paramètres géométriques d'écart variables $F(d)$

Les matrices des paramètres géométriques d'écart variables $F(d)$ contiennent les PGÉV.

Pour des petits PGÉV angulaires la tranformation homogène peut être approximée par

$$\mathbf{F}(\mathbf{d}) = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_z(\mathbf{d}) & \gamma_y(\mathbf{d}) & \mathbf{e}_x(\mathbf{d}) \\ \gamma_z(\mathbf{d}) & 1 & -\gamma_x(\mathbf{d}) & \mathbf{e}_y(\mathbf{d}) \\ -\gamma_y(\mathbf{d}) & \gamma_x(\mathbf{d}) & 1 & \mathbf{e}_z(\mathbf{d}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.2]$$

1.3.3 Matrices de transformation entre deux axes de mouvement consécutifs $\mathbf{D}(\mathbf{d})$

La matrice de transformation entre deux axes de mouvement consécutifs $\mathbf{D}(\mathbf{d})$ exprime la position du repère d'une articulation par rapport au repère de l'articulation précédente.

$$\mathbf{D}(\mathbf{d}) = \mathbf{D}_{1,\mathbf{d}} \mathbf{D}_{2,\mathbf{d}} \mathbf{D}_3(\mathbf{d}) \quad [1.3]$$

où $\mathbf{d}$ est l'axe de mouvement X, Y, Z, A, B ou C.

$\mathbf{D}_{1,\mathbf{d}}$ est la matrice de positionnement nominal entre les axes de mouvement, et exprime les positions entre les repères des deux articulations consécutives avant les déplacements selon les axes (voir l'annexe A, Emplacement des repères pour les machines Matsuura et Mitsui Seiki). Elle est fonction des paramètres géométriques invariables nominaux.

$\mathbf{D}_{2,\mathbf{d}}$ est la matrice des paramètres géométriques d'écart invariables, toujours avant le déplacement articulaire.

$D_3(d)$ est la matrice de transformation de grands déplacements articulaires.

Pour expliquer les matrices $D_{1,d}$ et $D_{2,d}$ qui contiennent des paramètres invariables de la coordonnée articulaire, il faut utiliser les notions présentés au paragraphe précédent. Dans ce qui suit, on présente les matrices homogènes associées à ces paramètres, ainsi que les matrices de transformations de grands déplacements.

1.3.4 Matrices homogènes associées aux paramètres géométriques invariables nominaux

$D_{1,d}$

La matrice associée aux paramètres géométriques invariables nominaux $D_{1,d}$, exprime le positionnement entre les axes. Elle a la forme générale suivante :

$$D_{1,d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{d-1,d} \\ 0 & 1 & 0 & y_{d-1,d} \\ 0 & 0 & 1 & z_{d-1,d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.4]$$

La portion matrice de rotation est la matrice identité pour la plupart des machines-outils de topologie sérielle.

1.3.5 Matrices homogènes associées aux paramètres géométriques d'écart invariables

$D_{2,d}$

La matrice de transformation homogène $D_{2,d}$ est associée aux paramètres géométriques d'écart invariables, comme par exemple les erreurs de perpendicularité ou les erreurs d'alignement linéaire. Cette matrice a la forme suivante.

$$D_{2,d} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{z,d} & \gamma_{y,d} & \Delta x_{d-1,d} \\ \gamma_{z,d} & 1 & -\gamma_{x,d} & \Delta y_{d-1,d} \\ -\gamma_{y,d} & \gamma_{x,d} & 1 & \Delta z_{d-1,d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.5]$$

1.3.6 Matrices des grands déplacements $D_3(d)$

Les matrices des grands déplacements $D_3(d)$ complètent les matrices $D(d)$ dans la relation [1.3]. Ces matrices sont spécifiques à chaque axe de mouvement. Dans l'exemple suivant, on montre le déplacement selon l'axe de mouvement linéaire X (voir la figure 1.8) et la matrice attachée à cette transformation (la relation 1.6).

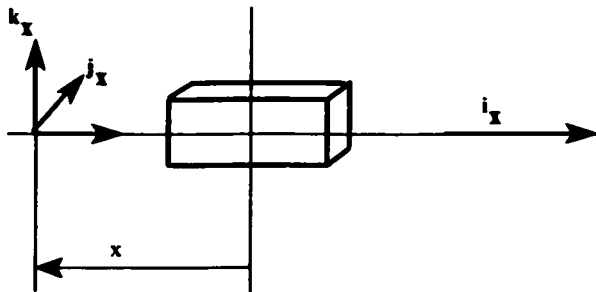


Figure 1.8 Grand déplacement x selon l'axe de mouvement X

$$\mathbf{D}_3(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.6]$$

L'exemple suivant présente le déplacement d'un axe de mouvement de rotation, à la figure 1.9, et la matrice attachée à cette transformation (la relation 1.7).

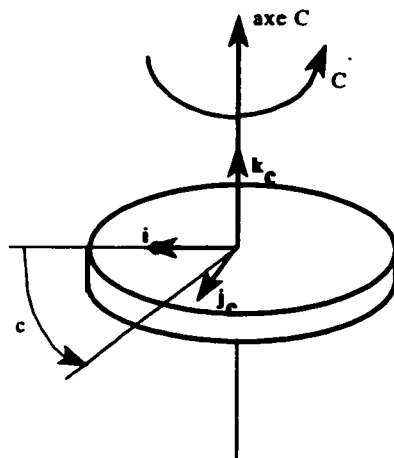


Figure 1.9 Grand déplacement c selon l'axe de mouvement C

$$D_3(c) = \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [1.7]$$

1.3.7 Équation de fermeture de la chaîne cinématique

La chaîne cinématique représente la succession des articulations dans la structure de la machine-outil. On va noter w le repère de l'élément géométrique de la pièce à usiner, le repère de l'outil t et le repère global de la machine R_f , qui est attaché au bâti.

En partant de R_f vers la pièce sur la branche cinématique de gauche de la figure 1.10, on va noter successivement, avec g_1 à g_m , tous les m solides en mouvement. De la même façon, en partant de R_f vers l'outil et en suivant la branche cinématique droite, on va noter les n solides en mouvement avec d_1 à d_n . À chaque solide on attache un repère qui est situé par convention (Rapport de la Commission Européenne, 1992) au milieu géométrique de la course en déplacement articulaire du joint et qui est orienté en général parallèlement au repère global. La chaîne est fermée quand l'outil touche l'élément géométrique, donc pendant que l'outil effectue la trajectoire de coupe. La chaîne est ouverte quand l'outil effectue sa trajectoire de localisation.

Le produit des matrices de passage homogènes élémentaires d'une chaîne fermée permet le calcul de la matrice de passage homogène du repère t lié à l'outil vers le repère w lié à l'élément géométrique de la pièce, D_{wt} . L'équation de fermeture de la chaîne doit respecter

l'ordre des éléments de la chaîne.

Dans le cas général, on aura :

$$\begin{aligned} F_{Fw} &= D_{F,g1} F_{F,g1} D_{g1,g2} F_{g1,g2} \dots D_{gm-1,gm} F_{gm-1,gm} D_w D_{wt} \\ F_{Ft} &= D_{F,d1} F_{F,d1} D_{d1,d2} F_{d1,d2} \dots D_{dn-1,dn} F_{dn-1,dn} D_t \end{aligned} \quad [1.8]$$

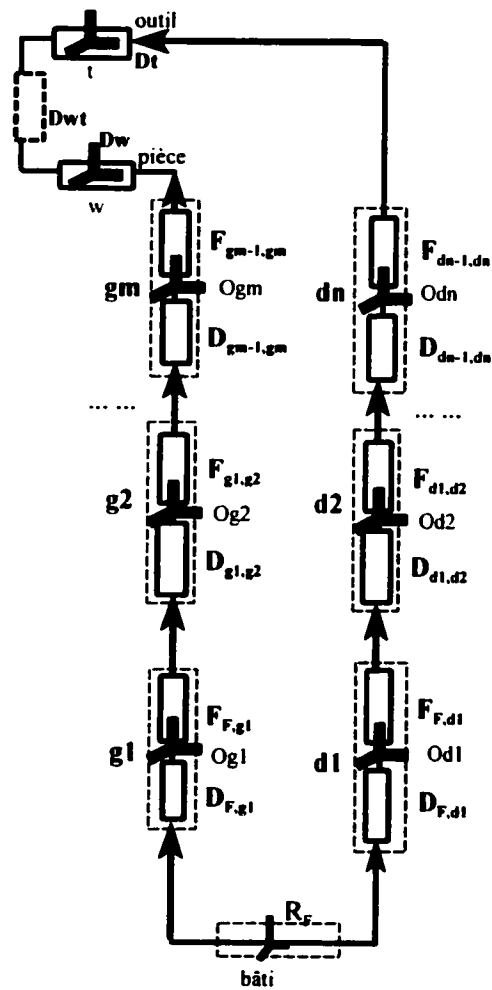


Figure 1.10 Schéma cinématique générale d'une machine-outil

Pour la configuration présente dans l'exemple de la Matsuura, les matrices de transformation des deux branches de la chaîne cinématique, en partant du bâti vers la pièce pour la branche gauche, et du bâti vers l'outil pour la branche droite, sont les suivantes :

$$\mathbf{F}_{Fw,ex} = \mathbf{D}(y) \mathbf{F}(y) \mathbf{D}(x) \mathbf{F}(x) \mathbf{D}(a) \mathbf{F}(a) \mathbf{D}(c) \mathbf{F}(c) \mathbf{D}_{w,ex} \mathbf{D}_{wt,ex} \quad [1.9]$$

$$\mathbf{F}_{ft,ex} = \mathbf{D}(z) \mathbf{F}(z) \mathbf{D}_{t,ex} \quad [1.10]$$

L'indice "ex" signifie que les termes respectifs correspondent à l'exemple de la machine Matsuura.

La matrice $\mathbf{D}_{wt}$ est la matrice des erreurs résultantes, qui sont l'effet sur la pièce de tous les paramètres géométriques manifestés dans les articulations de la machine-outil, exprimée dans le repère de l'élément géométrique à usiner ou inspecter.

L'équation de fermeture de la chaîne est la suivante :

$$\mathbf{F}_{Ft}^{-1} \mathbf{F}_{Fw} = \mathbf{I} \quad [1.11]$$

La matrice $\mathbf{I}$, dans la relation [1.11], est la matrice identité. On veut déduire les composants de la matrice $\mathbf{D}_{wt}$ en fonction des positions et des paramètres géométriques d'écart des articulations qui forment la chaîne cinématique. Dans l'exemple de la Matsuura, on applique l'équation [1.11] aux équations [1.9] et [1.10]. On obtient l'expression [1.12]:

$$\mathbf{D}_{wt,ex} = \mathbf{D}_{w,ex}^{-1} \mathbf{F}(c)^{-1} \mathbf{D}(c)^{-1} \mathbf{F}(a)^{-1} \mathbf{D}(a)^{-1} \mathbf{F}(x)^{-1} \mathbf{D}(x)^{-1} \mathbf{F}(y)^{-1} \mathbf{D}(y)^{-1} \mathbf{D}(z) \mathbf{F}(z) \mathbf{D}_{t,ex} \quad [1.12]$$

En multipliant les matrices de transformation conformément à la relation [1.12] on détermine les termes de la matrice générale de positionnement du bout de l'outil par rapport à l'élément géométrique de la pièce.

Le développement des calculs de la matrice $D_{wt,ex}$ nous permet de déterminer l'expression de l'erreur résultante ε_T de l'outil par rapport à la pièce dans le repère de l'élément géométrique appartenant à la pièce, en fonction de tous les paramètres géométriques d'écarts ε_k .

On représente par ε_k le torseur des paramètres géométriques PGÉV de l'articulation k ayant les trois premiers termes égaux aux PGÉV linéaires et les trois derniers égaux aux PGÉV angulaires.

$$\varepsilon_k = [e_x \ e_y \ e_z \ \gamma_x \ \gamma_y \ \gamma_z]^T_k \quad [1.13]$$

En effectuant les calculs, on obtient la relation générale suivante :

$$\varepsilon_T = - \sum_{k=1}^m (C_{pk}^w \varepsilon_k) + \sum_{k=1}^n (C_{dk}^w \varepsilon_k) \quad [1.14]$$

En particulierisant pour l'exemple, on obtient :

$$\varepsilon_{T,ex} = - C_{cx}^w \varepsilon_c - C_{ax}^w \varepsilon_a - C_{yx}^w \varepsilon_y - C_{zx}^w \varepsilon_z + C_{zx}^w \varepsilon_z \quad [1.15]$$

La matrice C_k^w , de la branche gauche ou droite et qui est nommée parfois la matrice de transport ou la "F-matrice" (Schellekens, et al., 1993), représente l'effet du torseur ε_k associé à l'articulation k dans le repère de l'élément géométrique de la pièce w . Cette matrice, de dimension 6×6 , a la forme suivante:

$$C^w_k = \begin{bmatrix} R_{k,w} & P^w_{k,w} \times R_{k,w} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [1.16]$$

La matrice $R_{k,w}$ représente la matrice de rotation 3 x 3 qui ré-exprime un vecteur de son expression dans le repère k à son expression dans w. La matrice $P^w_{k,w}$, de dimension 3 x 1, représente le vecteur qui pointe de l'origine du repère w à l'origine du repère k exprimé dans le repère w de l'élément géométrique de la pièce. Le produit $(P^w_{k,w} \times R_{k,w})$ est une matrice 3 x 3 qui a les colonnes égales au résultat du produit vectoriel entre la matrice colonne $P^w_{k,w}$ et les colonnes correspondantes de la matrice de rotation $R_{k,w}$. Les matrices $R_{k,w}$ et $P^w_{k,w}$ incluent les paramètres géométriques invariants nominaux.

1.3.8 Matrice jacobienne

On peut maintenant créer la matrice jacobienne à partir de la relation [1.14]. Les matrices de transport se multiplient à la chaîne pour exprimer la suite d'effets cumulatifs, et cette propriété les rend aptes à former les matrices jacobienues des structures en chaîne ouverte sans effectuer de dérivées (tiré de G. Cloutier, Matrices de transport, 1999). Les paramètres géométriques d'écart développés dans les axes de mouvement peuvent être écrits sous la forme d'une seule matrice-colonne q de dimension $6 \times (m+n)$, qui est la totalité des paramètres géométriques d'écart d'une machine-outil:

$$q = [\varepsilon_{gm}^T \quad \varepsilon_{gm-1}^T \quad \dots \quad \varepsilon_{g1}^T \quad \varepsilon_{d1}^T \quad \dots \quad \varepsilon_{dn}^T]^T \quad [1.17]$$

La relation générale est de la forme:

$$\varepsilon_T = J q \quad [1.18]$$

La matrice $\mathbf{J}$ représente la concaténation des matrices $\mathbf{C}_k^w$ dans l'ordre correspondant à la succession des axes dans l'expression de $\mathbf{q}$. Pour l'exemple de la machine Matsuura qu'on a suivi jusqu'ici, $\mathbf{q}$ devient:

$$\mathbf{q}_{ex} = [\varepsilon_c^T \quad \varepsilon_s^T \quad \varepsilon_x^T \quad \varepsilon_y^T \quad \varepsilon_z^T]^T \quad [1.19]$$

La matrice $\mathbf{J}$ spécifique à cette machine est la suivante:

$$\mathbf{J}_{ex} = [-\mathbf{C}_c^w, -\mathbf{C}_s^w, -\mathbf{C}_x^w, -\mathbf{C}_y^w, \mathbf{C}_z^w] \quad [1.20]$$

et donc

$$\mathbf{\varepsilon}_{T,ex} = \mathbf{J}_{ex} \mathbf{q}_{ex} \quad [1.21]$$

$\begin{matrix} <6 \times 1> & & & & & & \\ <6 \times 30> & & & & & & \\ <30 \times 1> & & & & & & \end{matrix}$

La matrice jacobienne $\mathbf{J}$ peut être générée chaque fois qu'on connaît la configuration, les distances et les orientations des articulations de la machine-outil, ainsi que les dimensions de l'outil et du dispositif de fixation de la pièce. La construction de cette matrice ne dépend pas de la valeur des paramètres géométriques d'écart. L'avantage d'utiliser la relation [1.19], plutôt que celle dans la forme détaillée [1.12], est qu'elle nous fournit un système d'équations linéaires facile à manipuler par méthodes matricielles.

Remarque: La génération de la matrice jacobienne $\mathbf{J}$ peut être faite en gardant dans sa composition l'ordre standard de succession des axes de mouvement, c'est-à-dire:

$$\mathbf{J}_{ex} = [-\mathbf{C}_y^w, -\mathbf{C}_x^w, \mathbf{C}_z^w, -\mathbf{C}_s^w, -\mathbf{C}_c^w] \quad [1.22]$$

Dans la relation ci-dessus, la concaténation des matrices carrées $\mathbf{C}_k^w$ est faite en commençant

avec celle qui contient de l'information de l'axe de mouvement X, et en concaténant dans l'ordre, de gauche à droite, la matrice correspondante à l'axe de mouvement Y, ensuite Z, A, B et C. La même ordre standard de succession des axes de mouvement doit être gardée quant à l'écriture de la matrice des paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire:

$$\mathbf{q}_{ex} = [\varepsilon_x^T \quad \varepsilon_y^T \quad \varepsilon_z^T \quad \varepsilon_a^T \quad \varepsilon_c^T]^T \quad [1.23]$$

Ce changement de structure de $\mathbf{J}$ et de $\mathbf{q}$ ne change en rien les résultats suite à leur manipulation mathématique, mais facilite la génération des matrices de sensibilité aux niveaux 2 et 3 du modèle (voir le chapitre 2) ainsi que la généralisation du modèle.

CHAPITRE 2

LE MODÈLE DE DIAGNOSTIC ET DE SUIVI DE L'ÉTAT GÉOMÉTRIQUE DES MACHINES-OUTILS

2.1 Introduction

L'objectif général de cette recherche est de développer et valider une méthode qui permet de diagnostiquer le comportement géométrique d'une machine-outil et ce à trois niveaux spécifiques:

- Niveau 1 : détecter les changements dans l'état de la machine en termes des erreurs résultantes dans l'espace cartésien et déterminer les articulations de la machine ayant un problème;
- Niveau 2 : localiser l'origine d'un éventuel problème d'ordre géométrique, en déterminant les paramètres géométriques d'écart qui sont la source des erreurs résultantes;
- Niveau 3 : déterminer la faisabilité des pièces.

Le projet de recherche ne vise pas le remplacement des moyens plus sophistiqués de vérification de performance ou d'étalonnage, comme par exemple des barres à bille ou des interféromètres lasers. La méthode permet un diagnostic rapide, pour faciliter et cibler les actions spécifiques qui sont à prendre ultérieurement pour identifier l'état de la machine-outil, corriger les problèmes survenus et porter un jugement sur la dispersion des éléments géométriques des pièces.

Les contraintes d'ordre pratique et économique qu'on a imposées étaient une durée de séance de tests qui ne doit pas dépasser une trentaine de minute, et que le moyen d'acquisition de données utilisé soit le palpeur électronique monté sur la machine-outil même (touch trigger probe). De plus, pour les machines-outils où la structure le permet, une plus

grande facilité d'utilisation résulte du palpé direct sur des parties de la machine, réduisant ainsi l'utilisation d'artefacts spéciaux. Ces contraintes favorisent la productivité, ce qui rend l'approche plus compétitive et attrayante par rapport aux techniques de diagnostic déjà utilisées en pratique.

Le schéma du modèle est représenté à la figure 2.1. Les données d'entrée du modèle sont la stratégie de palpé, les données actuelles de palpé ω_{act} acquises suite aux tests effectués conformément à la stratégie, la configuration de la machine-outil, des données de palpé ω_{ref} ou ω_{mmc} , acquises antérieurement pendant une séance considérée la référence, ainsi que les exigences et contraintes du processus technologique d'usinage de la pièce.

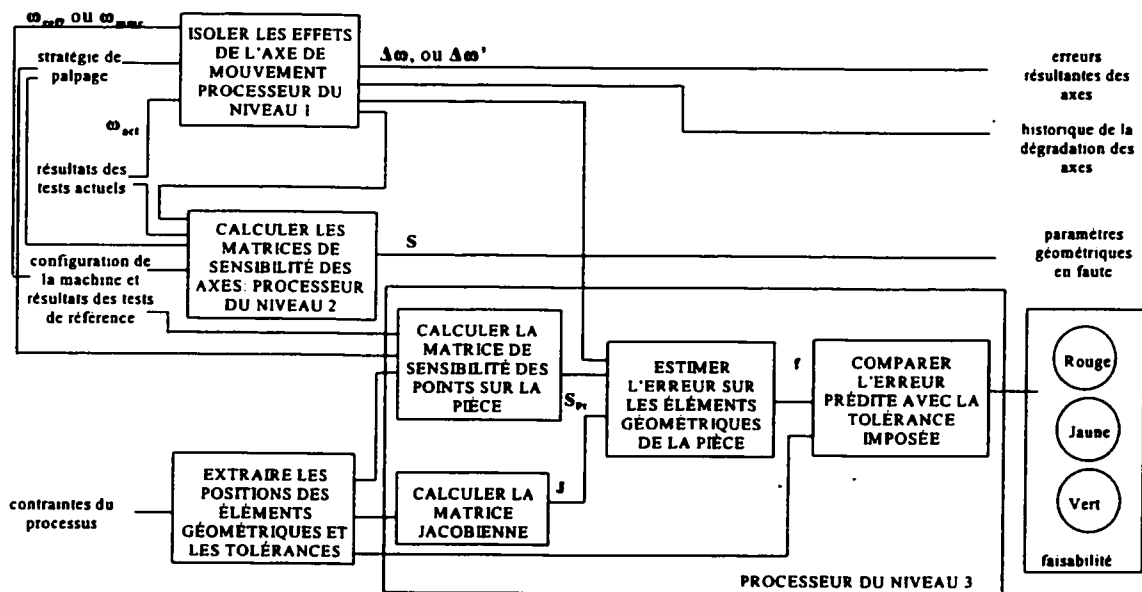


Figure 2.1 Diagramme du modèle de diagnostic et de suivi de l'état géométrique d'une machine-outil

Les trois niveaux du modèle sont montrés dans les boîtes présentes sur le schéma. L'action principale qui a lieu au niveau 1 est d'isoler les effets produits par l'axe de mouvement. La

sortie de ce niveau sont les valeurs $\Delta\omega$ (ou $\Delta\omega'$ quand la référence est constituée par les mesures sur la machine à mesurer tridimensionnelle), qui sont par la suite présentées sous la forme de graphiques des erreurs résultantes en fonction de la position de l'axe de mouvement, et d'un historique qui cumule toutes les variations passées depuis la séance de référence.

Le niveau 2 consiste à calculer les matrices de sensibilité de tous les axes de mouvement de la machine, S . La matrice de sensibilité d'un seul axe de mouvement est formée en utilisant les matrices individuelles de sensibilité de chacun des tests. À la sortie de ce niveau on trouve les paramètres géométriques d'écart qui ont pu varier et qui sont la cause des erreurs résultantes observées.

Le niveau 3 est constitué par une succession de plusieurs actions. La première action est de construire la matrice de sensibilité S des points de l'espace de travail, par la génération des points-images situés dans les tests et correspondant aux points de la pièce, et l'interpolation des valeurs $\Delta\omega$ pour ces points-images. Une autre action est le calcul de la matrice jacobienne des points de la pièce, suivie par l'estimation des variations des erreurs résultantes dans ces points. Finalement, la dernière action à prendre est l'analyse de la faisabilité des éléments géométriques et de la pièce en général et ce à l'intérieur des tolérances prescrites.

Le code informatique et les algorithmes de développement du modèle et du simulateur, ainsi que le code de l'interface de diagnostic et les validations permettent l'utilisation d'une librairie en code source Matlab (Guy Cloutier et Richard Gourdeau). Ces routines permettent la construction de transformations homogènes et de matrices de transport utilisées pour la génération des Jacobiens. La cinématique au coeur du générateur du modèle et du simulateur n'est pas linéarisée. Nous avons utilisé les coordonnées exactes des points dans l'espace, sans approximer les produits des PGÉV. Le modèle ainsi que le simulateur contiennent l'inverseur numérique de coordonnées.

2.2 Diagnostic et suivi de l'état géométrique au niveau des axes de mouvement d'une machine-outil : niveau 1

Le premier niveau du modèle est celui de l'analyse au niveau des axes de mouvement de la machine-outil. Le premier niveau de réponse du modèle est l'évolution, d'une séance de palpation à l'autre ou d'une séance de palpation par rapport à une séance prise comme référence, de l'erreur résultante de chaque axe de mouvement de la machine-outil. Par exemple, pour l'axe de mouvement X, on va chercher l'évolution de la rectitude résultante de cet axe dans la direction Y, c'est-à-dire l'erreur de forme dans le plan XY, l'évolution de la rectitude résultante de l'axe de mouvement X dans la direction Z, et l'erreur résultante linéaire d'échelle de l'axe de mouvement X. Pour un axe de rotation comme l'axe de mouvement C par exemple, on va chercher les évolutions de l'erreur résultante radiale dans la direction X et de celle dans la direction Y, ainsi que l'évolution de l'erreur résultante axiale orientée dans la direction Z.

2.2.1 Stratégie de palpation

La tâche de déterminer une réponse spécifique pour chacun des axes de mouvement est de beaucoup facilitée par l'utilisation d'une stratégie de palpation formée de tests qui s'adressent à un seul axe de mouvement de la machine-outil à la fois. La stratégie de palpation est conçue en considérant les objectifs et les contraintes du modèle théorique, ainsi que les contraintes spécifiques à la machine.

2.2.1.1 Objectifs du modèle théorique quant à la conception de la stratégie de palpation

-La stratégie est une succession de tests différents et bien définis qui consistent dans le palpation d'éléments géométriques prédéterminés.

-Pendant chaque test de palpation et dans la mesure du possible (si la forme de l'artefact choisi, l'espace de travail et les mouvements sans collision de la machine ou d'autres considérations pratiques le permettent) un seul axe de mouvement de la machine effectue le grand déplacement, au maximum deux axes en même temps.

2.2.1.2 Contraintes du modèle théorique quant à la conception de la stratégie de palpation

-Le modèle théorique exige que la succession des tests de palpation reste la même d'une séance de diagnostic à l'autre pour que l'état thermique due à l'échauffement progressif de la machine pendant le déroulement du test soit approximativement la même afin de minimiser son influence.

-Le sens de parcours d'un axe de mouvement doit être le même d'une séance de palpation à l'autre, pour éviter que l'hystérésis du mouvement de l'axe n'ait d'effet sur les mesures.

-L'erreur d'alignement du repère de l'artefact avec l'articulation visée de la machine-outil ne doit pas dépasser une valeur équivalente à l'ordre de grandeur des erreurs recherchées à la sortie du modèle, ceci permettant son filtrage des résultats de palpation.

2.2.1.3 Contraintes spécifiques

Ces contraintes sont celles qui sont imposées par l'environnement de travail de la machine-outil qu'on veut diagnostiquer. Par exemple, pour un projet de diagnostic rapide développé pour les usines Pratt et Whitney spécifiquement sur le centre d'usinage Omnimill 60, les contraintes ont été :

-L'artefact soit préférentiellement monté d'une façon permanente sur la machine.

-Le temps de déroulement de l'ensemble des tests ne doit pas dépasser 30 minutes.

-L'artefact doit être accessible quand la pièce à usiner est montée sur la palette.

Pour un projet similaire développé pour le centre d'usinage Mitsui Seiki appartenant toujours aux usines Pratt et Whitney, seule la contrainte du temps de déroulement des tests a été maintenue.

2.2.1.4 Contenu de la stratégie de palpation

La stratégie est une succession de tests. Le tableau 2.1 montre un exemple de test de palpation pour la machine Omnimill 60. (La configuration de la machine Omnimill 60 est représentée à l'annexe B). Les tests contiennent les coordonnées articulaires aux points de touche. Ces points représentent les cibles à toucher par le palpeur. La variable correspondante est une matrice-colonne à six coordonnées articulaires nommé dans l'exemple θ .

À chaque test est associée une variable, nommée λ_{axe} , qui est une matrice-colonne à six coordonnées articulaires et qui spécifie l'articulation visée par le test. L'axe de mouvement de la machine testé par palpation, qui est, en même temps, l'axe (ou des axes) de mouvement, est marquée par l'élément "1" dans la matrice-colonne λ_{axe} . Les autres axes sont marquées par "0".

Il faut définir aussi la variable λ_{touche} , qui nous informe de la direction de touche du palpeur et qui est en même temps la normale à la surface de palpation sur l'artefact. En général, la normale à la surface de palpation correspond à une des trois directions X, Y ou Z du repère machine.

Idéalement, chaque axe de mouvement de la machine est testé trois fois, une fois pour chacune des directions de touche. Par exemple, on aura un test de l'axe de mouvement X avec palpation dans la direction X, un autre test de l'axe de mouvement X avec palpation dans la direction Y et un dernier test avec palpation dans la direction Z (voir la figure 2.2). Pour

les axes de rotation de la machine, par exemple pour l'axe de mouvement C, on aura trois tests avec palpation dans les directions X, Y et Z. Appelons ces données de palpation ω (voir la figure 2.3). Pour chaque articulation, les trois tests doivent avoir des points de palpation correspondants environ aux mêmes coordonnées articulaires. Ce voisinage simplifiera l'analyse des résultats.

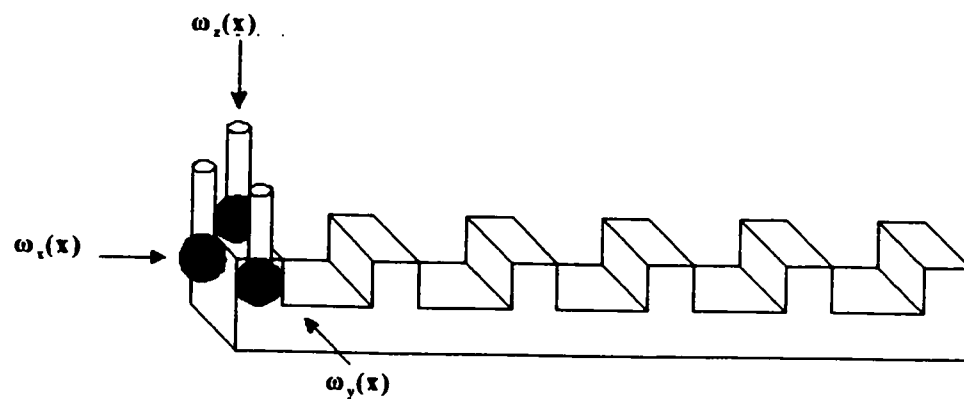


Figure 2.2 Artefact linéaire à marches montée parallèlement à l'axe cartésien X

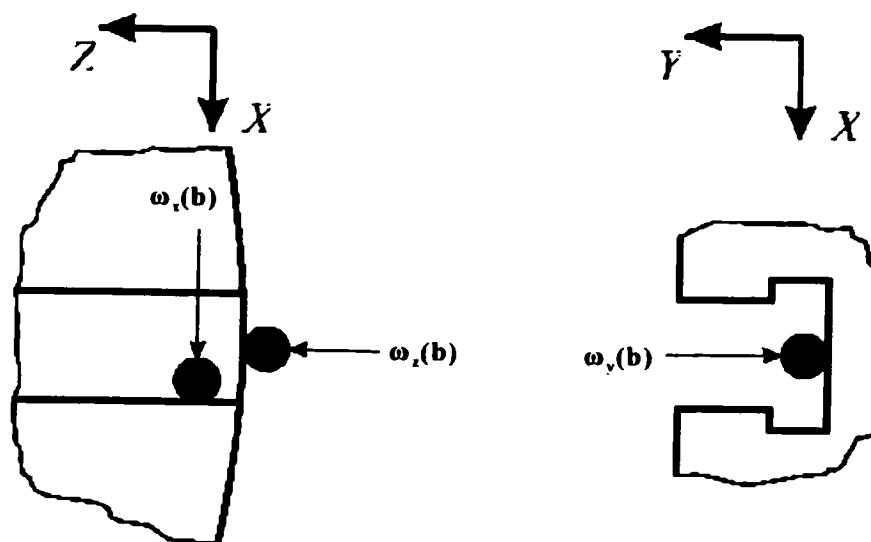


Figure 2.3 Exemple de stratégie de palpation pour l'axe de mouvement B

Pour tester les axes de mouvement linéaires X, Y et Z de la machine, les intervalles de touche sont des distances selon les axes concernés par chaque test, quant aux axes de mouvement de rotation A, B, et C, les intervalles de touches sont des angles selon les axes respectifs. Le modèle analytique requiert un minimum de trois points de touche au total pour les axes de mouvement linéaires car l'alignement de l'artefact en nécessite au moins deux, et un minimum de quatre points pour les axes de mouvement de rotation.

Tableau 2.1 Test de palpéage pour l'axe de mouvement X dans la direction Z, Omnimill 60

θ (en pouces)						λ_{axe}						λ_{touche}			Dt_{appr}	Dt_{max}
X	Y	Z	A	B	C	X	Y	Z	A	B	C	X	Y	Z		
-12.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050
-8.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050
-4.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050
0.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050
4.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050
8.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050
16.0	-0.5	16.0	300.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0.100	0.050

La stratégie contient aussi deux variables nécessaires pour le bon fonctionnement du palpeur pendant l'exécution de son trajet. Une des variables est la distance d'approche du palpeur, nommée Dt_{appr} , qui représente une distance sécuritaire sur laquelle le palpeur se déplace à basse vitesse jusqu'au point nominal de contact. La deuxième variable est la distance de dépassement maximal, nommée Dt_{max} dans le tableau 2.1 et qui représente l'intervalle dans lequel le palpeur va chercher la cible. S'il ne réussit pas à toucher la surface dans cet intervalle, une alarme est enclenchée et l'opérateur a le choix de continuer ou d'arrêter le test.

2.2.2 Artefact de palp

L'artefact utilisé pour les tests doit répondre aux objectifs de la stratégie précisée auparavant. Il doit contenir des éléments géométriques tels qu'ils peuvent être alignés selon les axes de mouvement de la machine-outil, qu'ils soient facilement accessibles par le palpeur et qu'ils contiennent des surfaces valides de palp : c'est-à-dire, les normales à ces surfaces sont des trajets faisables d'approche par le palpeur.

Les surfaces de touche de l'artefact doivent être choisies tel que les paramètres géométriques stimulés soient aussi indépendants que possible les uns des autres. Le choix de la forme de l'artefact peut permettre d'isoler les PGÉV spécifiques à chaque axe de mouvement et, en plus, de découpler partiellement les six PGÉV de chaque axe en palpant indépendamment selon les trois directions cartésiennes.

Si l'artefact n'est pas permanent sur la machine, chaque repositionnement aura un effet sur les mesures. Le modèle pourra annuler l'effet de l'erreur d'alignement de type biais et parallélisme (erreur d'alignement linéaire) pour un axe de déplacement linéaire. Le même type d'erreur dans le cas du test d'un axe rotoïde demande l'identification des paramètres d'alignement (excentricité etc) par une méthode de moindres carrés visant à éliminer la contribution de cette alignement dans les résultats de palp (développement informatique fourni par René Mayer et Guy Cloutier).

Les surfaces de palp doivent être libres de contraintes mécaniques résiduelles de surfaces ou internes pour qu'elles gardent leur forme, position et dimensions inchangées dans le temps.

Exemples d'artefacts utilisés

L'artefact choisi pour la Omnimill 60 et qui répond aux exigences particulières qui ont été mentionnées antérieurement a été la palette même de la machine-outil, ainsi qu'un bloc d'étalonnage du palpeur, qui devait être monté dans l'espace de travail pendant les mesures. Le plan de la palette appartenant à cette machine est présenté dans la figure 2.4. Ce choix a été appuyé par l'orientation de ses rainures, toutes parallèles, ainsi que par leur nombre et grandeur, qui permettaient de chercher plusieurs points en suivant une seule direction. La palette permet d'orienter les rainures suivant les deux axes de mouvement horizontaux. Même si le dispositif de fixation de la pièce était en place sur la palette, il restait toujours des rainures disponibles pour le palpéage.

L'artefact choisi pour la Mitsui Seiki est un dispositif spécialement conçu dans le but de diagnostiquer l'état géométrique de la machine-outil. Il est présenté à la figure 2.5. Pour effectuer les tests, on le fixe sur la palette pour toute la durée du palpéage. La configuration de la machine Mitsui Seiki est représentée à l'annexe D. Cet artefact consiste en une calibre étagée (step gauges) orientée selon l'axe de mouvement Y vertical et l'axe horizontal de la machine et des couronnes à marches (step circular gauge) pour tester les axes de mouvement de rotation B et C.

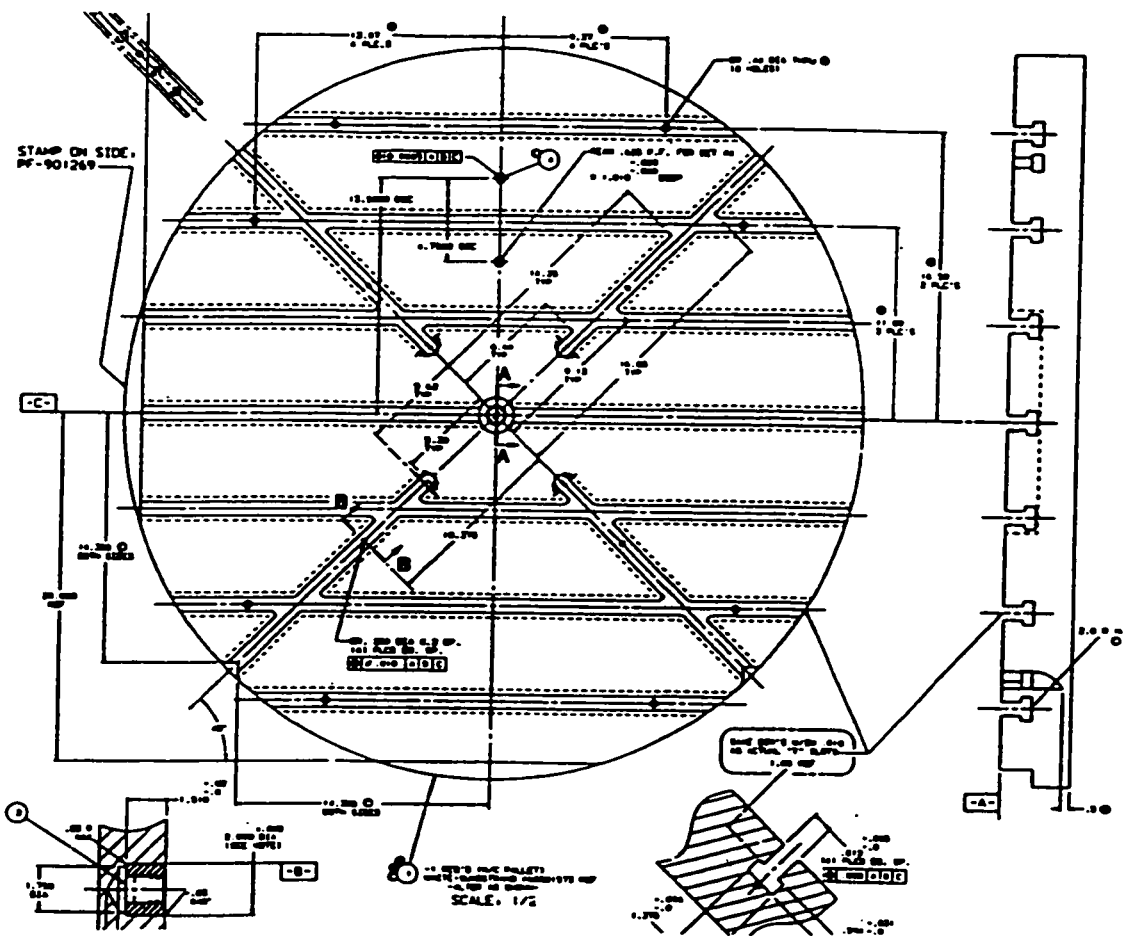


Figure 2.4 La palette utilisée pour les mesures sur la machine Omnimill 60

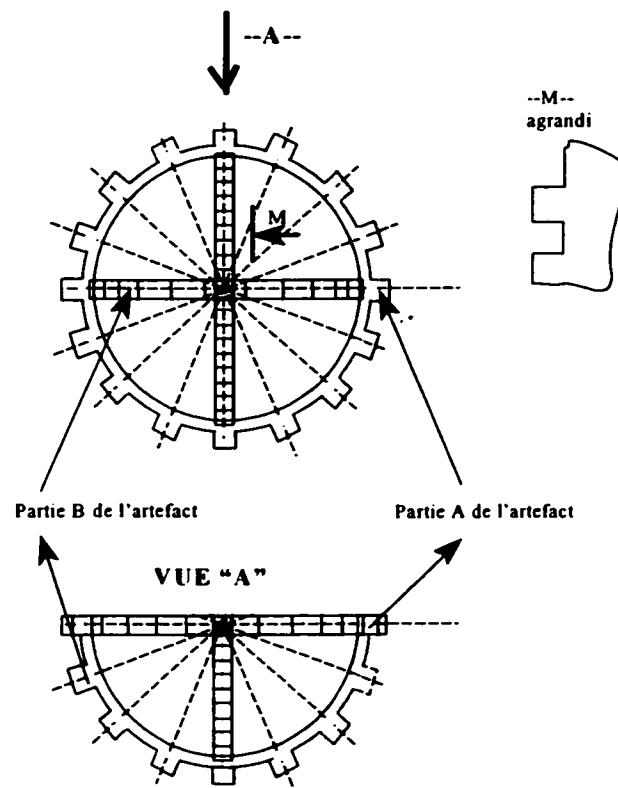


Figure 2.5 Schéma de l'artefact réalisé pour les mesures sur la machine Mitsui Seiki

Il est composé de deux parties qui sont démontables, pour faciliter l'accès du palpeur aux points de touche. Un assemblage isostatique est prévu pour ne pas induire des déformations élastiques. L'axe de mouvement X horizontal est testé en tournant de 90° la partie A de l'artefact.

Un concept similaire est utilisé pour tester la machine-outil Matsuura appartenant à l'École Polytechnique. Les artefacts utilisés dans ce cas sont une barre à marches et une couronne à marches, montés séparément sur la palette pour mesurer un axe de mouvement à la fois (voir le chapitre 3).

2.2.3 Données de palpation ω

Les coordonnées articulaires des axes de mouvement de la machine aux points de touche selon la direction d'approche sont regroupées dans une matrice-colonne et sont appelées ω , avec en indice ω_{act} pour les tests courants et ω_{ref} ou ω_{mmt} pour les tests de référence. Le tableau 2.2 contient un exemple de valeurs ω obtenus par simulation du test montré au tableau 2.1.

Tableau 2.2 Exemple des valeurs retournées par le palpeur, Omnimill 60

No.point	Z nominal	ω
1	16.000	16.0023
2	16.000	16.0035
3	16.000	16.0041
4	16.000	16.0012
5	16.000	16.0003
6	16.000	15.9997
7	16.000	15.9999

2.2.4 Processeur des données de palpation

L'erreur de positionnement relatif de chaque point cible par rapport à une mesure antérieure prise comme référence ω_{ref} , est la différence entre la valeur de la position courante lue par le palpeur et la valeur de référence. On appelle cette variable ω_{var} (voir la figure 2.6).

$$\omega_{var} = \omega_{act} - \omega_{ref} \quad [2.1]$$

La variable ω_{var} représente l'effet combiné des PGÉV de tous les axes de mouvement de la machine-outil et ${}_m\omega_{var}$ est la moyenne de ω_{var} . Cependant, on veut suivre l'état géométrique,

ou l'effet des PGÉV, d'un seul axe de mouvement.

$$\omega_{var,\varphi,d} = \omega_{act,\varphi,d} - \omega_{ref,\varphi,d} \quad [2.2]$$

L'indice ϕ de $\omega_{var,\varphi,d}$ est la direction de touche de la matrice-colonne λ_{touche} , d est l'axe de mouvement de la matrice-colonne λ_{axe} . La matrice ω_{var} est la concaténation verticale de ses matrices $\omega_{var,\varphi}$ de mesure pour chaque test. Cette convention de notation sera gardée dans toutes les sections qui suivent.

Variation de l'erreur résultante d'échelle $\omega_{var,\varphi,d}$ de Mitsui Seiki, $\varphi = 1$, $d=1$

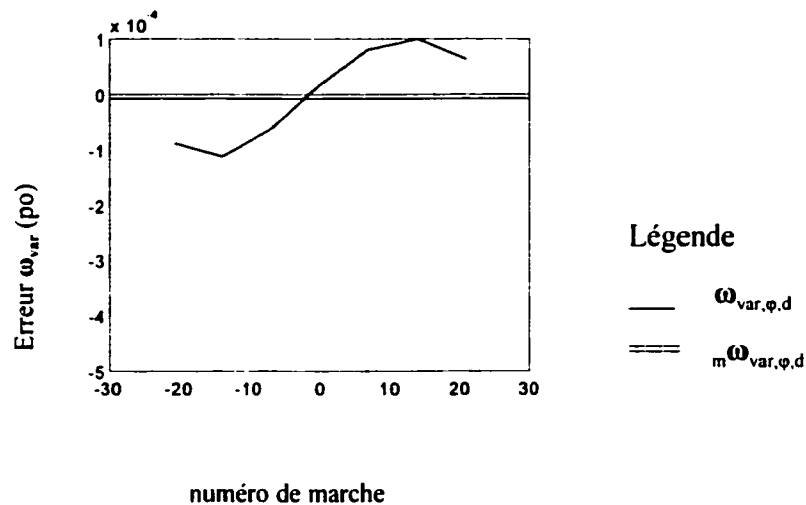


Figure 2.6 Exemple de calcul et graphique de la variable ω_{var}

2.2.4.1 Erreur résultante d'échelle de l'axe de mouvement linéaire et erreur résultante axiale de l'axe de mouvement de rotation

Les tests de la stratégie de palpé qui identifient les erreurs résultantes d'échelle des axes de mouvement linéaires X, Y et Z sont les tests pour lesquels l'axe de mouvement et la direction d'approche du palpeur sont les mêmes. L'effet des erreurs résultantes axiales des

axes de mouvement de rotation peut être ressorti des tests des A, B et C. pour lesquels la direction d'approche est respectivement selon X, Y et Z.

À la figure 2.6 on remarque la présence d'un biais de la courbe par rapport à l'abscisse, qui s'explique physiquement comme l'effet constant en fonction de la position selon l'axe en mouvement des paramètres géométriques d'écart des autres axes de la machine qui ne sont pas en mouvement, ou de l'axe lui-même par rapport à son zéro ou encore causé par la mise en référentiel de l'artefact. Donc, pour garder seulement l'effet de la variation des PGÉV spécifiques à l'axe de mouvement, il faut effectuer la différence entre la courbe $_{ls}\omega_{var}$ (la droite des moindres carrées) et sa moyenne $_m\omega_{var}$.

La droite des moindres carrés de cette courbe $_{ls}\omega_{var}$ nous renseigne sur la pente de la courbe par rapport à l'abscisse. Cette pente est l'effet du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement incluant possiblement l'effet d'alignement entre l'artefact et l'axe machine. Cependant cet effet est de type cosinus et donc négligeable pour de petites erreurs angulaires d'alignement. Le calcul de l'erreur résultante d'échelle $\Delta\omega_{\varphi,d}$ de l'axe de mouvement est:

$$\Delta\omega_{\varphi,d} = \omega_{var,\varphi,d} - _m\omega_{var,\varphi,d} \quad [2.3]$$

Dans le cas d'un mauvais alignement de l'artefact selon la normale à la surface d'appui (voir figure 2.7), son effet sur l'erreur résultante d'échelle est négligeable ($\approx r \theta^2 / 2$).

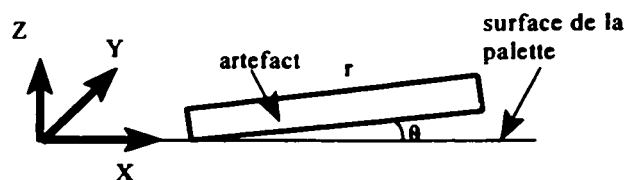


Figure 2.7 Mauvais alignement de l'artefact de mesure selon la normale à la surface d'appui.

2.2.4.2 Erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement linéaire et erreur résultante radiale de l'axe de mouvement de rotation

Pour le calcul des erreurs résultantes de rectitude des axes de mouvement linéaires X, Y et Z et des erreurs résultantes radiales quant aux axes de mouvement de rotation A, B et C, nous cherchons l'écart géométrique du mouvement de l'axe en fonction de la position articulaire. Cette fois on enlève le biais de la courbe et en plus la pente, parce que la pente ne contient plus l'effet d'une partie de l'erreur recherchée (figure 2.8) mais est plutôt causé par le mauvais alignement de l'artefact avec l'articulation visée ou par une erreur de perpendicularité.

Variation de $\omega_{var,\varphi,d}$ de ${}_{Is}\omega_{var,\varphi,d}$ et de l'erreur résultante de rectitude $\Delta\omega_{\varphi,d}$ de Mitsui Seiki

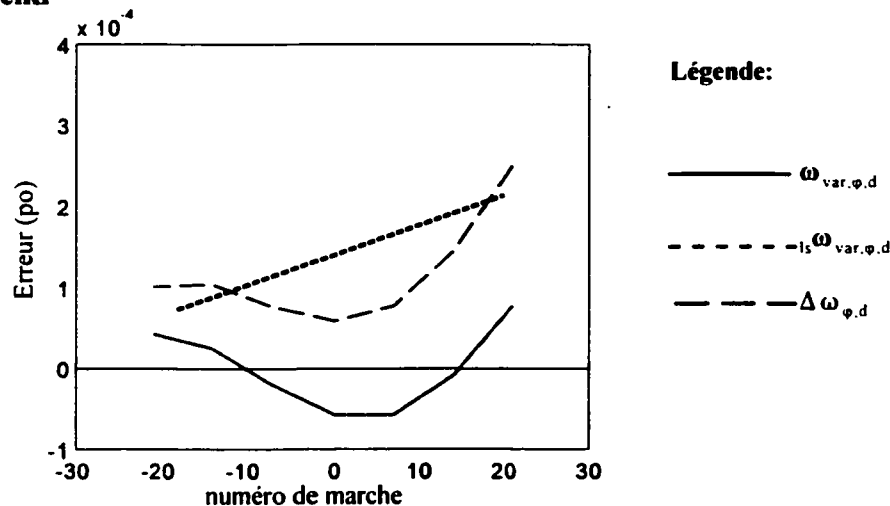


Figure 2.8 Exemple de calcul et graphique de la variable ${}_{Is}\omega_{var}$

Donc pour chacun de ces tests nous obtenons,

$$\Delta\omega_{\varphi,d} = \omega_{var,\varphi,d} - {}_{Is}\omega_{var,\varphi,d} \quad [2.4]$$

Dans la relation [2.4] ${}_{Is}\omega_{var,\varphi,d}$ est une matrice-colonne dont les éléments sont les valeurs de

la droite des moindres carrés (figure 2.8) aux positions de touche correspondant dans $\omega_{var,\varphi,d}$.

2.2.5 Erreur de perpendicularité

Les erreurs de perpendicularité sont des paramètres géométriques d'écart invariables en fonction de la coordonnée articulaire qu'on peut déterminer en partie dans des tests spécifiques. Les tests qu'on a développés jusqu'ici vont aider au calcul des erreurs de perpendicularité seulement entre certains axes de mouvement linéaires de la machine.

2.2.5.1 Test de l'ellipse

Le test des erreurs de perpendicularité consiste dans des mesures prises sur la circonférence d'un artefact nominalelement circulaire, ayant un rayon extérieur qui couvre en bonne partie l'espace de travail, et qui est monté sur la palette. L'artefact peut être tout aussi bien la palette elle-même. Les points de mesure sont des points tout autour de la palette ou de l'artefact circulaire, en déplaçant les axes de mouvement linéaires et en approche radiale.

En utilisant cette méthode on détermine l'erreur de perpendicularité entre les axes linéaires horizontaux, comme par exemple entre les axes de mouvement X et Z pour la machine Omnimill 60, ou entre les axes de mouvement X et Y pour la machine Mitsui Seiki.

2.2.5.2 Procédure de calcul

La procédure de calcul de cette erreur a été développée par J. Laflamme, R.Mayer et G.Cloutier, 1996. On veut déterminer la variation de l'erreur de perpendicularité entre deux axes de mouvement horizontaux, appelons-les X et Y, depuis la dernière séance des tests géométriques effectués sur la machine. Leur étude montre que la non-perpendicularité des

axes de mouvement résulte en une ovalisation apparente des mesures prises sur un artefact circulaire. L'analyse de l'ellipse qui en résulte permet d'estimer l'erreur de perpendicularité des articulations concernées. (voir figure 2.9)

L'équation du cercle centré au milieu des axes est :

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad [2.5]$$

Les coordonnées d'un point P, (x,y), exprimées par rapport aux nouvelles coordonnées (x',y') des axes X' et Y' non perpendiculaires sont :

$$\begin{aligned} x &= x' \cos(\alpha) + y' \sin(\beta) \\ y &= y' \cos(\beta) + x' \sin(\alpha) \end{aligned} \quad [2.6]$$

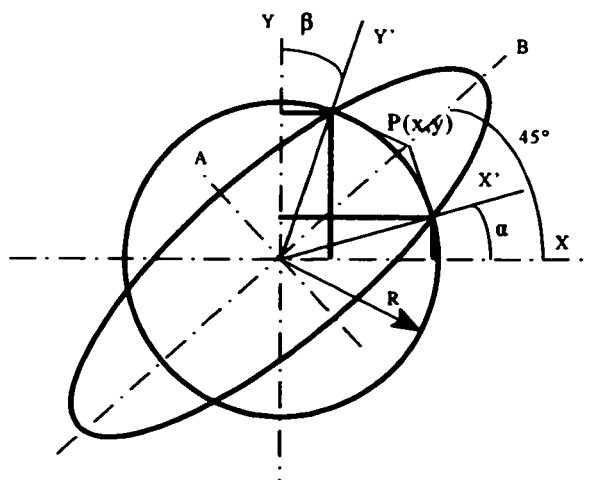


Figure 2.9 Représentation de l'ellipse obtenue quand les axes de mouvement X et Y ne sont plus perpendiculaires

En remplaçant dans l'équation du cercle, on obtient :

$$x'^2 + y'^2 + 2 x' y' \sin(\alpha + \beta) = R^2 \quad [2.7]$$

On réécrit cette relation sous sa forme canonique.

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/R^2 & \sin(\alpha+\beta)/R^2 \\ \sin(\alpha+\beta)/R^2 & 1/R^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = 1 \quad [2.8]$$

Pour trouver les axes A et B de l'ellipse, on calcule les valeurs propres μ et les vecteurs propres v de l'équation canonique. On obtient:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= (1 + \sin(\alpha+\beta)) / R^2 \\ \mu_2 &= (1 - \sin(\alpha+\beta)) / R^2 \\ v_1 &= [1 \ 1] \\ v_2 &= [-1 \ 1] \end{aligned} \quad [2.9]$$

Les valeurs des vecteurs propres montrent que l'ellipse est toujours orientée à 45°. On déduit les valeurs des semi-axes a et b comme étant :

$$\begin{aligned} a &= R / \sqrt{1+\sin(\alpha+\beta)} \\ b &= R / \sqrt{1-\sin(\alpha+\beta)} \end{aligned} \quad [2.10]$$

et, par conséquent, la valeur de l'erreur de perpendicularité, $\alpha+\beta$, est égale à :

$$\alpha+\beta \sim \sin(\alpha+\beta) = (b^2 - a^2)/(a^2 + b^2) \sim (b-a)/a \quad [2.11]$$

La variation de l'erreur de perpendicularité est la différence entre l'angle $\alpha+\beta$ calculé après le test et la valeur $\alpha_0+\beta_0$ trouvée antérieurement, dans un test pris comme référence.

$$\Delta(\alpha+\beta) = (\alpha+\beta) - (\alpha_o+\beta_o) \quad [2.12]$$

Pour ce cas particulier, la matrice homogène attachée à cette erreur de perpendicularité manifestée dans le plan horizontal est la suivante.

$$D_{2,x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta(\alpha+\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\Delta(\alpha+\beta) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.6 Validation numérique de la procédure utilisée pour le niveau 1 du modèle

Le but de la validation numérique a deux volets. Le premier volet est de déterminer si le processeur enlève au complet l'effet constant des paramètres géométriques d'écart qui n'appartiennent pas à l'axe de mouvement mesuré, en gardant à la sortie seulement l'effet cumulé des paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée de l'articulation concernée. Le deuxième volet est de tester le processeur quand il y a une erreur d'alignement de l'artefact de palpation sur la machine.

2.2.6.1 Vérification du fonctionnement du processeur de niveau 1

La procédure de validation numérique consiste dans la simulation d'une machine-outil dans le sens présenté au chapitre 1. On a considéré d'abord que tous les axes de mouvement de la machine-outil présentent des paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la

position de l'axe. Dans cette situation, la stratégie de palpage a été simulée en l'adaptant à chaque axe, similaire à la stratégie présentée antérieurement dans ce chapitre. L'exemple discuté ici est montré à la figure 2.10.

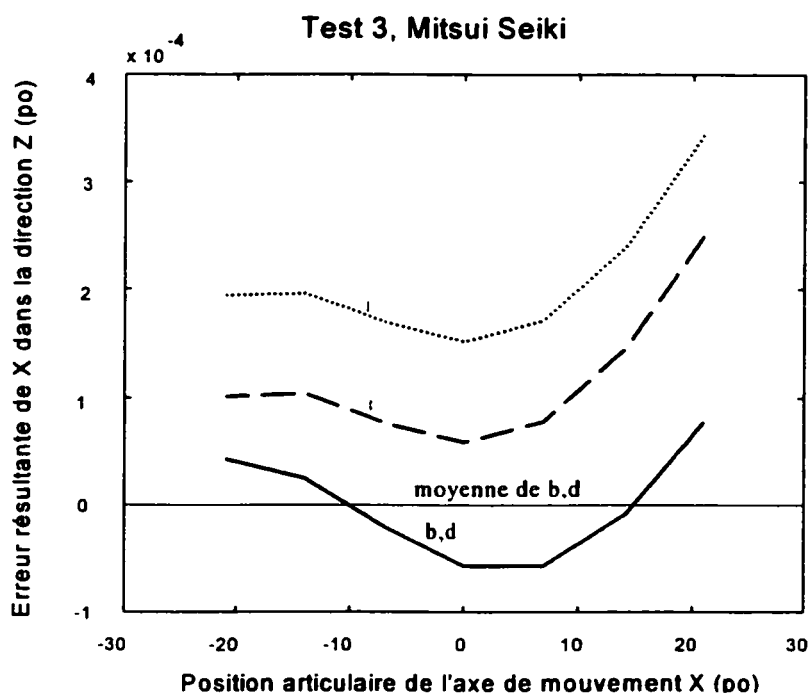


Figure 2.10 Validation numérique du niveau 1 du processeur, montrée pour le test 3

Le même graphique montre la courbe "a" des données de palpage en fonction de la position articulaire de l'axe de mouvement X, et la courbe "b" des mêmes données filtrées par le processeur de niveau 1. Cette deuxième courbe représente par conséquent cette partie des données de palpage qui varie en fonction de la position de l'axe de mouvement palpé, ayant enlevée la partie constante due aux effets des PGÉI et PGÉV des axes autres que celui en mouvement. Nous avons conçu le modèle théorique pour les PGÉV seulement. Par la suite, nous avons vérifié si le modèle réussit à enlever les PGÉI, et la vérification théorique montre que le modèle enlève les PGÉI ainsi que la partie constante de PGÉV.

Nous remarquons tout de suite que la courbe "b", comparée à la courbe "a", est descendue sur l'abscisse, donc le processeur réussit à enlever la constante et la pente manifestées dans tous les points de la courbe "a". On remarque aussi que la droite "moyenne" de la courbe "b", ici la droite des moindres carrés, coïncide avec l'abscisse.

Dans un deuxième temps nous avons considéré que seulement l'axe de mouvement mesuré présente des PGÉV et les quatre autres axes n'en ont pas. La même stratégie de palpation qu'avant a été simulée. Nous avons tracé sur le même graphique la courbe "c" des données de palpation en fonction de la position articulaire de l'axe de mouvement X, et la courbe "d" des mêmes données passées par le processeur. Ce simulateur de validation contient un inverseur de coordonnées.

On constate que les courbes "b" et "d" sont superposées. La différence est de l'ordre de 10^{-13} . La conclusion est que le processeur enlève au complet l'effet constant des paramètres géométriques d'écart sur les mesures réalisées sur un des axes de mouvement.

La validation numérique décrite a été réalisée pour tous les tests de palpation, donc pour tous les axes de mouvement dans les trois directions linéaires. Nous avons simulé le comportement géométrique des deux machines-outils réelles, la Omnimill 60 et la Mitsui Seiki. La totalité des graphiques se trouvent à l'annexe B.

2.2.6.2 Vérification du fonctionnement quand l'artefact est monté avec une erreur d'alignement

Le deuxième volet de la validation numérique était de tester le processeur en présence d'une erreur d'alignement de l'artefact sur la machine-outil.

Dans un premier temps nous avons simulé le comportement géométrique de la machine-outil Mitsui Seiki quand il y a des PGÉV dans tous les axes de mouvement. Nous avons simulé aussi la stratégie de palpation spécifique à la machine et à l'artefact considéré. On a tracé sur le même graphique, tout comme auparavant, la courbe "a" des données de palpation cueillies par les mesures et la courbe "b" de l'erreur de forme de l'axe de mouvement mesuré.

Ensuite nous avons simulé le comportement géométrique de la même machine-outil ayant les mêmes paramètres géométriques dans les axes de mouvement qu'auparavant, auxquelles on a rajouté l'effet de l'erreur d'alignement de l'artefact par rapport au repère de la machine. La nature de cet effet est un torseur de petits déplacements ayant le comportement d'un biais et une composante de rotation. Cette erreur d'alignement devient pour les trois directions linéaires un torseur tridimensionnel. Pour calculer son effet sur les axes de mouvement de la machine, l'erreur d'alignement doit subir une transformation pour la mettre dans le repère de chaque axe de mouvement. Ensuite elle est ajoutée aux erreurs ω_{act} .

La stratégie de palpation est restée la même que pour le traçage des courbes "a" et "b". On complète ce graphique avec les courbes "c", qui représente les données de palpation avant de les avoir traitées dans le processeur, et "d" qui est la courbe de l'erreur de forme à la sortie du processeur.

On constate que, pour les tests concernant les axes de mouvement linéaires X, Y, et Z de la machine-outil, le processeur enlève complètement l'effet linéaire de l'erreur d'alignement de l'artefact (voir la figure 2.11). Ce résultat était prévisible, parce que l'effet linéaire de l'erreur d'alignement dans les axes linéaires de mouvement est une constante qui ne varie pas en fonction de la position articulaire. On voit sur les graphiques que les courbes "b" et "d" coïncident.

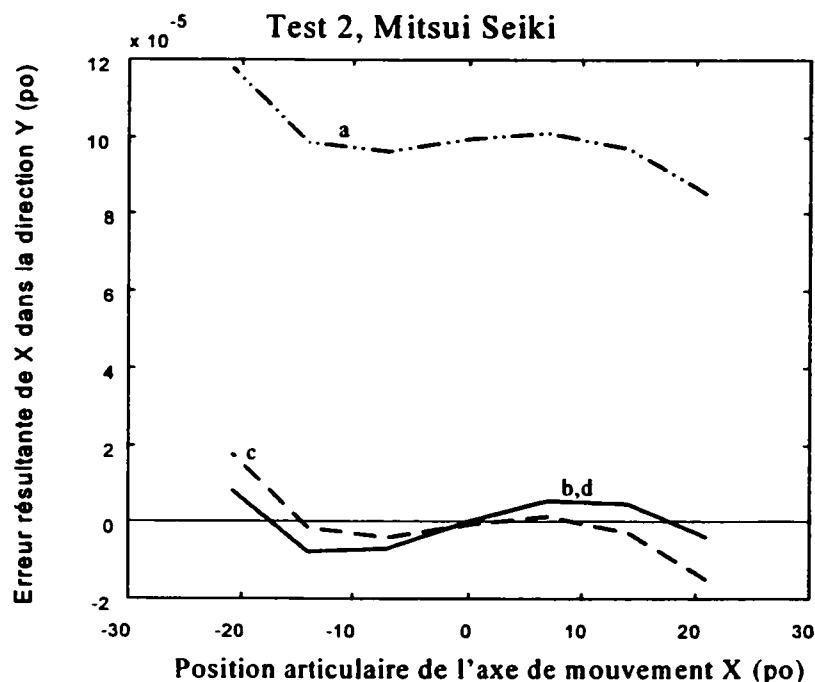


Figure 2.11 Validation numérique du niveau 1 du processeur, montrée pour le test 2. Étude quand l'artefact est monté avec une erreur d'alignement

Par contre, pour un axe de mouvement de rotation et dans les directions radiales de l'axe, l'effet de l'erreur d'alignement de translation dépend de la position angulaire de l'axe de mouvement. Pour ces tests concernant les axes de mouvement de rotation dans les directions radiales de l'axe, le processeur enlève en partie l'effet de l'erreur d'alignement. Les courbes "b" et "d" ne coïncident plus. Ces courbes sont très rapprochées pour des erreurs d'alignement de l'ordre de grandeur maximale de 10^{-4} po. Par contre, dans la direction axiale de l'axe de mouvement, l'effet de l'erreur d'alignement ne dépend plus de la position angulaire de l'axe de mouvement. Donc, pour un test parmi les trois tests d'un axe de mouvement de rotation, les courbes "b" et "d" se superposent.

Les graphiques tracés pour la validation numérique du processeur dans la situation où il y a une erreur d'alignement sont montrés à l'annexe C.

2.3 Diagnostic et suivi de l'état géométrique au niveau des paramètres géométriques d'écart d'une machine-outil: niveau 2

Ce niveau du modèle utilise les acquis du premier niveau pour faire une analyse plus détaillée des données en déterminant quels sont les PGÉV de chaque axe de mouvement qui ont varié depuis la séance précédente de palpéage ou depuis une séance considérée comme référence.

On a vu jusqu'ici qu'à chaque test de la stratégie de palpéage correspond une série de palpéage variationnel $\Delta\omega_{\varphi,d}$. Chaque élément de $\Delta\omega_{\varphi,d}$ correspond à une position articulaire de l'articulation visée et est le résultat de la somme des effets indépendants de plusieurs paramètres géométriques d'écart qui dépendent de l'axe en mouvement seulement.

2.3.1 Matrice de sensibilité, S

On veut construire une matrice S qui explique chaque élément i de $\Delta\omega_{\varphi,d}$ à partir de la variation des PGÉV Δq . Pour un seul élément i d'un test correspondant à une articulation d et une direction de touche φ on veut trouver la relation :

$$\Delta\omega_{\varphi,d,i} = S_{\varphi,d,i} \Delta q_i \quad [2.13]$$

Cette relation doit être valide pour n'importe quel point i du test. La matrice S est une partition de la matrice jacobienne J (voir la section 1.3). La construction de la matrice S est expliquée dans les sections suivantes.

Raisonnement pour justifier la relation [2.13]

On écrit la relation complète qui calcule l'erreur résultante actuelle f_{act} à un point i de l'espace

de travail à partir des paramètres géométriques d'écart variables $\mathbf{q}_{act,i}$.

$$\mathbf{f}_{act,i} = \mathbf{J}_i \mathbf{q}_{act,i} \quad [2.14]$$

La même relation est valide pour les données de référence qui ont été acquises dans une séance antérieure de tests à ce même point.

$$\mathbf{f}_{ref,i} = \mathbf{J}_i \mathbf{q}_{ref,i} \quad [2.15]$$

Le suivi de l'état géométrique nous amène à écrire la relation entre les variations des erreurs résultantes dans le temps.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{act,i} - \mathbf{f}_{ref,i} &= \mathbf{J}_i (\mathbf{q}_{act,i} - \mathbf{q}_{ref,i}) , \text{ ou autrement écrit :} \\ \Delta \mathbf{f}_i &= \mathbf{J}_i \Delta \mathbf{q}_i \end{aligned} \quad [2.16]$$

L'erreur $\Delta \mathbf{f}_i$ est un torseur, soit une matrice-colonne à six composantes dans le repère de l'élément géométrique, les trois premières étant les composantes linéaires selon les axes de mouvement X, Y et Z et les dernières étant les composantes angulaires toujours selon les mêmes axes. La matrice jacobienne $\mathbf{J}_i$ est créée par la concaténation horizontale des matrices de transport 6x6 spécifiques à chaque axe de mouvement et qui représentent l'effet de chaque PGÉV à ce point de l'espace de travail. Le torseur $\Delta \mathbf{q}_i$ est écrit en concaténant verticalement les six paramètres PGÉV de chaque axe de mouvement de la machine.

Lors d'un test, une donnée de palpation représente dans notre cas une composante parmi les six qui composent le torseur $\Delta \mathbf{f}_i$ et en occurrence la composante linéaire $\Delta f_{\phi,d,i}$ orientée selon la direction d'approche ϕ . Par conséquent, pour le point i pendant un test spécifique, la relation n'utilise qu'une seule ligne du Jacobien.

$$\Delta f_{\varphi,d,i} = J_{\varphi,d,i} \Delta q_i \quad [2.17]$$

Les erreurs $\Delta f_{\varphi,d,i}$ dans la relation [2.17] sont les éléments de $\omega_{\text{var},\varphi,d}$ sur l'artefact de palpement. Par la suite, les valeurs appartenant à un seul axe de mouvement sont traitées au niveau 1 telles que les autres axes à part celui qui est en mouvement n'ont aucun effet sur les valeurs obtenues $\Delta \omega_{\varphi,d}$. Alors, en rendant nuls tous les éléments de $J_{\varphi,d}$ qui appartiennent aux axes de mouvement différents de l'axe qui est en mouvement, on obtient la valeur déjà connue $\Delta \omega_{\varphi,d}$. On a donc créé, à partir de $J_{\varphi,d}$, une nouvelle matrice dite de sensibilité $S_{\varphi,d}$, qui exprime la sensibilité des valeurs $\Delta \omega_{\varphi,d}$ aux PGÉV spécifiques de l'axe d. Par conséquent,

$$\Delta \omega_{\varphi,d,i} = S_{\varphi,d,i} \Delta q_i \quad \text{voir [2.13]}$$

La matrice de sensibilité de chaque axe de la machine-outil $S_{d,i}$ aura autant de rangées que le nombre de tests prévu pour chaque axe de mouvement. Le nombre maximal de directions d'approche φ est de trois, correspondant aux trois directions de touche du palpeur, soit X, Y et Z de la machine, qui sont notés ici par 1, 2 et 3 pour simplifier l'écriture.

$$S_{d,i} = \begin{bmatrix} S_{1,d,i} \\ \dots \\ S_{\varphi,d,i} \end{bmatrix} \quad [2.18]$$

La matrice de sensibilité S_i , complétée pour toute la stratégie de palpement est formée en concaténant sur la verticale les matrices $S_{d,i}$ dans l'ordre standard de succession des axes de mouvement palpés (X, Y, Z, A, B, C). La matrice S_i aura un nombre de rangées égal au nombre de tests et un nombre de colonnes au plus égal au nombre d'axes multiplié par six, soit le nombre de PGÉV.

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{1,i} \\ \dots \\ S_{d,i} \\ S_{6,i} \end{bmatrix} \quad [2.19]$$

La relation générale qui lie la matrice colonne des valeurs $\Delta\omega$ de toute la séance de tests et les paramètres géométriques Δq variants avec la coordonnée articulaire (PGÉV) des axes est:

$$\Delta\omega = S \Delta q \quad [2.20]$$

Exemples de matrices de sensibilité

Les exemples fournis sont les matrices de sensibilité écrites sous forme de tableau de la Omnimill 60 (voir tableau 2.3) et celle de la Mitsui Seiki (voir tableau 2.4), développées pour des stratégies et des artefacts spécifiques.

Tableau 2.3 Matrice de sensibilité utilisée pour le centre d'usinage Omnimill 60, présentée sous la forme d'un tableau et avec les termes regroupés par type de paramètre sur les colonnes

Tests	Paramètre					
	$\Delta e_x(s)$	$\Delta e_y(s)$	$\Delta e_z(s)$	$\Delta \gamma_x(s)$	$\Delta \gamma_y(s)$	$\Delta \gamma_z(s)$
$\Delta\omega_x(x)$, TEST 1	-1	0	0	0	✓	✓
$\Delta\omega_y(x)$, TEST 2	0	-1	0	✓	0	✓
$\Delta\omega_z(x)$, TEST 3	0	0	-1	✓	✓	0
$\Delta\omega_x(z)$, TEST 4	1	0	0	0	✓	✓
$\Delta\omega_y(z)$, TEST 5	0	1	0	✓	0	✓
$\Delta\omega_z(z)$, TEST 6	0	0	1	✓	✓	0
$\Delta\omega_x(a)$, TEST 7	1	0	0	0	✓	✓
$\Delta\omega_y(a)$, TEST 8	0	-1...1	-1...1	✓	0	0
$\Delta\omega_z(a)$, TEST 9	0	-1...1	-1...1	✓	0	0

$\Delta\omega_x(b)$, TEST 10	-1...1	0	-1...1	✓	✓	✓
$\Delta\omega_y(b)$, TEST 11	0	1	0	✓	0	✓
$\Delta\omega_z(b)$, TEST 12	-1...1	0	-1...1	✓	✓	✓

Tableau 2.4 Matrice de sensibilité utilisée pour le centre d'usinage Mitsui Seiki présentée sous la forme d'un tableau et avec les termes regroupés par type de paramètre sur les colonnes

Tests	Paramètre					
	$\Delta e_x(s)$	$\Delta e_y(s)$	$\Delta e_z(s)$	$\Delta \gamma_x(s)$	$\Delta \gamma_y(s)$	$\Delta \gamma_z(s)$
$\Delta\omega_x(x)$, TEST 1	-1	0	0	0	✓	✓
$\Delta\omega_y(x)$, TEST 2	0	-1	0	✓	0	✓
$\Delta\omega_z(x)$, TEST 3	0	0	-1	✓	✓	0
$\Delta\omega_x(y)$, TEST 4	1	0	0	0	✓	✓
$\Delta\omega_y(y)$, TEST 5	0	1	0	✓	0	0
$\Delta\omega_z(y)$, TEST 6	0	0	1	✓	0	0
$\Delta\omega_x(z)$, TEST 7	1	0	0	0	✓	✓
$\Delta\omega_y(z)$, TEST 8	0	1	0	✓	0	0
$\Delta\omega_z(z)$, TEST 9	0	0	1	✓	0	0
$\Delta\omega_x(b)$, TEST 10	-1...1	0	-1...1	✓	✓	✓
$\Delta\omega_y(b)$, TEST 11	0	1	0	✓	0	✓
$\Delta\omega_z(b)$, TEST 12	-1...1	0	-1...1	✓	✓	✓
$\Delta\omega_x(c)$, TEST 13	-1...1	-1...1	0	0	0	✓
$\Delta\omega_y(c)$, TEST 14	-1...1	-1...1	0	0	0	✓
$\Delta\omega_z(c)$, TEST 15	0	0	1	✓	✓	0

Au lieu d'écrire la matrice **S** au complet de dimensions 12x30 (pour la Omnimill 60) ou 15x30 (pour la Mitsui Seiki), elle est écrite sous la forme d'un tableau exprimant l'effet sur

$\Delta\omega$ des PGÉV spécifiques à l'axe en mouvement $\Delta\mathbf{q}$. Les facteurs 1 ou -1 signifient que le paramètre respectif a un effet direct pendant le test sur la valeur $\Delta\omega_{\phi,d}$. Les facteurs marqués par ✓ ont des valeurs variables, étant en effet des distances qui multiplient les valeurs des PGÉV angulaires. Les intervalles de -1 à 1 sont des facteurs variables dus à l'effet de cosinus ou de sinus du PGÉV linéaire, dans les cas de tests effectués pour les axes de mouvement de rotation.

On remarque les différences entre les deux matrices présentées et qui sont dues à la différence de structure des machines-outils.

La relation numérique entre les $\Delta\omega_{\phi,d}$ et les paramètres $\Delta\mathbf{q}$ se lit dans le tableau très facilement. Par exemple, pour la machine-outil Omnimill 60, la première rangée qui correspond au “Test no.1” se lit:

$$\Delta\omega_x(x) = -\Delta e_x(x) + S_{\gamma_y(x)} \Delta\gamma_y(x) + S_{\gamma_z(x)} \Delta\gamma_z(x) \quad [2.21]$$

Un autre exemple du même tableau est:

$$\Delta\omega_x(b) = S_{e_x(b)} \Delta e_x(b) + S_{e_z(b)} \Delta e_z(b) + S_{\gamma_x(b)} \Delta\gamma_x(b) + S_{\gamma_y(b)} \Delta\gamma_y(b) + S_{\gamma_z(b)} \Delta\gamma_z(b) \quad [2.22]$$

N'oublions pas que les valeurs connues dans ces relations sont les $\Delta\omega_{\phi,d}$ qui sont déduites à partir des mesures et les coefficients de la matrice S qui dépendent de la structure de la machine-outil.

2.3.2 Analyse des PGÉV en fonction des résultats de tests

Après avoir défini la stratégie de palpage, la réponse du niveau 1 du modèle est l'ensemble des graphiques de $\Delta\omega$ en fonction de la position articulaire de l'axe de mouvement. Sur ces graphiques l'opérateur pourra voir si la variation de $\Delta\omega$ a changé par rapport à la dernière fois, donc s'il y a une dégradation des axes de mouvement de la machine. Donc le niveau 1 peut

déterminer les axes de mouvement qui se détériorent dans le temps, ainsi que la direction dans lequel cette tendance de détérioration se manifeste.

Le but de l'analyse au niveau 2 est d'afficher, pour le bénéfice de l'opérateur ou de la personne chargée de la maintenance, les PGÉV de l'axe de mouvement qui sont, ou peuvent être, la cause de la dégradation signalée sur le graphique. Ces informations peuvent devenir très utiles pour déterminer la cause de l'endommagement de l'axe de mouvement. Si un des PGÉV de rectitude, comme par exemple $e_y(x)$ ou $e_z(x)$, a développé une erreur très grande, la cause pourrait être le mécanisme de guidage. Quant au PGÉV linéaire d'échelle, par exemple $e_x(x)$ ou $e_y(y)$, une grande erreur développée signifie généralement qu'on peut chercher la cause dans l'encodeur de position. Si les PGÉV angulaires, comme par exemple le roulis ou le tangage, ont de grandes erreurs, la cause pourrait être l'usure des paliers à roulements.

La stratégie de palpation prévoit trois tests pour chaque articulation de la machine-outil: soit un par direction de palpation, lesquelles correspondent aux articulations prismatiques. On se rappelle que le résultat de chaque test est un graphique de $\Delta\omega$ en fonction de la coordonnée articulaire. Parmi les trois graphiques qui caractérisent une articulation, la variation de $\Delta\omega$ qui marque une détérioration de l'état géométrique en comparaison avec une séance précédente de palpation peut être remarquée dans un, deux ou tous les trois graphiques.

On utilise la valeur "1" prise par une variable binaire pour identifier le test courant qui a marqué la présence des erreurs et "0" pour celui qui n'a pas changé en comparaison avec la dernière séance de tests. La signification physique de la valeur "1" est que n'importe quel paramètre a pu développer une erreur parmi ceux auxquels le test est sensible, ou une combinaison de ces paramètres. Par exemple, prenons les trois tests impliquant des déplacements de l'axe de mouvement X, les tests no. 1, no. 2 et no. 3, réalisés sur la Omnimill 60. Dans la figure 2.12, les données de référence sont nulles et sont notées avec

“Ref. data”, les données de mesure suite à une première séance de palpation sont notées avec “Actual 1” et celles obtenues suite à une séance ultérieure de palpation sont notées avec “Actual 2”.

Supposons maintenant que seul le graphique du test no.1 a changé d'allure et que les deux autres sont restés inchangés en les comparant avec les graphiques obtenus à une séance antérieure, disons une semaine auparavant. On a donc les identificateurs "1 0 0" pour l'axe de mouvement X. Le test no. 1 est sensible, comme on voit dans le tableau, aux paramètres $e_x(x)$, $\gamma_y(x)$ et $\gamma_z(x)$. La déviation qui se voit sur le graphique de $\Delta\omega_x(x)$ peut être l'effet singulier de l'erreur du paramètre $e_x(x)$, de $\gamma_y(x)$, ou de $\gamma_z(x)$, ou encore une combinaison de deux ou des trois PGÉV. La signification physique de l'identificateur "0" pour un test est qu'aucun des paramètres auxquels ce test est sensible ne peut être la cause d'une déviation sur aucun des graphiques de l'axe de mouvement respectif. On considère de très faible probabilité qu'une combinaison de deux ou de trois paramètres puisse avoir comme effet une déviation nulle sur le graphique. Revenons à notre exemple. On a attribué les identificateurs "0" aux tests no. 2 et no. 3. Le tableau 2.3 nous indique que le test no.2 est sensible aux paramètres $e_y(x)$, $\gamma_x(x)$ et $\gamma_z(x)$. Son identificateur "0" implique que chacun des paramètres $e_y(x)$, $\gamma_x(x)$ et $\gamma_z(x)$ doit être exclu comme étant la cause de la déviation du graphique du test no. 1. On applique le même raisonnement pour le test no. 3. Donc, pour l'exemple, chacun des paramètres $e_z(x)$, $\gamma_x(x)$ et $\gamma_y(x)$ est exclu comme étant la cause de la déviation du graphique du test no. 1. Le diagnostic est donc que le paramètre $e_x(x)$ est en cause.

À partir de la matrice de sensibilité, nous allons créer A, une matrice logique de la matrice de sensibilité S, formée par des éléments "0" et "1": l'élément "0" pour les paramètres qui n'influencent pas le test respectif, et l'élément "1" pour les paramètres sensibles du test. Le tableau 2.5 montre la matrice A créée à partir du tableau 2.3 correspondant à la matrice de sensibilité de la Omnimill 60.

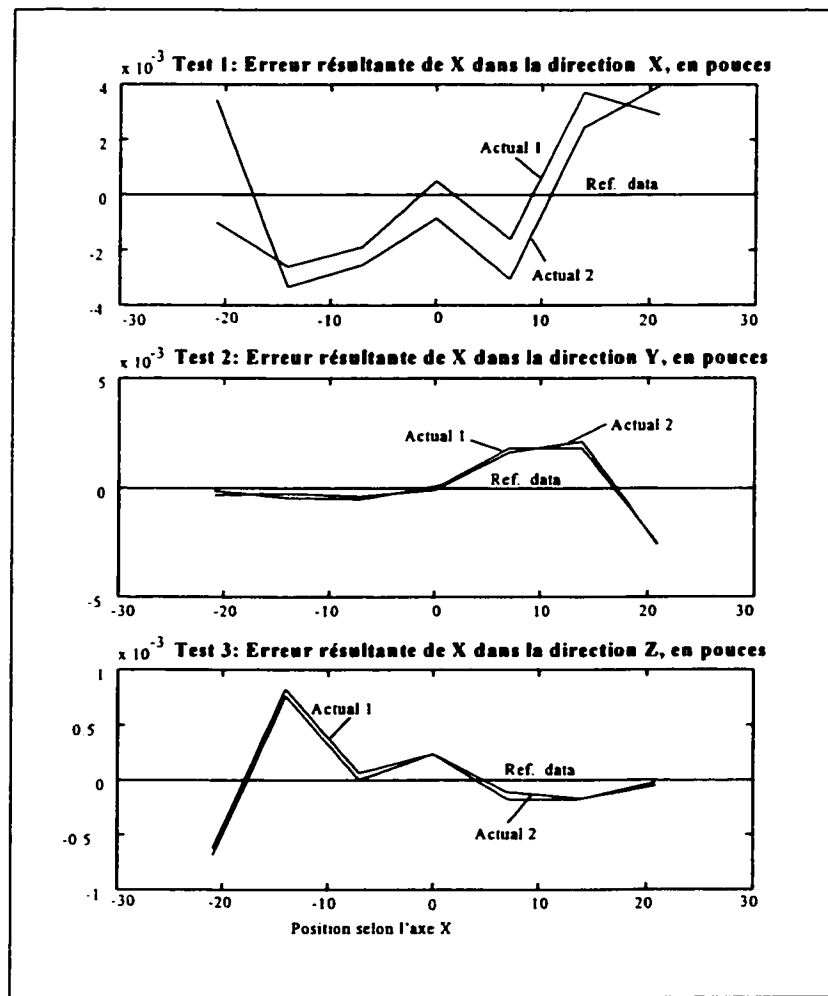


Figure 2.12 Exemple de résultats obtenus en utilisant le prototype 'Performance Monitoring', appliqué au centre d'usinage Omnimill 60 (Données simulées)

Pour déterminer les PGÉV soupçonnés d'être à la source de la dégradation d'un axe de mouvement donné, on suit le raisonnement suivant:

1. Pour chaque test de l'axe de mouvement qui n'est pas dégradé, c'est-à-dire pour lequel l'élément du triplet identificateur est égal à zéro, on enlève les paramètres qui ont un élément de A égal à 1. Ces paramètres sont jugés non dégradés.
2. Des paramètres restants, on conserve ceux dont au moins un des tests dégradés, c'est-à-dire pour lequel l'élément du triplet identificateur est égal à 1, a un élément de A égal à 1.

La comparaison entre les trois graphiques devrait se faire aux mêmes coordonnées articulaires. Il pourrait donc y avoir plusieurs triplets pour un axe de mouvement, en analysant les graphiques par portion le long de la coordonnée articulaire.

Tableau 2.5 Représentation de la matrice logique de la matrice de sensibilité A en forme de tableau (centre d'usinage Omnimill 60)

Tests	Paramètre					
	$\Delta e_x(s)$	$\Delta e_y(s)$	$\Delta e_z(s)$	$\Delta \gamma_x(s)$	$\Delta \gamma_y(s)$	$\Delta \gamma_z(s)$
$\Delta \omega_x(x)$, Test 1	1	0	0	0	1	1
$\Delta \omega_y(x)$, Test 2	0	1	0	1	0	1
$\Delta \omega_z(x)$, Test 3	0	0	1	1	1	0
$\Delta \omega_x(z)$, Test 4	1	0	0	0	1	1
$\Delta \omega_y(z)$, Test 5	0	1	0	1	0	1
$\Delta \omega_z(z)$, Test 6	0	0	1	1	1	0
$\Delta \omega_x(a)$, Test 7	1	0	0	0	1	1
$\Delta \omega_y(a)$, Test 8	0	1	1	1	0	0
$\Delta \omega_z(a)$, Test 9	0	1	1	1	0	0
$\Delta \omega_x(b)$, Test 10	1	0	1	1	1	1
$\Delta \omega_y(b)$, Test 11	0	1	0	1	0	1
$\Delta \omega_z(b)$, Test 12	1	0	1	1	1	1

Le tableau 2.6 représente le résultat de l'analyse des PGÉV en appliquant le traitement présenté. Les identificateurs attribués aux tests sont inscrits dans les rangées du tableau. Les résultats de l'analyse se trouvent en suivant les colonnes. Le résultat de l'analyse de la combinaison de tests est montré dans le tableau sur la rangée intitulée "paramètres en faute". La rangée suivante donne les relations entre ces paramètres, les facteurs de sensibilité et les valeurs de mesure $\Delta \omega_{\phi,d}$. Les facteurs de sensibilité sont notés uniformément avec S, pour simplifier l'écriture.

Tableau 2.6 Tableau représentant le résultat du niveau 2 (Omnimill 60).

TEST 1	1	0	0	1	1	0	1
TEST 2	0	1	0	1	0	1	1
TEST 3	0	0	1	0	1	1	1
Paramètres en faute	$e_x(x)$	$e_x(x)$	$e_x(x)$	$e_x(x), e_x(x), \gamma_x(x)$ $\gamma_x(x), \gamma_x(x)$	$e_x(x), e_x(x), \gamma_x(x)$	$e_x(x), e_x(x), \gamma_x(x)$	$e_x(x), e_x(x), e_x(x), \gamma_x(x), \gamma_x(x), \gamma_x(x)$
Relations entre les paramètres et le palpage	$-e_x(x) = \Delta\omega_x(x)$	$-e_x(x) = \Delta\omega_x(x)$	$-e_x(x) = \Delta\omega_x(x)$	$-e_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$ $-e_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x)$	$-e_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$ $-e_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x)$	$-e_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$ $-e_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x)$	$-e_x(x) + S\gamma_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$ $-e_x(x) + S\gamma_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$ $-e_x(x) + S\gamma_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$ $-e_x(x) + S\gamma_x(x) + S\gamma_x(x) = \Delta\omega_x(x);$
TEST 4	1	0	0	1	1	0	1
TEST 5	0	1	0	1	0	1	1
TEST 6	0	0	1	0	1	1	1
Paramètres en faute	$e_z(z)$	$e_z(z)$	$e_z(z)$	$e_z(z), e_z(z), \gamma_z(z)$	$e_z(z), e_z(z), \gamma_z(z)$	$e_z(z), e_z(z), \gamma_z(z)$	$e_z(z), e_z(z), e_z(z), \gamma_z(z), \gamma_z(z), \gamma_z(z)$
Relations entre les paramètres et le palpage	$e_z(z) = \Delta\omega_z(z)$	$e_z(z) = \Delta\omega_z(z)$	$e_z(z) = \Delta\omega_z(z)$	$e_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$ $e_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z)$	$e_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$ $e_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z)$	$e_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$ $e_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z)$	$e_z(z) + S\gamma_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$ $e_z(z) + S\gamma_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$ $e_z(z) + S\gamma_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$ $e_z(z) + S\gamma_z(z) + S\gamma_z(z) = \Delta\omega_z(z);$
TEST 7	1	0	0	1	1	0	1
TEST 8	0	1	0	1	0	1	1
TEST 9	0	0	1	0	1	1	1
Paramètres en faute	$e_a(a), \gamma_a(a), \gamma_a(a)$			$e_a(a), \gamma_a(a), \gamma_a(a)$	$e_a(a), \gamma_a(a), \gamma_a(a)$	$e_a(a), e_a(a), \gamma_a(a)$	$e_a(a), e_a(a), e_a(a), \gamma_a(a), \gamma_a(a), \gamma_a(a)$
Relations entre les paramètres et le palpage	$e_a(a) + S\gamma_a(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a)$	possibilité d'incohérence entre les résultats	possibilité d'incohérence entre les résultats	$e_a(a) + S\gamma_a(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a)$	$e_a(a) + S\gamma_a(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a)$	$e_a(a) \cos(a) - e_a(a) \sin(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a)$ $-e_a(a) \sin(a) + e_a(a) \cos(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a)$	$e_a(a) + S\gamma_a(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a);$ $e_a(a) \cos(a) - e_a(a) \sin(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a);$ $-e_a(a) \sin(a) + e_a(a) \cos(a) + S\gamma_a(a) = \Delta\omega_a(a);$
TEST 10	1	0	0	1	1	0	1
TEST 11	0	1	0	1	0	1	1
TEST 12	0	0	1	0	1	1	1
Paramètres en faute		$e_b(b), \gamma_b(b), \gamma_b(b)$		$e_b(b), \gamma_b(b), \gamma_b(b)$	$e_b(b), e_b(b), \gamma_b(b)$	$e_b(b), \gamma_b(b), \gamma_b(b)$	$e_b(b), e_b(b), e_b(b), \gamma_b(b), \gamma_b(b), \gamma_b(b)$
Relations entre les paramètres et le palpage	possibilité d'incohérence entre les résultats	$e_b(b) + S\gamma_b(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b)$	possibilité d'incohérence entre les résultats	$e_b(b) + S\gamma_b(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b)$	$e_b(b) \cos(b) - e_b(b) \sin(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b);$ $-e_b(b) \sin(b) + e_b(b) \cos(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b);$	$e_b(b) + S\gamma_b(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b)$	$e_b(b) + S\gamma_b(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b);$ $e_b(b) \cos(b) - e_b(b) \sin(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b);$ $-e_b(b) \sin(b) + e_b(b) \cos(b) + S\gamma_b(b) = \Delta\omega_b(b);$

Le prototype informatique "Performance Monitoring", qui est présenté plus en détail à la section 2.5, offre comme réponse au niveau 2 la rangée intitulée "paramètres en faute" du tableau précédent (tableau 2.5). La figure suivante (figure 2.13) montre un exemple de réponse au niveau 2, quand la combinaison d'identificateurs est "1 1 0" pour l'axe de mouvement Y de la machine Mitsui Seiki.

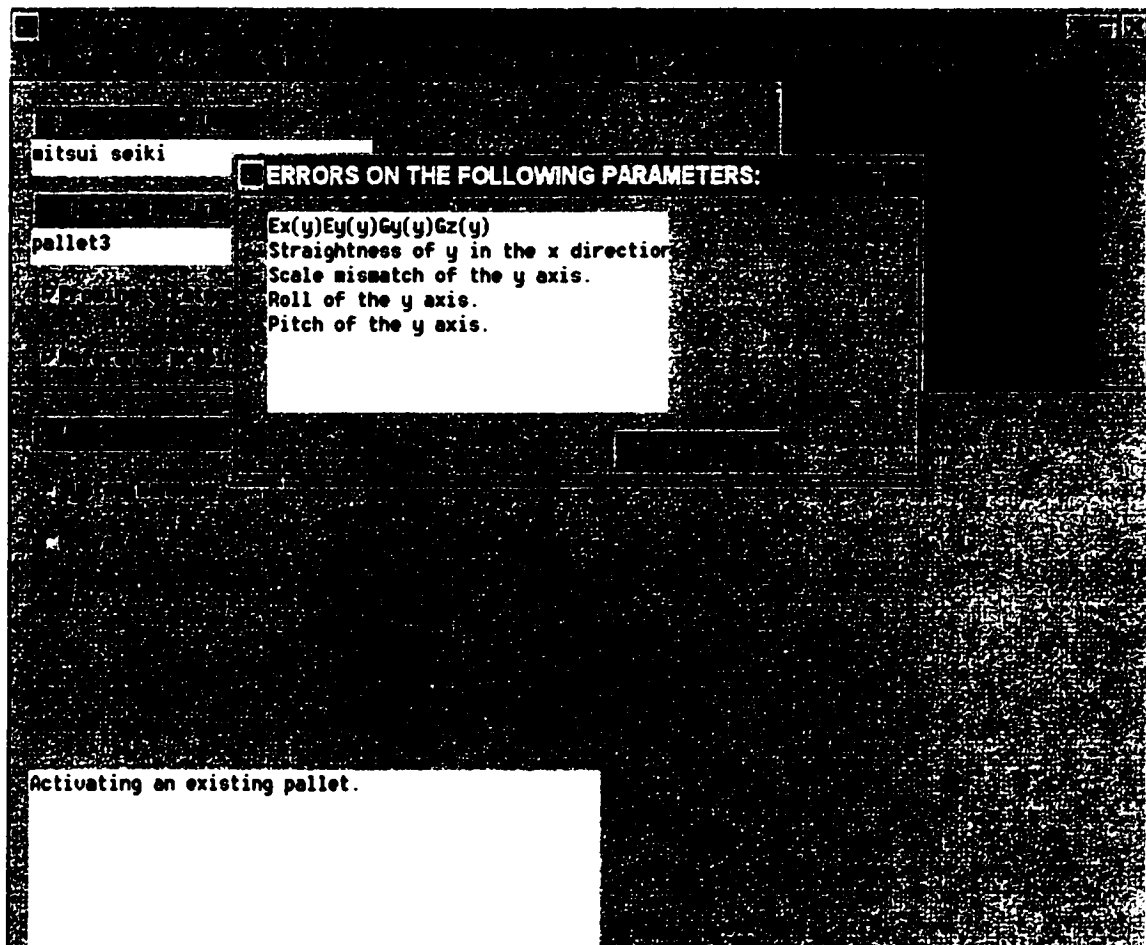


Figure 2.13 Imprimé de l'écran pendant le fonctionnement du prototype 'Performance Monitoring'

2.4 Erreurs résultantes aux éléments géométriques de la pièce à usiner et la faisabilité des pièces: niveau 3

Le but du niveau 3 est de pronostiquer la faisabilité d'un ou plusieurs éléments géométriques d'une pièce qui sera usinée sur la machine-outil, en utilisant les résultats obtenus au niveau 1. Les éléments géométriques sont assimilés à des points i situés dans l'espace de travail. Chacun a un repère associé qui a une position et une orientation bien définie, qui diffère d'un point à l'autre et qui est généralement différente de celle du repère machine.

2.4.1 Procédure de calcul

On se rappelle que la relation générale qui lie les erreurs $\Delta\omega$ obtenues à la sortie du processeur du niveau 1 et les PGÉV de tous les axes de mouvement de la machine-outil est la suivante.

$$\Delta\omega = S \Delta q \quad [2.23]$$

Nous voulons définir une matrice-colonne particulière $\Delta\omega_{\text{intp}}$ à partir des valeurs $\Delta\omega$ et qui est le palpé que nous estimons aurait été obtenu si la position articulaire de l'axe de mouvement eut correspondu à la position articulaire de ce même axe lors de l'usinage de l'élément géométrique. La relation suivante s'applique alors à ce point :

$$\Delta\omega_{\text{intp},i} = S_i \Delta q_i \quad [2.24]$$

Dans la relation ci-dessus, S_i est la matrice de sensibilité au point i de l'espace de travail auquel on veut propager l'effet des variations des PGÉV Δq_i . Les paragraphes suivants montrent comment interpréter et calculer $\Delta\omega_{\text{intp},i}$ ainsi que la procédure de calcul de la matrice

de sensibilité S_i .

La matrice Δq_i dans la relation [2.24] est inconnue. La méthode proposée trouve une solution de ses composants et par la suite propage son effet au point i de l'espace de travail.

2.4.1.1 Génération des points-image

La première étape du calcul de $\Delta \omega_{inp,i}$ est la génération des points-images dans l'espace articulaire. À l'aide d'un inverseur de coordonnées, on connaît les coordonnées articulaires du point $i=(x_i, y_i, z_i, a_i, b_i, c_i)$ situé sur la pièce.

Le point-image du point i généré dans la séquence d'un test de palpation, i_{img} , a sa coordonnée articulaire correspondant à l'axe de mouvement égale à la coordonnée au point i , et toutes les autres coordonnées égales aux coordonnées fixes des points du test.

Par exemple, le point-image du point i généré dans un des trois tests de l'axe de mouvement X , est :

$$i_{img,x} = (x_i, y_{test}, z_{test}, a_{test}, b_{test}, c_{test}) \quad [2.25]$$

Ou, un autre exemple, le point-image du point i dans un des trois tests de l'axe de mouvement B , est :

$$i_{img,b} = (x_{test}, y_{test}, z_{test}, a_{test}, b_i, c_{test}) \quad [2.26]$$

Par conséquent, chaque point i appartenant à la pièce a un nombre de points-images égal au nombre de tests de mesure.

2.4.1.2 Interpolation des valeurs $\Delta\omega$ dans les points-images

Les points-images sont les “reflets” du point i dans chaque test de mesure. Nous calculons les valeurs $\Delta\omega_{\text{imp},i}$ de ces points-images par l’interpolation linéaire des valeurs les plus rapprochées dans la séquence de tests. Si le test a deux axes de mouvement, l’interpolation est faite selon les deux axes respectifs.

2.4.1.3 Matrice de sensibilité S_i

À partir de jacobiens des points-images i_{img} , on peut générer les matrices de sensibilité de ces points, $S_{\text{img},d,i}$, où d est l’axe de mouvement du test. En fonction de la séquence de test auquel appartient le point-image respectif, on extrait la rangée significative de la matrice $S_{\text{img},d,i}$, c’est-à-dire la rangée correspondante à la direction φ de touche du palpeur, $S_{\text{img},\varphi,d,i}$, où $\varphi = x, y$ ou z . Les éléments (les dérivés) correspondants aux axes de mouvement non-mobiles des tests sont forcés à zéro. Ceci est en accord avec le filtrage de $\Delta\omega$ pour que l’effet des axes de mouvement non-mobiles soit éliminé. La matrice de sensibilité S_i du point i est la concaténation verticale des rangés $S_{\text{img},\varphi,d,i}$ dans l’ordre standard de succession des axes de mouvement. Pour simplifier l’écriture, la tranposée S_i^T de S_i est:

$$S_i^T = [S_{\text{img},x,x,i} \quad S_{\text{img},y,x,i} \quad S_{\text{img},z,x,i} \quad S_{\text{img},x,y,i} \quad S_{\text{img},y,y,i} \quad S_{\text{img},z,y,i} \quad S_{\text{img},x,z,i} \cdots S_{\text{img},x,a,i} \quad S_{\text{img},y,a,i} \cdots S_{\text{img},z,c,i}]$$

[2.27]

Si la stratégie de mesure ne contient pas de tests pour tous les axes de mouvement, la configuration de la machine considérée dans le modèle est réduite aux axes de mouvement pour lesquels on prend des mesures. Cette situation est convenable en pratique pour des procédés d’usinage qui n’utilisent pas tous les axes de mouvement de la machine.

Si la stratégie de mesure contient des tests incomplets pour un axe de mouvement, par

exemple l'axe X est testé seulement dans les directions X et Y, et pas dans la direction Z, alors les estimations de propagation des PGÉV, dans le cadre du niveau 3, sont faites pour ces directions seulement. L'interprétation physique de cette situation est que la dispersion encourue dans la direction Z est inconnue.

2.4.1.4 Solution du système d'équations $\Delta\omega_{\text{intp},i} = S_i \Delta q_i$

La suite des calculs nous amène à faire une évaluation des valeurs des PGÉV Δq_i aux coordonnées articulaires du point i.

$$\Delta\omega_{\text{intp},i} = S_i \Delta q_i \quad \text{voir la relation [2.24]}$$

La matrice S_i n'est pas une matrice carrée, le nombre de colonnes (nombre des axes x 6) est plus grand que le nombre de rangées (nombre de tests), donc le système d'équations est sous déterminé puisqu'il y a moins d'équations que d'inconnues. Le système a un nombre infini de solutions $\Delta q_{o,i}$ (Angeles, Ma, 1989, Angeles, Anderson, 1995). Dans le noyau de la matrice S_i on peut définir une matrice complémentaire orthogonale L . La forme générale de la solution est la suivante:

$$\Delta q_i = \Delta q_{o,i} + L u \quad [2.28]$$

Le terme Δq_i représente la solution générale du système d'équations [2.24] et $\Delta q_{o,i}$ est une des solutions possible, L est le complément orthogonal de S_i et u est n'importe quel vecteur dans l'espace nul de S_i . On remarque qu'en multipliant l'équation [2.28] avec la matrice jacobienne S_i à gauche, on obtient :

$$S_i \Delta q_i = S_i \Delta q_{o,i} + S_i L u \quad [2.29]$$

$J_i \Delta q_i$ représente l'erreur résultante dans l'espace de travail sous sa forme générale, $J_i \Delta q_{o,i}$ est une estimation de l'erreur cherchée et qui est calculée plus loin dans le texte et $J_i L u$ représente une erreur résultante pour l'espace nul de S_i . Le produit $J_i L$ est une matrice qui donne les directions et les orientations de l'erreur cherchée.

Pour calculer $\Delta q_{o,i}$ on utilise deux méthodes: le cas 1 de la pseudo-inverse de Moore-Penrose (Ben-Israel, Greville, 1974), et le cas 2 de l'élimination de Gauss avec pivotage partiel (Golub, Van Loan, 1983).

La première méthode, la pseudo-inverse de Moore-Penrose, produit une matrice $X = S_i^+$ qui va satisfaire les conditions suivantes:

$$\begin{aligned} S_i X S_i &= S_i \\ X S_i X &= X \\ S_i X &\text{ est hermitienne} \\ X S_i &\text{ est hermitienne} \end{aligned} \quad [2.30]$$

Le calcul est basé sur la solution de norme minimale. Cette solution est unique et de la forme:

$$\Delta q_{o,i,cas1} = S_i^+ \Delta \omega_{intp,i} \quad [2.31]$$

Elle est aussi nommée "la meilleure solution approximative" (Ben-Israel, Greville, 1974). Parmi toutes les solutions possibles $\Delta q_{o,i}$ cette solution se caractérise par les inégalités suivantes :

$$\begin{aligned} \| S_i \Delta q_{o,i,cas1} - \Delta \omega_{intp,i} \| &\leq \| S_i \Delta q_{o,i} - \Delta \omega_{intp,i} \| \text{ pour tous les } \Delta q_{o,i} \\ \| \Delta q_{o,i,cas1} \| &< \| \Delta q_{o,i} \| \text{ pour n'importe quel } \Delta q_{o,i} \neq \Delta q_{o,i,cas1} \text{ qui résout le système.} \end{aligned} \quad [2.32]$$

La deuxième méthode choisie pour résoudre le modèle, l'élimination de Gauss avec pivotage partiel, est la méthode standard pour résoudre un système d'équations linéaires. Cette méthode appliquée à notre système d'équations $\Delta \omega_{\text{intp},i} = S_i \Delta q_i$, où S_i est une matrice non carrée et $\Delta \omega_{\text{intp},i}$ est une matrice colonne, donnera aussi une solution unique. Le rang de la matrice S_i est calculé d'abord en utilisant la décomposition **QR** orthogonale avec pivotage de Householder, où **Q** est la matrice orthonormale et **R** est une matrice triangulaire supérieure ("upper-triangular"). Pour utiliser la méthode, la matrice S_i doit être de plein rang ligne.

$S_i P = Q R$, où **P** est une permutation telle que les valeurs sur la diagonale de **R** soient dans un ordre décroissant. [2.33]

La solution $\Delta q_{o,i,\text{cas2}}$ est la suivante :

$$\Delta q_{o,i,\text{cas2}} = P (R / (Q^T \Delta \omega_{\text{intp},i})) \quad [2.34]$$

La matrice Q^T est la transposée de **Q**. La spécificité de cette solution est qu'elle a, parmi toutes les solutions $\Delta q_{o,i}$ possibles, le plus grand nombre de composants égaux à zéro (Golub, Van Loan, 1983).

2.4.1.5 Estimation des erreurs résultantes aux points situés sur la pièce

On remarque, à ce stade de développement du modèle, que la solution obtenue $\Delta q_{o,i}$ représente la variation des paramètres PGÉV au moment actuel de mesures par rapport à un état géométrique passé de la machine-outil qui a été considéré comme l'état de référence.

Le but de l'analyse à ce niveau est d'estimer les erreurs **f** aux points appartenant à l'espace

de travail dans le repère de l'élément géométrique. Il faut donc obtenir $\mathbf{q}_{act}$ soit les paramètres PGÉV actuels. Le calcul de $\mathbf{q}_{act}$ implique l'application d'un des deux options possibles pour accomplir cette étape. Le schéma de la figure 2.14 montre plus clairement ces deux options.

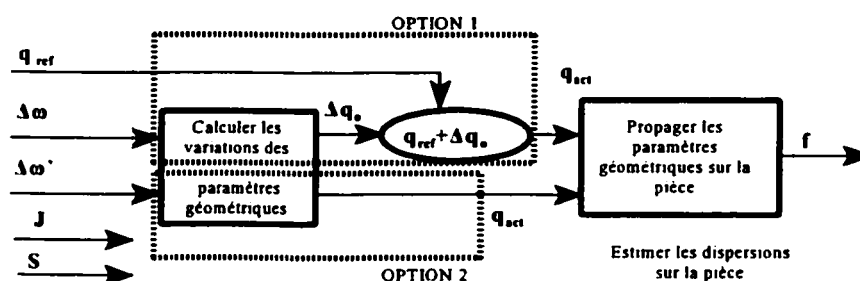


Figure 2.14 Schéma montrant les deux options pratiques pour obtenir les valeurs $\mathbf{q}_{act}$

La figure ci-dessus est un 'agrandissement' de la boîte d'estimation des erreurs résultantes sur la pièce, dans le niveau 3, telle que représentée à la figure 2.1.

La première option montrée dans le schéma utilise pour donnée d'entrée dans le processeur du niveau 1 les valeurs ω_{ref} mesurées pendant une séance antérieure de tests. Dans cette variante, aux valeurs calculées $\Delta\mathbf{q}_o$, on rajoute les valeurs $\mathbf{q}_{ref}$ qui ont été identifiées pendant l'étalonnage détaillée de la machine-outil.

$$\mathbf{q}_{act} = \mathbf{q}_{ref} + \Delta\mathbf{q}_o \quad [2.35]$$

Dans la relation [2.35] les $\mathbf{q}_{ref}$ représentent les PGÉV pris au moment de référence. Quant à $\Delta\mathbf{q}_o$, la matrice représente un estimé de la variation des PGÉV.

Par exemple, dans les usines de Pratt & Whitney Canada, les machines Omnimill 60 et Mitsui Seiki sont l'objet d'un étalonnage complet des paramètres géométriques d'écart, qui a lieu chaque deux années, et qui est réalisé en utilisant des interféromètres lasers pour la

majorité des paramètres, des barres à billes pour le jeu et les erreurs de perpendicularité.

La deuxième option ne dépend plus des données d'une inspection détaillée, comme c'était le cas pour la première option. Pour cette variante, il suffit de mesurer l'artefact sur une machine à mesurer tridimensionnelle de précision suffisante. L'utilisation de ces machines est très courante dans toutes les usines où des pièces de précision sont fabriquées. On acquiert ainsi des valeurs ω_{mmt} à la place de données de référence. Ainsi ω_{mmt} représente les données de palpé qui l'on devrait obtenir si la machine était en parfaite condition et l'artefact était parfaitement monté sur la machine. Elles sont utilisées comme ω_{ref} dans le processeur du niveau 1 et on obtient à sa sortie le $\Delta\omega$. Par conséquent, les q_{ref} sont supposées nuls, et la solution de l'équation $\Delta\omega_{intp} = S \Delta q$ donne directement q_{act} .

$$q_{act} = \Delta q_0 \quad [2.36]$$

Ensuite, pour faire une estimation des erreurs résultantes f_i au point i , il faut propager l'effet des paramètres géométriques $q_{act,i}$ à ce point.

$$f_i = J_i q_{act,i} \quad [2.37]$$

La matrice jacobienne J_i est connue puisque la structure de la machine-outil et les distances entre les axes de mouvement sont nominalement connues, ce qui suffit pour avoir un jacobien de précision suffisante.

2.4.1.6 Faisabilité des éléments géométriques et de la pièce en général

Faisabilité de l'élément géométrique selon les trois directions X, Y et Z

Le torseur des écarts ponctuels f_i est comparé avec les tolérances T des éléments

géométriques ponctuels, qui sont imposées à ce point. Les éléments géométriques sont usinés en repère machine. Nous avons noté avec f la composante dans une direction spécifique de f_i calculée au point i de la pièce. Par exemple, pour une tolérance de profil de surface, c'est la direction de la normale locale à la surface. T est la tolérance dans cette même direction spécifique.

si $f/T \leq 1$, alors l'élément géométrique, dans cette direction, est faisable. On l'appelle "bon".
si $f/T > 1$, alors l'élément géométrique, dans cette direction, n'est pas faisable. Il ne convient pas. [2.38]

Pour chaque élément géométrique on obtient les erreurs résultantes dans les trois directions X, Y, Z du repère local à l'élément.

Faisabilité de l'élément géométrique situé sur la pièce

On peut marquer la faisabilité avec les attributs suivants : *rouge*, si l'élément géométrique n'est faisable dans aucune direction, *vert*, si l'élément géométrique est faisable dans toutes les directions de l'espace, et *jaune*, s'il est faisable dans une ou deux directions et non faisable dans une ou deux directions. Supposons que la matrice colonne des tolérances T a tous ses éléments identiques et égaux à T , alors nous disons que:

si $(f_x / T \leq 1)$ et $(f_y / T \leq 1)$ et $(f_z / T \leq 1)$, alors l'élément géométrique est faisable et attribut élément = vert,

si $(f_x / T > 1)$ et $(f_y / T > 1)$ et $(f_z / T > 1)$, alors l'élément géométrique n'est pas faisable et attribut élément = rouge,

sinon, dans toutes les autres situations, l'élément est peut-être faisable en prenant des précautions pendant l'usinage et attribut élément = jaune. [2.39]

Faisabilité de la pièce

En suivant le même principe on peut donner à la pièce en entier un attribut de faisabilité :

si tous les attribut élément = vert, alors attribut pièce = vert,

si tous les attribut élément = rouge, alors attribut pièce = rouge,

sinon, quand il y a des attribut élément = rouge, vert et jaune pour la même pièce, alors attribut pièce = jaune.

[2.40]

2.5 Le simulateur du modèle. Validation numérique des niveaux 2 et 3

2.5.1 Fonctionnement du simulateur

Le modèle de diagnostic de l'état géométrique de la machine-outil a été simulé en langage MATLAB, version 4.2. Pour le niveau 1, à l'aide du simulateur, nous avons validé et testé le fonctionnement du processeur, tel que montré à la section 2.2. Au niveau 2, la matrice S et les calculs d'analyse des PGÉV ont été effectués à l'aide de ce simulateur.

Quant au niveau 3, le simulateur s'est avéré un outil indispensable. On voulait tester sous quelles conditions le modèle offrait un pronostic valide de faisabilité des éléments géométriques et quelles étaient ses limites. Pour réaliser cela, le simulateur fonctionne sur deux branches de calcul: une qui calcule les erreurs réelles f' quand on connaît les erreurs des PGÉV des axes de mouvement de la machine-outil, et une autre branche qui simule le modèle de diagnostic géométrique et qui prédit les erreurs f en passant par les niveaux 1, 2 et 3 (voir figure 2.15).

Le carré en ligne pointillée à la figure 2.15 représente la simulation du modèle de diagnostic de l'état géométrique de la machine. L'algorithme met surtout en évidence la succession des données, qui marquent les étapes majeures de la simulation et qui sont écrites dans les carrés

en ligne continue. Les procédures de calcul qui lient ces données sont marquées d'une façon très générale et sont mentionnées à l'intérieur des ellipses.

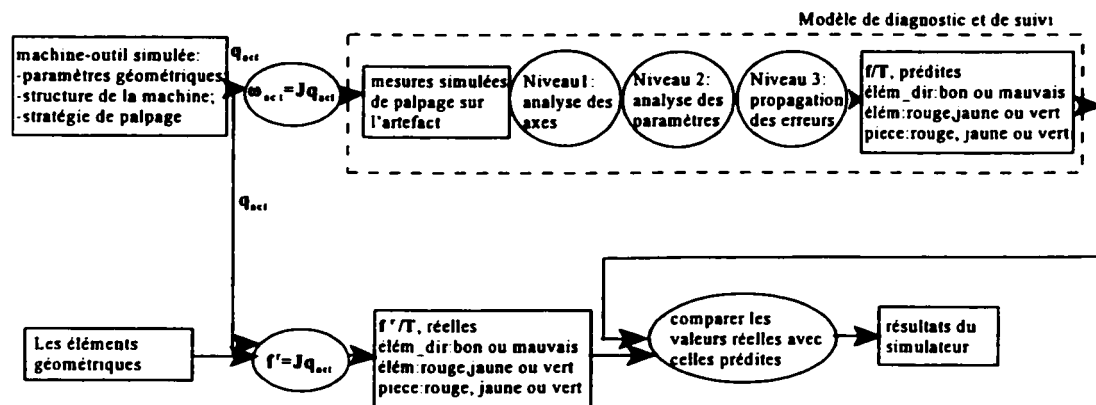


Figure 2.15 Algorithme du fonctionnement du simulateur

2.5.2 Donnée d'entrée: machine-outil simulée

On considère que l'état de référence est un état géométrique idéal, par conséquent les paramètres géométriques d'écart à l'état de référence sont nuls. En plus, l'artefact de mesure a une forme parfaite.

$$\mathbf{q}_{\text{ref}} = 0 \quad [2.41]$$

Les PGÉV de chaque axe de mouvement ont été simulés par des fonctions polynomiales. Par exemple, le paramètre $e_y(x)$ est supposé, pour les fins de simulation, égal à :

$$e_y(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + \dots + C_{n-1} x^{n-1} + C_n x^n \quad [2.42]$$

Dans la relation [2.42], les coefficients $C_0, C_1, \dots, C_n$ sont générés en connaissant le domaine de variation de l'axe de mouvement (par exemple l'axe X varie entre -40.0 po et +40.0 po

dans le repère machine), l'intervalle de variation du paramètre géométrique $[-k, k]$, et le degré du polynôme n . Ce calcul est fait par des fonctions incorporées 'polyfit' de Matlab. Les valeurs des paramètres utilisées dans la déduction des coefficients polynomiaux, sont le résultat des relations du type:

$$\varepsilon = k * (2 * rd - 1.0) \quad [2.43]$$

ε est une notation générique pour la valeur du polynôme représentant le paramètre géométrique. Le terme k reflète l'état d'endommagement de la machine. Pour cette raison nous allons le nommer "facteur d'endommagement". La variable rd est un nombre aléatoire, de distribution uniforme, réel et généré dans l'intervalle $[0, 1]$. L'utilisation de cette variable aléatoire génère des états géométriques aléatoires de la machine-outil.

2.5.3 Données d'entrée: l'ensemble des éléments géométriques

Les positions des éléments géométriques générés par le simulateur dans l'espace de travail de la machine-outil sont aléatoires. Par exemple, le calcul de la coordonnée cartésienne selon l'axe de mouvement X est le suivant:

$$x_c = x_{\max} (2 * rd - 1.0) \quad [2.44]$$

La valeur $x_{\max}$ est la valeur maximale connue de l'axe de mouvement à laquelle la machine-outil peut se déplacer dans son espace de travail, dans le repère pièce.

2.5.4 Action du simulateur: comparer les résultats réels avec ceux prédits

La comparaison des résultats réels avec ceux prédits est faite au niveau des composantes des

erreurs résultantes f aux points de l'espace de travail. Le facteur de comparaison est le nombre des composantes des erreurs f réellement bonnes ou mauvaises par rapport au nombre des composantes des erreurs f prédites bonnes ou mauvaises.

La comparaison des valeurs mêmes des erreurs résultantes ne présente pas d'intérêt parce que le modèle n'a pas comme objectif ni le calcul exact des erreurs, ni la compensation de l'erreur de la machine. Le modèle est conçu pour fournir l'estimation rapide de la faisabilité d'une pièce ayant plusieurs éléments géométriques.

2.5.5 Données de sortie: résultats de la simulation

La première série de simulations a été faite pour une pièce ayant quatre éléments géométriques. La tolérance choisie a été de 0.001 po. Le facteur k d'endommagement de la machine varie d'une valeur très près de zéro jusqu'à 6×10^{-3} . Au-dessus de la valeur $k = 6 \times 10^{-3}$ la machine simulée n'était plus fonctionnelle, ayant des erreurs trop grandes.

La sortie du simulateur est d'abord une réponse au niveau des composantes des erreurs résultantes et elle se présente de la façon suivante (voir tableau 2.7). Les valeurs a , b , c , d sont des chiffres entiers. a est le nombre de composantes des erreurs résultantes qui sont conformes et que le modèle a interprété correctement. b , par contre, est le nombre des composantes qui en réalité sont conformes mais que le modèle a interprété comme étant en dehors de la tolérance. c et d sont de même pour les éléments géométriques réellement non-conformes.

Tableau 2.7 Allure générale de la réponse fournie par le simulateur.

	JUGÉES	
	BONNES	MAUVAISES
RÉELLEMENT		
BONNES	a	b
MAUVAISES	c	d

Le taux de succès représente :

$$\text{taux} = (a + d) * 100 / (a + b + c + d), \text{ en } \% \quad [2.45]$$

Le pourcentage des éléments géométriques réellement bons et celui des éléments géométriques réellement mauvais est:

$$(a + b) / (a + b + c + d), \text{ en } \%. \quad [2.46]$$

$$(c + d) / (a + b + c + d), \text{ en } \% \quad [2.47]$$

La figure 2.16 présente les résultats des simulations, quand pour résoudre le système $\Delta\omega_{\text{intp},i} = S_i \cdot q$ on utilise le cas 1, de la pseudo-inverse de S_i . Le taux de succès du modèle est sur l'ordonnée et il est représenté par le symbole o. Sur l'abscisse sont les intervalles de variation des PGÉV $[-k \ k]$. Avec l'endommagement progressif de la machine-outil, le taux de succès du modèle baisse, en regardant la courbe en continue, jusqu'à un minimum de 62%. La courbe tracée est une courbe qui interprète dans le sens des moindres carrés les taux de succès obtenus par les simulations, mais le succès du modèle peut descendre parfois, pour des cas particuliers, jusqu'à 46%. Le modèle a été testé pour 64 éléments géométriques aléatoires et chacun d'eux pour 50 états machines aléatoirement générées, en fonction des intervalles de variation des PGÉV.

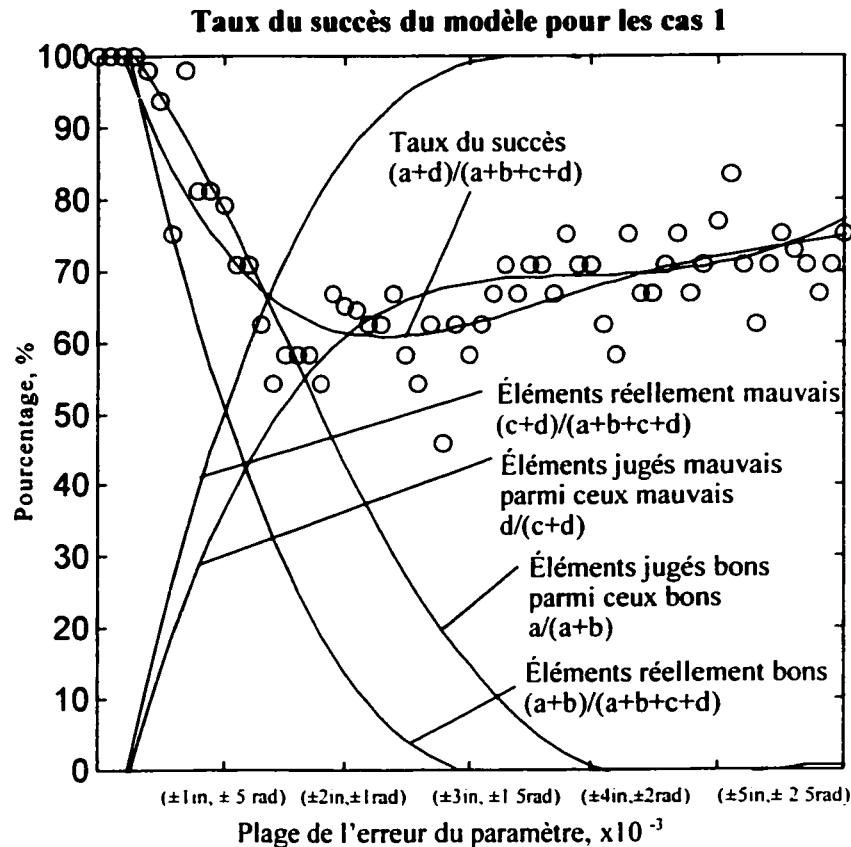


Figure 2.16 Estimation du taux de succès du modèle pour le cas 1 de résolution, en fonction de la largeur du domaine de variation des erreurs des PGÉV (en %)

À la figure 2.16, les intervalles de variation de type $[\pm 1 \times 10^{-3} \text{ in}, \pm 0,5 \times 10^{-3} \text{ rad}]$ montrés sur l'abscisse signifient que les PGÉV linéaires varient de -0,001 in à 0,001 in et les PGÉV angulaires varient de -0,0005 rad à 0,0005 rad.

La figure 2.17 présente les résultats, quand pour résoudre le système $\Delta \omega_{\text{imp},i} = S_i^* q_i$ on utilise le cas 2, soit l'élimination de Gauss avec pivotage partiel de S_i . La courbe est très similaire à celle précédente.

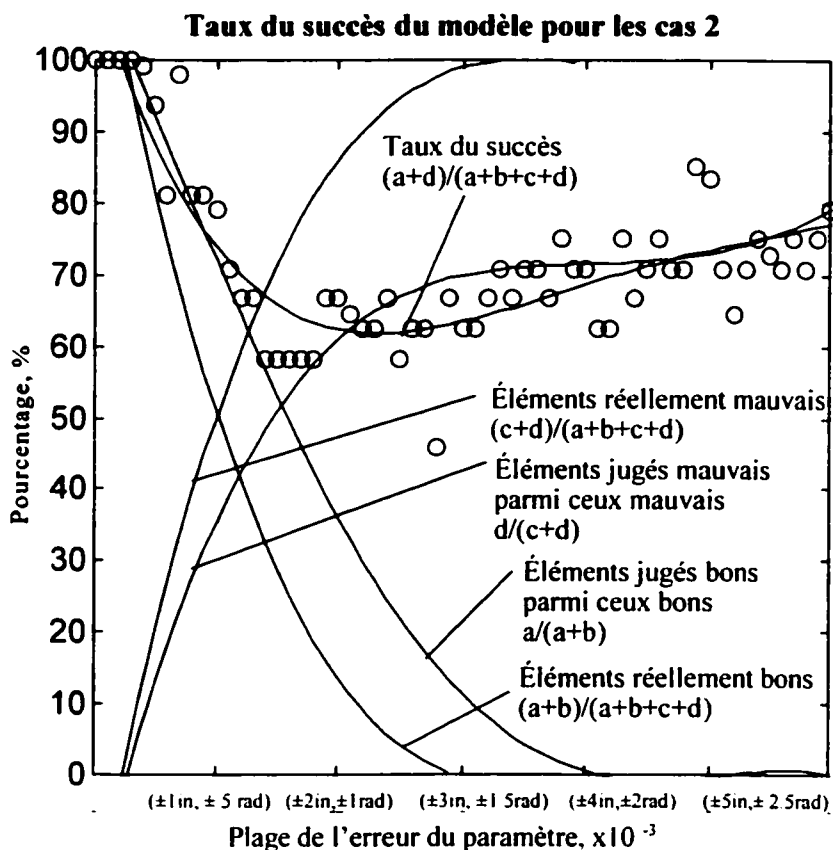


Figure 2.17 Estimation du taux de succès du modèle pour le cas 2 de résolution, en fonction de la largeur du domaine de variation des erreurs des PGÉV (en %)

Le modèle prédit bien, avec un taux de succès de 70% et plus, jusqu'à un endommagement de la machine qui fait qu'elle ne peut plus usiner que 30% des éléments géométriques. Quand la machine-outil n'arrive plus à faire que quelques éléments géométriques, le modèle devient très peu fiable quant à prédire quels éléments géométriques la machine peut encore usiner. Le taux de succès est amélioré quand la machine-outil est dégradée, mais il ne remonte que très lentement.

2.6 Présentation de l'interface du modèle

Le modèle a été conçu dans le but pratique d'être utilisé dans les usines de Pratt et Whitney Canada, comme un outil de diagnostique de l'état géométrique d'une machine-outil avant de commencer l'usinage d'une nouvelle pièce ou famille de pièces.

Le prototype "Performance Monitoring" consiste en un ensemble de fichiers conçus en langage MATLAB. L'environnement MATLAB est très approprié pour les calculs et la visualisation de haute performance en intégrant les calculs numériques, matriciels et les graphiques.

La structure du modèle informatique est présentée à la figure 2.18, qui est tirée du guide d'utilisation du prototype.

Les répertoires "racines" sont le répertoire "monitor" et un ou plusieurs répertoires d'archive. Les répertoires d'archive contiennent tous les fichiers spécifiques aux machines-outils qui sont utilisés dans l'application principale de l'interface.

Après la réalisation d'une nouvelle session de tests, les fichiers de données devront être sauvegardés dans les répertoires d'archive avant d'être utilisés dans l'application principale. De même, quand on crée une nouvelle machine ou quand on modifie une existante, les calculs nouveaux ou modifiés doivent être sauvegardés immédiatement dans les répertoires d'archive. Cette façon de manipuler les fichiers est recommandée pour assurer le bon fonctionnement de cette application.

L'application principale peut être utilisée par l'opérateur de la machine ou par un administrateur de système. Pour travailler avec la deuxième option, il faut posséder un mot de passe. La différence entre les deux est que l'administrateur du système peut créer,

modifier ou effacer des machines dans la liste active du modèle, des palettes ou des stratégies de palpation. Quant à l'opérateur de la machine il ne peut utiliser le modèle que pour les items existants.

Les fonctions de création, modification ou destruction des différents items opèrent directement sur le gestionnaire de fichiers de l'ordinateur dans le répertoire "monitor". Ces fonctions créent, modifient ou détruisent des répertoires et leurs sous répertoires et fichiers, sans aucune possibilité d'annuler l'action prise, par conséquent il faut faire attention chaque fois qu'on choisit une des ces fonctions. L'utilisation des répertoires d'archive nous fait éviter la perte des fichiers.

La liste active des machines-outils contient les noms des machines sur lesquelles on applique le palpation, comme par exemple Omnimill 60 ou Mitsui Seiki. Le mot générique des "palettes" signifie la palette de la machine ou tout autre artefact de palpation qui est utilisé. La "stratégie de palpation" est la succession des tests de palpation qui sera effectuée sur la "palette".

Le guide sommaire d'utilisation de chaque fonction est inclus à l'annexe E. Toujours à l'annexe E on présente quelques exemples du fonctionnement de l'application.

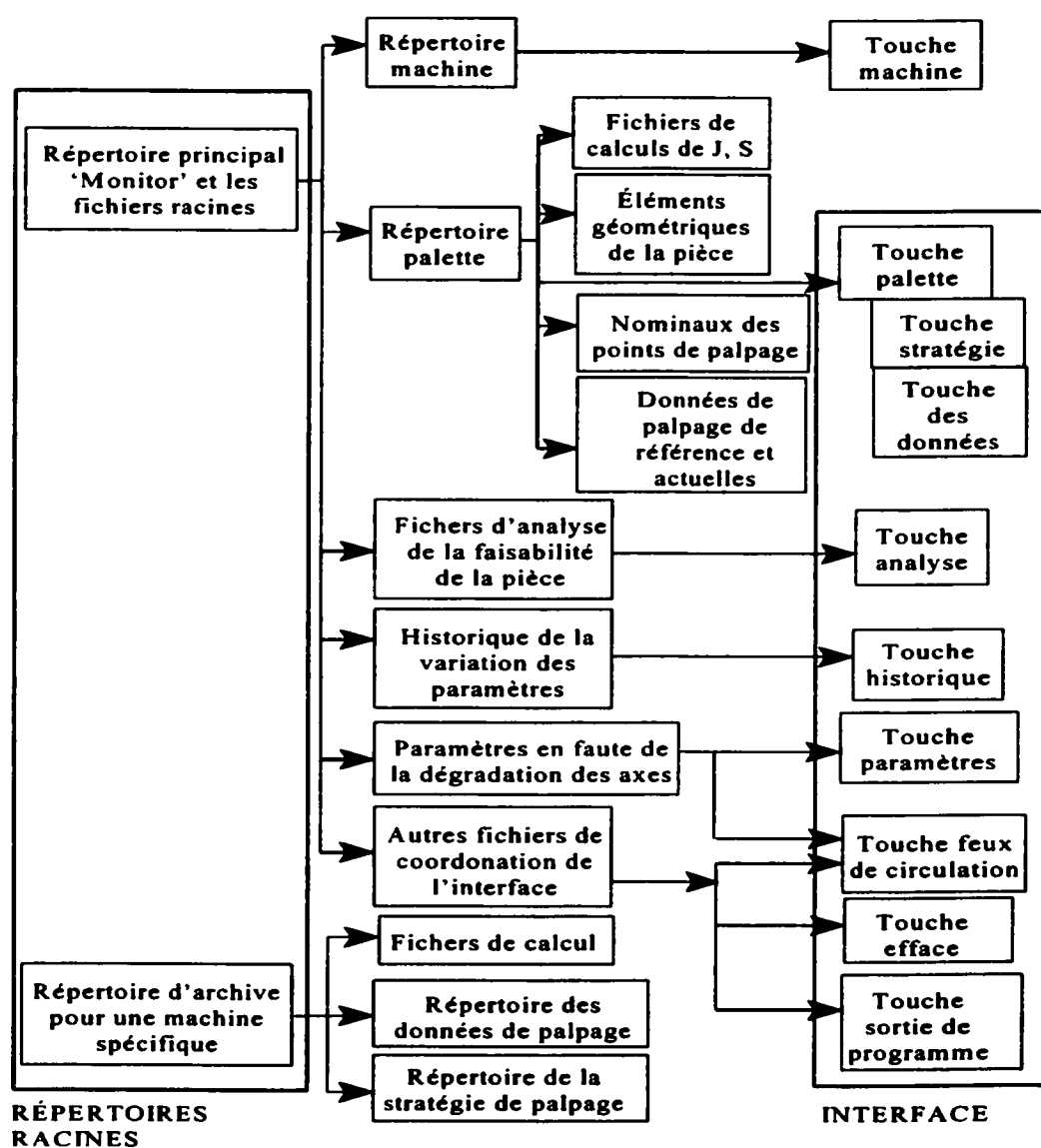


Fig. 2.18 Représentation de la structure du prototype informatique 'Performance Monitoring' (tiré du Guide de l'Utilisateur).

CHAPITRE 3

VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE

3.1 Validation expérimentale du niveau 1 du modèle

La machine disponible pour la partie expérimentale a été la machine à 5 axes de mouvement Matsuura MC-760VX ayant la configuration ACYXFZ. La validation expérimentale a été faite pour les éléments géométriques situés dans le plan des axes de mouvement X et Y de la machine-outil. Les étapes de la validation sont montrées à la figure 3.1.

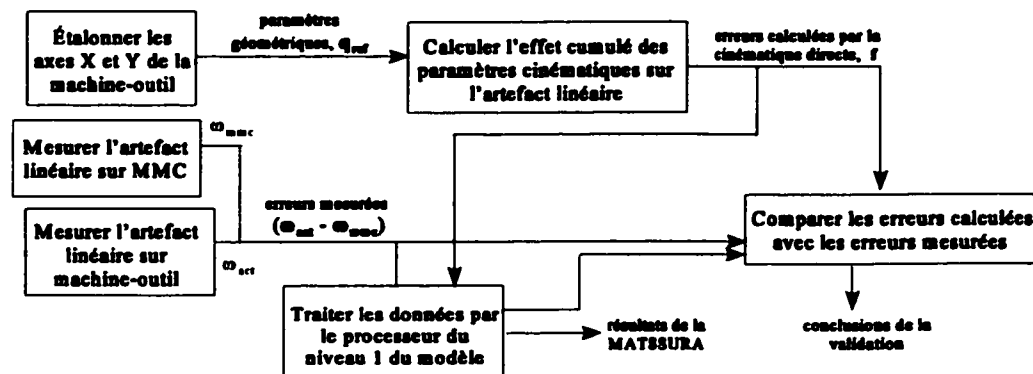


Figure 3.1 Représentation de l'organigramme de validation expérimentale du niveau 1 du modèle

L'étalonnage des axes de mouvement linéaires X et Y de la machine-outil est effectué en utilisant une plaque à trous. Cette étalonnage permet d'évaluer les PGÉV des axes de mouvement X et Y auxquels sont sensibles les mesures effectuées sur la plaque à trous (Kruth, Vanherck, de Jonge, 1994 et Schellekens, Soons e.a., 1993). En utilisant la cinématique directe nous pouvons calculer les erreurs résultantes aux points de touche de l'artefact linéaire à marches, pour les comparer avec des mesures prises directement sur l'artefact. Cette validation expérimentale va démontrer dans quelle mesure les erreurs

déterminées par palpé sur l'artefact linéaire correspondent aux erreurs 'réelles', qui représentent l'effet cumulé des PGÉV des axes de mouvement de la machine propagées dans l'espace de travail.

La dernière étape est constituée par le traitement des mesures prises sur l'artefact linéaire, comme cela est explicité à la section 3.1.

3.1.1 Étalonnage des axes de mouvement X et Y de la machine-outil

3.1.1.1 Introduction

Les axes de mouvement X et Y de la machine-outil ont 12 PGÉV et une erreur de perpendicularité. Les 6 PGÉV de chaque axe sont les PGÉV linéaires d'échelle et de rectitudes, et le roulis, le tangage et le lacet.

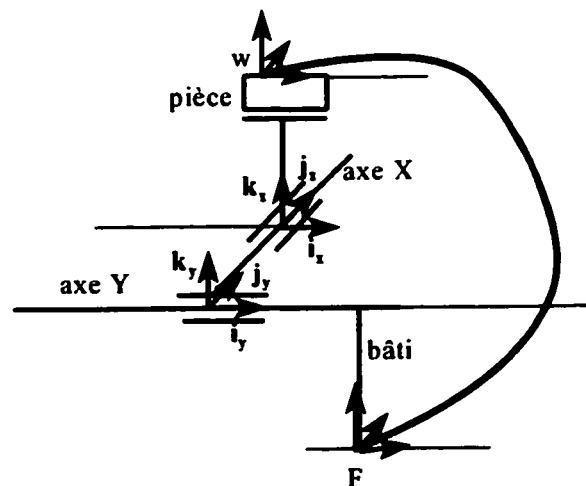


Figure 3.2 Représentation schématique des axes de mouvement X et Y de la machine Matsuura.

La cinématique directe de la machine nous permet d'écrire l'expression des positions réelles x et y en fonction des positions articulaires mesurées x_m et y_m , c'est-à-dire celles lues par la machine. Les relations contiennent aussi les positions selon l'axe de mouvement Z .

$$\begin{aligned} x &= x_m + e_x(x_m) + e_x(y_m) + \gamma_y(y_m)[z_m - 200] + \gamma_z(y_m)[y_m] - \gamma_y(x_m)[z_m - 1050] - \gamma_z(x_m)[y_m] \\ y &= y_m + e_y(x_m) + e_y(y_m) + \gamma_z(y_m)[x_m] - \gamma_z(x_m)[350] - \gamma_x(y_m)[z_m - 200] + \gamma_x(x_m)[z_m - 1050] \end{aligned} \quad [3.1]$$

Les mesures effectuées sur la plaque à trous, qui est montée dans le plan des axes de mouvement X et Y , incluent l'effet constant des PGÉV de l'axe de mouvement Z . Les valeurs des paramètres $e_x(z_m)$ et $e_y(z_m)$ sont constantes.

L'effet des PGÉV angulaires $\gamma_y(y_m)$, $\gamma_z(y_m)$ et $\gamma_y(x_m)$ dans l'expression de x (relation [3.1]), est similaire et redondante avec les PGÉV de rectitude $e_x(x_m)$, $e_x(y_m)$. La même remarque peut être faite pour les paramètres $\gamma_z(x_m)$ dans l'expression de x et de $\gamma_x(y_m)$ et $\gamma_x(x_m)$, dans l'expression de y : leur effet est redondant avec celui de la rectitude $e_y(x_m)$. Quant à $\gamma_z(y_m)$, la configuration de la machine fait que son effet dans le plan des axes de mouvement X et Y est constant. Les relations de x et y restent de la forme suivante:

$$\begin{aligned} x &= x_m + e_x(x_m) + e_x(y_m) \\ y &= y_m + e_y(x_m) + e_y(y_m) + \gamma_z(y_m)[x_m] \end{aligned} \quad [3.2]$$

L'erreur de perpendicularité r_{xy} n'est pas considérée une variable indépendante, elle est incluse dans les PGÉV de rectitude. Supposons par exemple que les axes de mouvement X et Y ne présentent aucun paramètre géométrique à part l'erreur de perpendicularité r_{xy} . En considérant l'axe de mouvement X fixé, le paramètre r_{xy} va dévier l'axe Y_m de sa position Y comme montré à la figure 3.3. Les coordonnées du point P ont la forme suivante, en fonction des coordonnées mesurées.

$$x = x_m + \sin(r_{xy}) y_m \sim x_m + r_{xy} y_m \text{ pour } r_{xy} \ll 1 \quad [3.3]$$

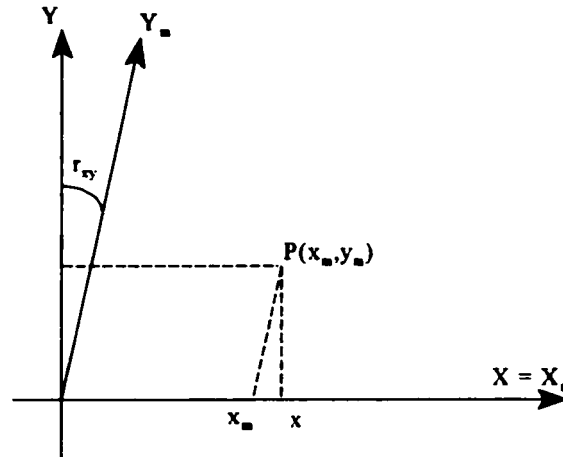


Figure 3.3 Représentation de l'erreur de perpendicularité pour la machine Matsuura, comme ayant l'effet d'une erreur de rectitude

Les PGÉV peuvent être représentés par des polynômes de Legendre de degré p . Par exemple,

$$\begin{aligned} e_x(y_m) &= \sum_0^p C_k (y_m)^k \\ \gamma_z(y_m) &= \sum_0^p C_k (y_m)^k \end{aligned} \quad [3.4]$$

Pour effectuer l'étalonnage des axes de mouvement horizontaux, on utilise la plaque à trous montrée à la figure 3.4. La plaque est montée sur la palette de la machine, en position horizontale. La plaque est centrée selon l'axe de mouvement X de la machine, le milieu de la plaque étant le milieu de la palette. Les mesures sont prises par rapport au centre du premier trou en haut à gauche, noté 'zéro' sur la figure. Les axes X et Y montrés à la figure 3.4 sont les axes de mouvement de la machine. Le palpeur avec lequel on effectue les mesures est monté dans la broche de la machine. On a utilisé un palpeur Renishaw et un rubis de diamètre de 5mm.

Le but du test est de mesurer à l'aide du palpeur, et en utilisant seulement les axes de mouvement X et Y de la machine, les distances nominales du centre de chaque trou au trou 'zéro' mesurées selon les axes cartésienes de la plaque. Le test est effectué dans un premier temps quand la plaque est orientée à 0° , et ensuite tournée à 90° .

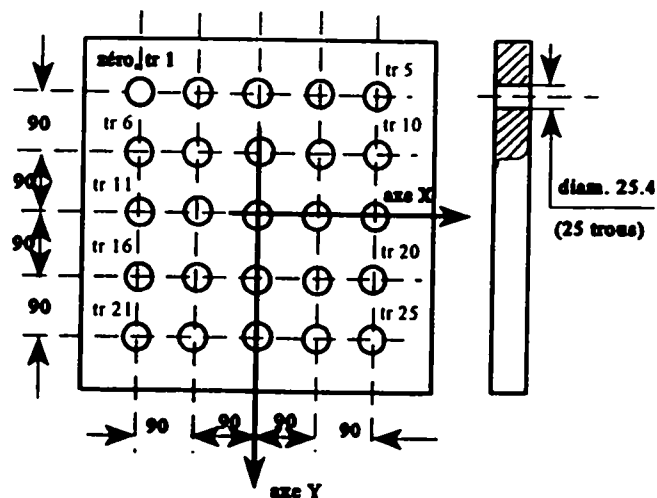


Figure 3.4 Représentation de la plaque à trous (en mm)

3.1.1.2 Procédure expérimentale

Précautions pratiques initiales

Le montage de la plaque a été fait en prenant beaucoup de précautions, pour l'appuyer isostatiquement et pour ne pas la déformer aux points de serrage. La plaque est montée sur un dispositif de montage conçu et usiné afin qu'il assure un bon alignement de la plaque selon l'axe de mouvement X de la machine-outil, et il permet le réglage de la plaque dans la direction verticale pour assurer son parallélisme avec le plan des axes horizontaux de la machine. Ainsi, la plaque est prévue, sur sa surface d'appui, avec 2 dispositifs colinéaires du

type manchons - vis de serrage - écrous, pour l'alignement et le centrage selon l'axe de mouvement X de la machine. Elle est prévue aussi avec 3 points d'appuis réglables à vis et équidistants sur un cercle centré au milieu de la plaque, pour l'orienter dans le plan horizontal. Les 4 points de serrage sont différents des points d'appui ou ceux d'alignement à cause de l'espace disponible sur la plaque, et ils ne sont pas serrés à fond, mais vissés légèrement, pour ne pas déformer la plaque.

L'alignement de la plaque selon l'axe de mouvement X et dans le plan XY est fait en utilisant un comparateur à cadran monté dans la broche, de résolution 0.001mm, et qui touche sur des poches fraisées sur la surface extérieure prévues à cet effet.

L'étalonnage du palpeur est fait conformément aux spécifications Renishaw sur ce type de machine. On a utilisé une bague étalon de 2.4 po pour l'étalonnage du palpeur à rubis sphérique, qui sera utilisé par la suite pendant les mesures. La machine va compenser automatiquement les valeurs trouvées pendant l'étalonnage.

Méthodologie

La plaque est alignée dans un premier temps, selon les axes de mouvement de la machine, tel qu'illustré à la figure 3.5. Le premier trou à gauche en haut est pris comme zéro des mesures. Les trous sont numérotés de gauche à droite, du haut vers le bas. Les mesures vont suivre l'ordre de numérotation des trous, de tr 1 à tr 25 (figure 3.4). Le palpeur descend dans chaque trou et touche les parois du trou en six points, tel que montré à la figure 3.5.

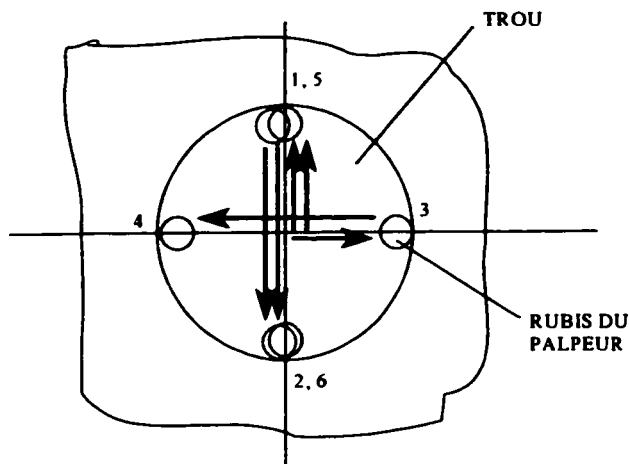


Figure 3.5 Vue du dessus d'un trou et représentation des points de touche, de 1 à 6, à l'intérieur du trou

Les positions des six points sont immédiatement traitées dans une commande "macro" Renishaw incluse dans le code G de la machine pour calculer le centre du trou. Les coordonnées x_m et y_m des centres de trous sont écrites directement dans un fichier ouvert de l'ordinateur qui est branché à la commande de la machine-outil. La procédure numérique est le calcul de la coordonnée du centre au milieu de chaque paire de mesures: Les mesures 1-2 fournissent la coordonnée y_m du centre du trou, les mesures 3-4 fournissent la coordonnée x_m du centre du trou, les mesures 5-6 fournissent la nouvelle coordonnée y_m améliorée du centre du trou.

Le trajet au complet a été répété 5 fois et on a utilisé la moyenne des mesures. Ensuite, dans le même montage, on a tourné la palette de 90° et on a refait les mesures, en suivant la même succession des trous, de tr 1 à tr 25. Ce trajet a été répété aussi 5 fois.

3.1.1.3 Procédure de calcul des paramètres géométriques d'écart

Les distances entre deux trous successifs sont notées avec d_i . Sur la plaque à trous considérée, on a quatre distances par rangée, donc vingt distances au total.

En tournant la plaque à 90° , les distances entre les trous devraient rester les mêmes qu'à 0°

pour des axes de mouvement qui ne présentent pas de paramètres géométriques. Cette hypothèse est basée sur les considérations suivantes :

- On considère les variations dues à la température comme étant zéro entre les deux positions de la plaque.
- Les axes de mouvement de la machine ont été chauffés en mouvement pendant plus d'une heure avant de commencer le test.
- Les mesures sont répétées cinq fois, ce qui nous permet le calcul d'une moyenne. Cette précaution est prise pour diminuer les effets aléatoires du palpeur et de la machine.
- La rigidité de la plaque et la façon qu'elle a été montée et appuyée sur la palette préviennent l'apparition d'autres erreurs systématiques, comme par exemple le fléchissement de la plaque.
- L'erreur de touche du palpeur est compensée par la procédure d'étalonnage du palpeur.

Cette hypothèse nous permet de conclure que les éventuelles différences entre les distances d_i à 0° et à 90° sont dues aux erreurs résultantes systématiques et aux erreurs aléatoires des axes de la machine. Ces différences peuvent être utilisées pour calculer les coefficients des erreurs résultantes systématiques de la machine-outil. Pour annuler les erreurs aléatoires, les coefficients ξ sont déterminés en minimisant la fonction $f(\xi)$ suivante :

$$f(\xi) = \sum_{i=1}^n (d_i(\xi) - d_{i,ref}(\xi))^2 + (d_{ref} - d_{ref,n})^2, i = 1 \text{ à } 47 \quad [3.5]$$

où la distance $d_i(\xi)$ est égale à :

$$d_i(\xi) = \sqrt{(x_{j+1}(\xi) - x_j(\xi))^2 + (y_{j+1}(\xi) - y_j(\xi))^2}, j = 1 \text{ à } 24 \quad [3.6]$$

L'indice j est le numéro de trous. Dans les relations ci-dessus la variable à déterminer par minimisation de la fonction $f(\xi)$ est le vecteur des coefficients ξ . Dans les expressions de x

et y , les paramètres géométriques sont remplacés par les polynômes correspondants de coefficients ξ et de degré p . Nous avons choisi le degré $p = 3$. Les coordonnées (x, y) seront des combinaisons linéaires de polynômes de Legendre et fonctions de ξ . En remplaçant ces fonctions $x_j(\xi)$ et $y_j(\xi)$ dans le calcul des distances entre les centres de trous, on obtient la fonction $d_i(\xi)$.

La différence entre une distance $d_i(\xi)$ quand la plaque est à 0° et la même distance quand la plaque est tournée de 90° , $d_{i,rot}(\xi)$, devrait être nulle, dans des conditions géométriques idéales. La fonction à minimiser est la somme des carrés de ces différences, à laquelle on ajoute le carré de l'erreur de mesure d'une longueur de référence connue, $(d_{ref} - d_{ref,n})$. Ce terme est nécessaire parce que la plaque à trous n'est pas connue avant de l'utiliser sur la machine-outil, elle n'a pas été étalonnée sur une machine à mesurer tridimensionnelle, ni par un autre moyen de métrologie. La longueur connue $d_{ref,n}$ est déterminée par un moyen suffisamment précis de métrologie à l'extérieur de la machine-outil, et elle est prise soit sur un artefact différent de la plaque, soit sur la plaque elle-même. Sa valeur doit être assez grande pour couvrir l'espace de travail dans une orientation quelconque. La valeur d_{ref} est obtenue en mesurant la longueur de référence sur la machine-outil. Pendant notre expérience, nous avons mesuré cette longueur de référence à 45° dans le plan horizontal, entre deux trous de distance étalonnée de la plaque.

3.1.1.4 Paramètres géométriques obtenus et graphiques

Les paramètres géométriques déterminés par la procédure sont :

- le PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement X, $e_x(x_m)$,
- le PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y, $e_y(x_m)$,
- le PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement Y dans la direction X, $e_x(y_m)$,
- le PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement Y, $e_y(y_m)$ et

-le lacet de l'axe de mouvement Y , $\gamma_z(y_m)$.

La variation de ces paramètres en fonction de la position articulaire est montrée dans les figures suivantes (figures 3.6 à 3.10).

Les résiduels après étalonnage obtenus sur les valeurs $d_i(\xi) - d_{i,rot}(\xi)$ varient entre ± 0.001 mm.

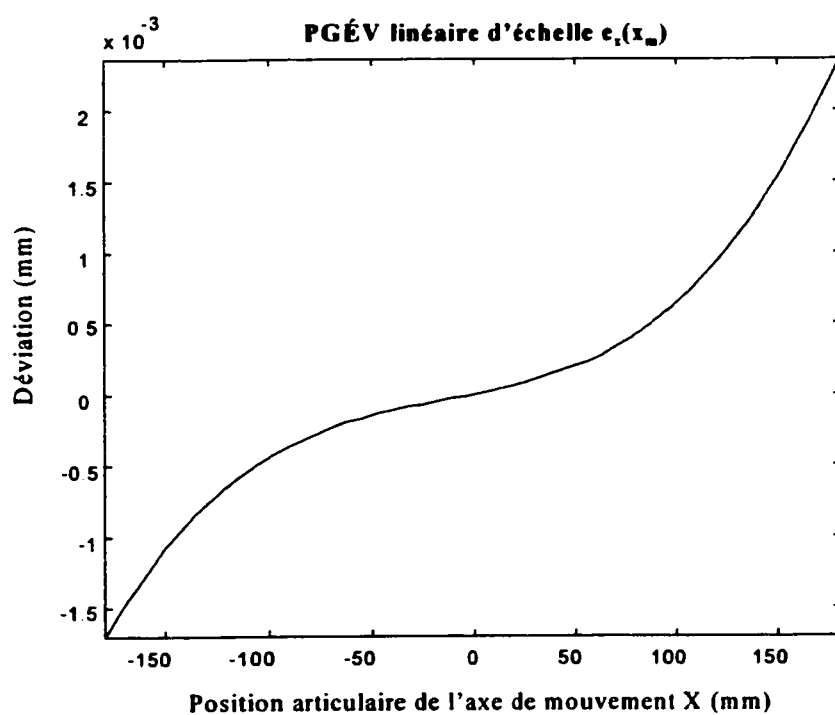


Figure 3.6 Graphe du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement X, $e_x(x_m)$

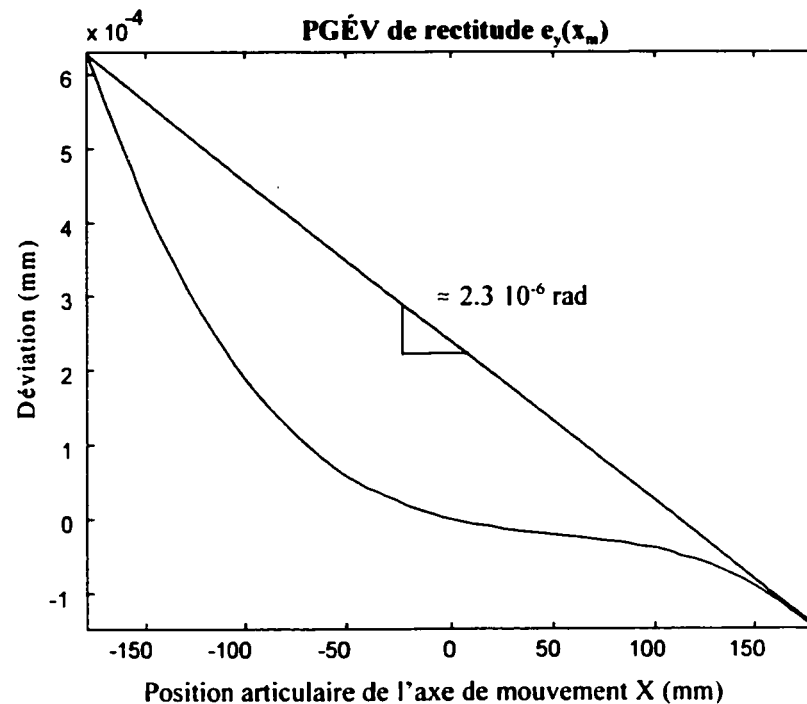


Figure 3.7 Graphe du PGÉV de rectitude l'axe de mouvement X dans la direction Y.
 $e_y(x_m)$

Les figures 3.7 et 3.8 montrent les pentes des paramètres obtenues. Ces pentes sont l'effet d'erreurs de perpendicularité entre les axes de mouvement. L'erreur de perpendicularité entre les axes de mouvement X et Y peut être obtenue en faisant la différence entre les PGÉV de rectitude $e_y(x_m)$ et $e_x(y_m)$.

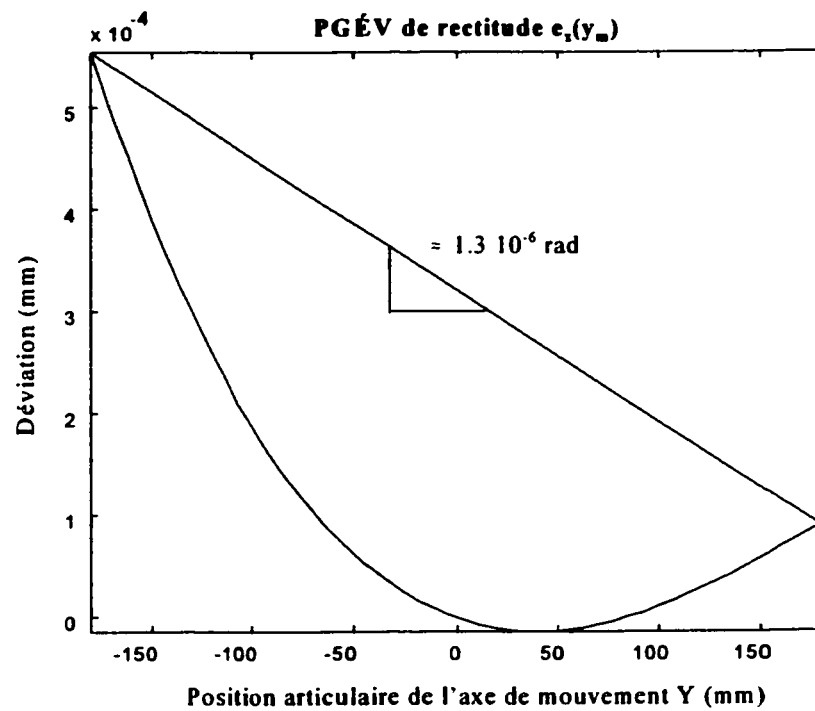


Figure 3.8 Graphe du PGÉV de rectitude l'axe de mouvement Y dans la direction X, $e_x(y_m)$

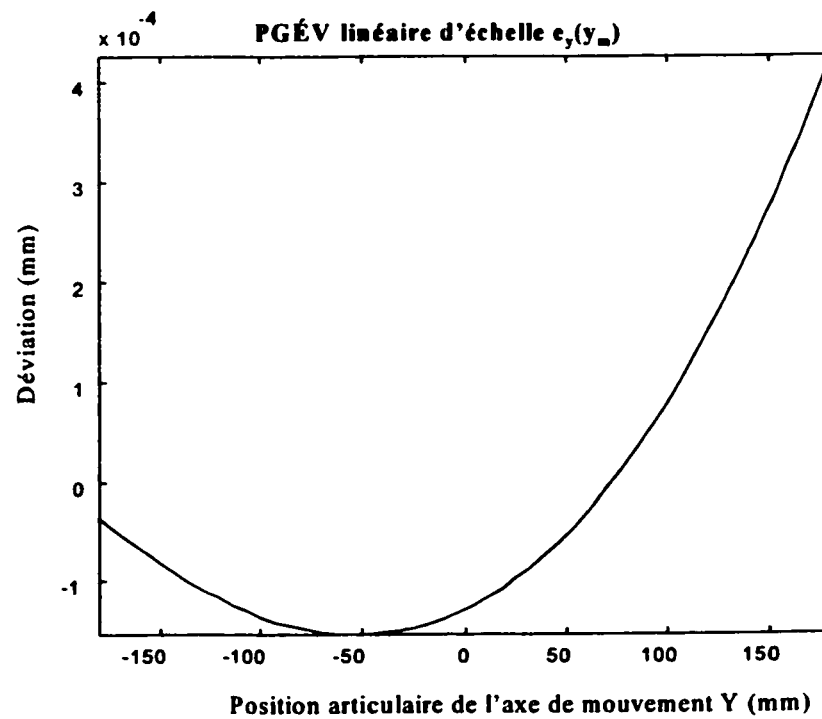


Figure 3.9 Graphe du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement Y, $e_y(y_m)$

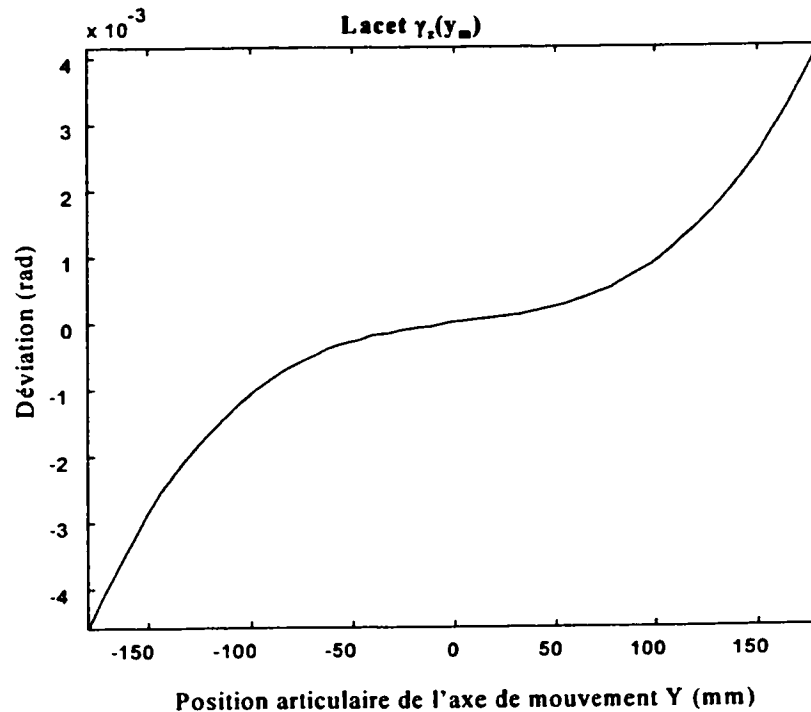


Figure 3.10 Graphe du lacet de l'axe de mouvement Y autour de Z, $\gamma_z(y_m)$

3.1.2 Mesures obtenues en utilisant l'artefact à marches. Le processeur du niveau 1

3.1.2.1 Artefact utilisé

Le diagnostic de l'état géométrique de la machine-outil, conformément aux concepts développés dans le modèle présent, est fait en utilisant un artefact à marches et une stratégie de palpé, qui permettent de conclure sur l'état géométrique de chaque axe de mouvement de la machine, sur la sensibilité des tests à certains paramètres géométriques, et éventuellement sur l'état général de la machine.

Dans le cadre de l'expérience présente, qui a pour but la validation du modèle, on a construit un artefact à marches qui peut être aligné selon l'un des axes de mouvement X ou Y de la machine-outil. L'artefact est montré à la figure 3.11.

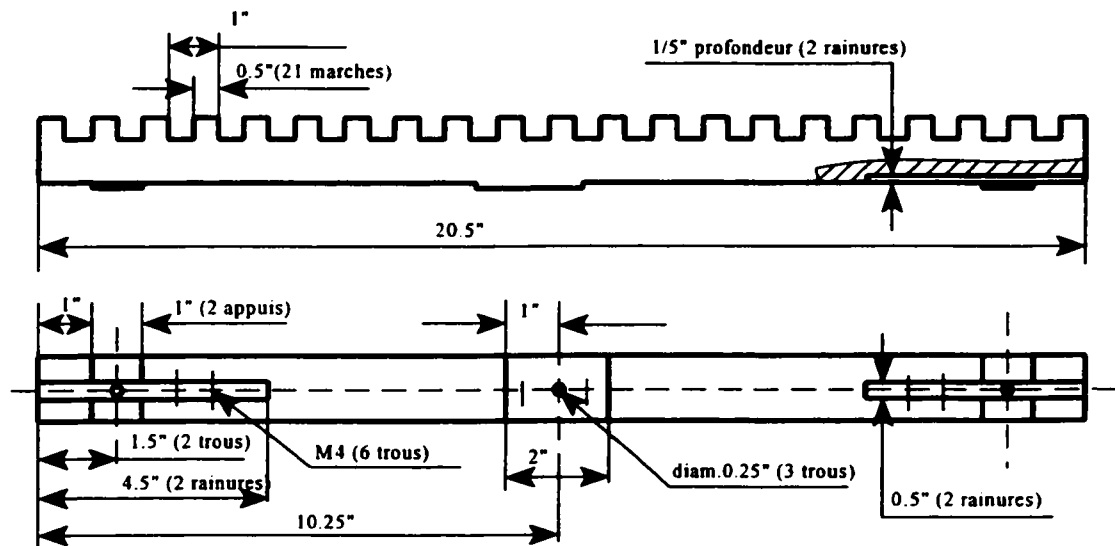


Figure 3.11 Schéma de l'artefact linéaire à marches

La vue de dessous montre la façon par laquelle l'artefact a été centré et appuyé sur la palette. Dans les deux rainures longitudinales nous avons centré et vissé deux clavettes qui ont servi à monter l'artefact dans les rainures radiales en T de la palette.

3.1.2.2 Stratégie de palpage

L'artefact est d'abord aligné selon l'axe de mouvement X de la machine-outil. Les trois tests qui sont exécutés dans cette position sont :

- Test 1 - le palpeur descend entre les marches et touche dans la direction X ;
- Test 2 - le palpeur touche la surface latérale de chaque marche dans la direction Y ;
- Test 3 - le palpeur touche la surface d'en haut de chaque marche dans la direction Z.

Ensuite, la palette est tournée de 90°, pour aligner l'artefact selon l'axe de mouvement Y.

Les tests réalisés dans cette position sont les suivants :

- Test 4 - le palpeur touche la surface latérale de chaque marche dans la direction X ;
- Test 5 - le palpeur descend entre les dents et touche dans la direction Y ;

Test 6 - le palpeur touche la surface d'en haut de chaque marche dans la direction Z.

La stratégie est modélisée sur CATIA, en générant la succession des points de chaque test, la succession des tests et les trajets de palpation. Cette stratégie est exécutée, dans un premier temps, sur la machine à mesurer tridimensionnelle, pour obtenir les valeurs de lecture de touche ω_{mmt} . Chacun des tests est répété 5 fois pour permettre le calcul d'une moyenne des valeurs mesurées. Ensuite la même stratégie est exécutée sur la machine-outil, et on obtient de nouveau la moyenne des 5 mesures, les valeurs ω_{act} .

3.1.2.3 Résultats et conclusions de la stratégie de palpation

Les données de palpation ω représentent l'effet cumulé des petites déviations géométriques présentes dans les axes de la machine-outil et agissent aux points de mesure. Ces erreurs résultantes ω , qui varient en fonction de la coordonnée articulaire de l'axe en mouvement, sont égales à:

$$\omega = \omega_{\text{act}} - \omega_{\text{mmt}} \quad [3.7]$$

Les erreurs résultantes contiennent aussi l'effet des paramètres géométriques des autres axes qui ne sont pas en mouvement pendant le test, effet qui se concrétise sur la courbe de variation par un effet constant ou linéaire.

Les erreurs résultantes de rectitude contiennent aussi l'effet des erreurs de perpendicularité entre les axes de mouvement X et Y et celui d'une éventuelle déviation d'alignement de l'artefact selon l'axe du test. Le cumul de ces effets se matérialise sur le graphique comme la pente d'inclinaison entre une droite des moindres carrés qui est l'approximation de la courbe et l'abscisse. Le processeur du niveau 1 enlève les effets des paramètres géométriques

d'écart qui ne dépendent pas de l'axe en mouvement du test, c'est-à-dire il annule le biais et la pente de la courbe de ω , et le résultat de ce traitement est une courbe $\Delta\omega$.

Par contre, les erreurs résultantes d'échelle, obtenues quand la direction de touche coïncide avec l'axe de mouvement, sont des erreurs qui peuvent varier selon une pente, alors le processeur annule l'effet constant seulement, laissant l'effet de pente contenue dans l'erreur résultante d'échelle de l'axe. Par exemple, la figure 3.12 montre la variation des valeurs ω et $\Delta\omega$ pour le test 1. Dans cette figure, la courbe 1 représente la variation des valeurs ω en fonction de la position de l'axe de mouvement X.



Figure 3.12 Représentation de l'erreur résultante de l'axe de mouvement X dans la direction X, avant et après le traitement des données par le processeur du niveau 1

La courbe 2 représente la variation $\Delta\omega$ en fonction de la position articulaire. Les explications complètes du fonctionnement du processeur sont données à la section 2.1. Le traitement

appliqué aux erreurs résultantes d'échelle, comme c'est le cas ici, est d'annuler le biais des valeurs ω , ce qui correspond à l'annulation de l'effet constant des paramètres géométriques d'écart appartenant aux autres axes de mouvement de la machine.

Un deuxième exemple parmi les courbes obtenues pour la machine Matsuura est donné à la figure 3.13.

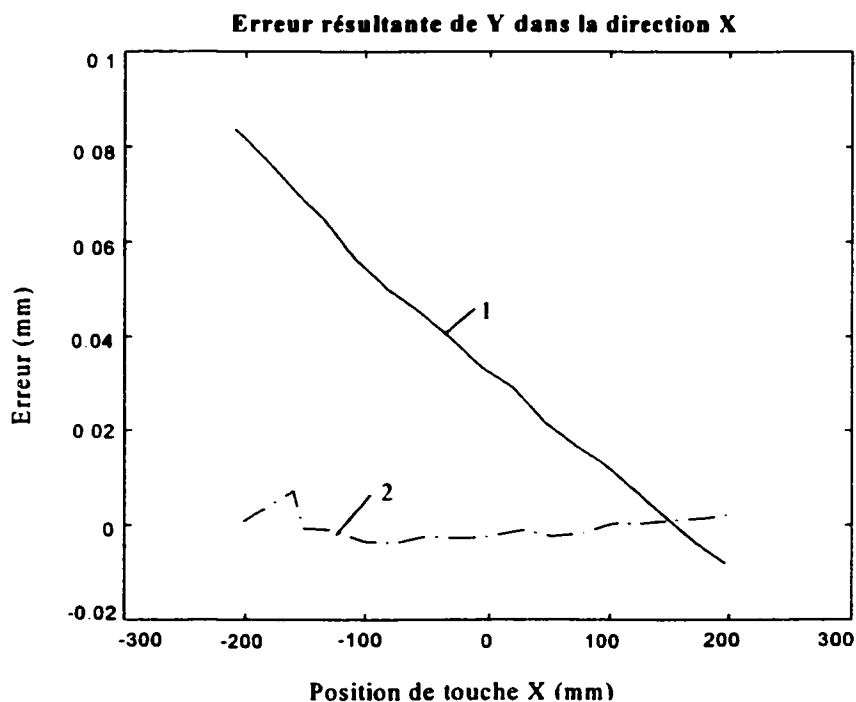


Figure 3.13 Représentation de l'erreur résultante de l'axe de mouvement Y dans la direction X

Ce deuxième exemple démontre le fonctionnement du processeur du niveau 1 dans le cas d'une erreur résultante de rectitude. Les valeurs $\Delta\omega$, représentées par la courbe 2, sont obtenues en annulant le biais ainsi que la pente de la variation de la courbe 1 des valeurs ω .

3.1.3 Calcul des erreurs résultantes en utilisant les valeurs des paramètres géométriques d'écart identifiés suite à l'étalonnage

Le calcul de l'effet cumulé des paramètres géométriques d'écart, en les propageant dans les points de l'espace de travail qui correspondent aux points de touche de l'artefact linéaire tel que montré à la section précédente, est fait en considérant la cinématique directe de la machine-outil.

Nous allons reprendre les relations largement utilisées dans la simulation du comportement géométrique d'une machine-outil tel que montré au chapitre 2.

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \mathbf{q}_{act} \quad [3.8]$$

L'erreur résultante $\mathbf{f}$ calculée dans un point de l'espace de travail, est le produit de la matrice jacobienne spécifique à la machine-outil et la matrice-colonne des paramètres géométriques d'écart variables notée par $\mathbf{q}_{act}$.

L'erreur mesurée sur l'artefact $\mathbf{f}_{act}$, inclut à la fois l'erreur géométrique de la machine $\mathbf{f}$, et l'erreur géométrique de la pièce-même ω_{mt} . Par conséquent, l'erreur $\mathbf{f}$ est égale à:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_{act} - \omega_{mt} \quad [3.9]$$

La figure 3.14 représente la variation des erreurs résultantes $\mathbf{f}$ calculées aux mêmes points que ceux de touche de la stratégie de palpé pour l'artefact linéaire, ainsi que le résultat du traitement de ces valeurs par le processeur du niveau 1. Le premier exemple est celui de l'erreur résultante d'échelle de l'axe de mouvement X.

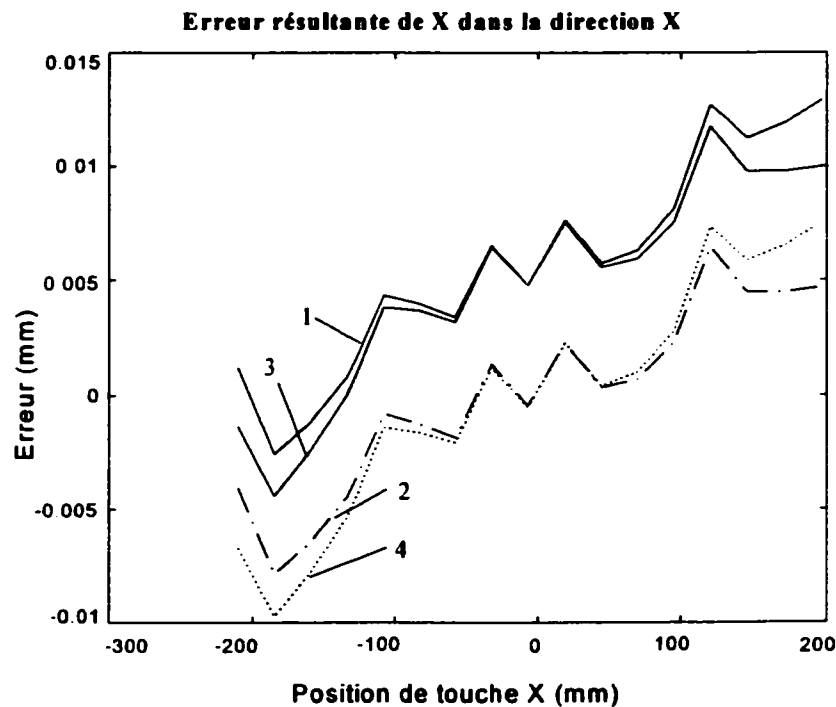


Figure 3.14 Représentation de l'erreur résultante d'échelle de l'axe de mouvement X.

Les courbes 1 et 2 sont les courbes reprises de la figure 3.12 tracées suite aux mesures de palpé effectuées sur l'artefact linéaire. La courbe 3 représente la variation de l'erreur résultante calculée f aux points de l'artefact linéaire, et la courbe 4 représente les erreurs f traitées par le processeur du niveau 1. Les courbes 1 et 3 sont très près l'une de l'autre et elles ont une forme similaire. La même remarque peut être faite pour les courbes 2 et 4. Cette comparaison confirme la validité de l'utilisation d'un artefact linéaire à marches et du traitement des données mesurées conformément à la méthode originale proposée. Des résultats similaires positifs ont été obtenus en comparant les courbes pour l'erreur résultante d'échelle de l'axe de mouvement Y, ainsi que pour les erreurs résultantes de rectitude des axes de mouvement X et Y. À titre d'exemple, les courbes de l'erreur résultante de rectitude de l'axe Y dans la direction X sont montrées à la figure 3.15.

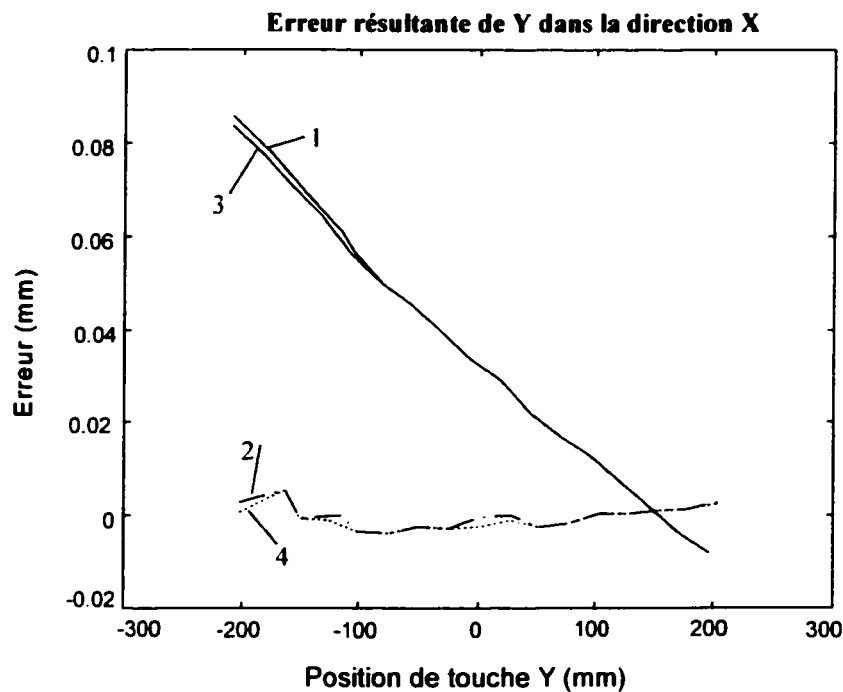


Figure 3.15 Représentation de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement Y dans la direction X

La courbe 1 est la variation de ω en fonction de la position articulaire de Y. La courbe 2 représente le résultat $\Delta\omega$ du traitement du processeur. La courbe 3 est la variation des erreurs résultantes f calculées à partir des PGÉV connus des axes. La courbe 4 représente les données de sortie du processeur suite au traitement appliqué aux valeurs f . Les courbes obtenues en utilisant l'artefact linéaire sont presque superposées sur celles obtenues en utilisant le modèle direct étalonné avec la plaque à trous.

Les deux autres variations comparées des erreurs résultantes, celle de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y et celle d'échelle de l'axe de mouvement Y, sont présentées à l'annexe F. La même annexe contient les deux graphiques de variations des axes de mouvement X et Y dans la direction Z. Ces deux derniers ne peuvent pas être comparés avec des courbes correspondantes calculées à partir des paramètres étalonnés, parce que l'étalonnage de la machine a seulement été effectué dans le plan horizontal.

3.1.4 Étalonnage de l'axe de mouvement C de la machine-outil

3.1.4.1 Introduction

L'étalonnage de l'axe de mouvement C est fait en utilisant les données obtenues suite à l'étalonnage des axes de mouvement X et Y de la machine-outil. L'axe de mouvement C possède six PGÉV et son orientation dans l'espace peut avoir deux erreurs de perpendicularité, une par rapport à l'axe de mouvement X et l'autre par rapport à l'axe de mouvement Y.

À la cinématique déjà connue des axes de mouvement X et Y, il faut ajouter l'axe de mouvement C. Pour traiter ce cas, une machine à trois axes de mouvement est créée: deux linéaires et un de rotation de la palette (figure 3.16).

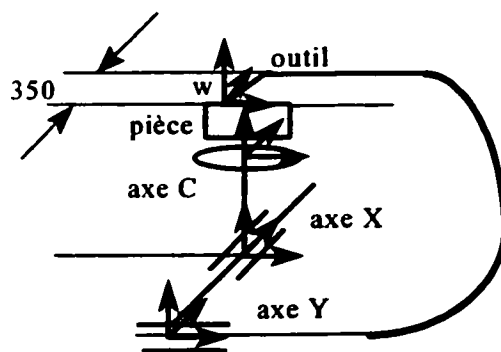


Figure 3.16 Représentation schématique de la machine Matsuura dans la variante à 2 axes de mouvement linéaires plus un axe de mouvement de rotation

Les relations suivantes sont obtenues en multipliant les matrices de transformation correspondantes à la configuration CXYF, c'est-à-dire l'axe de mouvement C de la palette monté sur l'axe linéaire X, qui est monté à son tour sur l'axe de mouvement Y.

$$x = x_m \cos(c_m) - y_m \sin(c_m) + e_x(x_m) + e_x(y_m) + e_x(c_m) \cos(c_m) - e_y(c_m) \sin(c_m) + \gamma_z(c_m) [-x_m \sin(c_m) + y_m \cos(c_m)]$$

$$y = x_m \sin(c_m) + y_m \cos(c_m) + e_y(x_m) + e_y(y_m) + \gamma_z(y_m)[x_m \cos(c_m) - y_m \sin(c_m)] + \gamma_z(c_m)[x_m \cos(c_m) - y_m \sin(c_m)]$$

[3.10]

En suivant le même raisonnement qu'à la section 3.1.1. consacrée à l'étalonnage des axes de mouvement X et Y, les erreurs de perpendicularité entre l'axe de mouvement C et les axes de mouvement X et Y ne sont pas considérées comme des variables indépendantes mais elles sont incluses dans les PGÉV de rectitude.

Les PGÉV des axes de rotation seront toujours des polynômes de degré p mais dans ce cas la variable sera une fonction sinusoïdale de la position angulaire. Par exemple,

$$\begin{aligned} e_x(c_m) &= \sum_1^p \xi_k (\sin(c_m))^k \\ \gamma_z(c_m) &= \sum_1^p \xi_k (\sin(c_m))^k. \quad p = 20 \end{aligned} \quad [3.11]$$

Les sommes des polynômes de la forme $\sum_1^p \xi_k (\sin(c_m))^k$ peuvent être développées (Bach, 1993) et leur approximation possède la forme suivante :

$$\sum_1^p \xi_k (\sin(c_m))^k \sim \sum_1^p (\mu_k \sin(kc_m) + v_k \cos(kc_m)) \quad [3.12]$$

Ce développement est utile pour améliorer le calcul de la fonction de minimisation.

3.1.4.2 Procédure expérimentale

Pour réaliser l'étalonnage de l'axe de mouvement C, la même plaque à trous que pour l'étalonnage des axes de mouvement X et Y est utilisée. On choisit sur la plaque la rangée

de trous qui passe par l'axe de mouvement de rotation de la palette. On fait tourner la palette en tournant l'axe de mouvement C de $22,5^\circ$, de 0° à 90° , et ensuite de 0° à -90° . À chaque nouvelle position de la plaque, les centres de trous appartenant à la rangée choisie sont mesurés de nouveau. La figure 3.17 présente un schéma de la procédure de mesure. La rangée des centres de trous à mesurer est celle montrée dans cette figure. En tournant la palette, les trous tournent aussi de $22,5^\circ$.

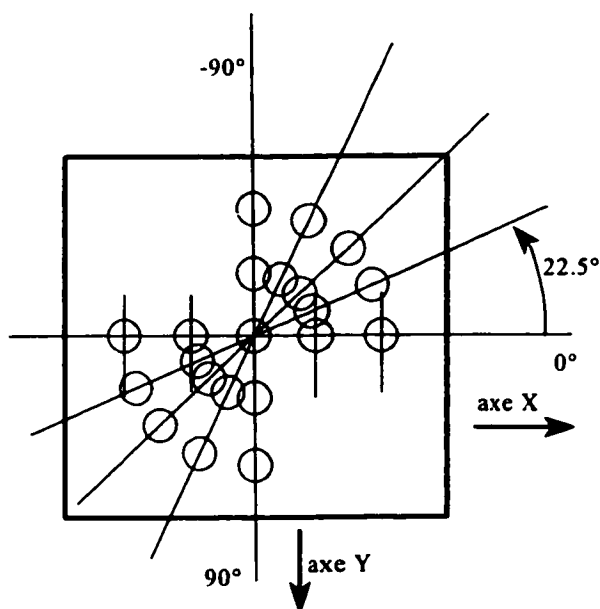


Figure 3.17 Schéma de la procédure de palpation sur la rangée centrale de la plaque à trous, pour effectuer l'étalonnage de l'axe de mouvement C de la palette

3.1.4.3 Procédure de calcul des paramètres géométriques d'écart

Les mêmes hypothèses et les mêmes considérations théoriques que pour l'étalonnage des axes de mouvement linéaires sont considérées ici. La fonction de minimisation a la même forme qu'à la section 3.1.1. Les variables à déterminer par minimisation sont les coefficients μ et ν des polynômes des PGÉV. Les valeurs des paramètres déjà connus suite à l'étalonnage

des axes de mouvement linéaires, comme par exemple $e_x(x_m)$, $e_x(y_m)$ ou $\gamma_z(y_m)$, seront calculées aux points nécessaires et ensuite elles seront introduites dans les expressions de x et y de la relation [3.10].

$$f(A,B) = \sum_{i=1}^n (d_i(\mu,v) - d_{i,rot}(\mu,v))^2 + (d_{ref} - d_{ref,n})^2, i = 1 \text{ à } 36 \quad [3.13]$$

Les différences au carré à minimiser sont entre les distances $d_i(\mu,v)$ à 0° et les distances $d_{i,rot}(\mu,v)$ à 22.5° , puis les différences entre les $d_i(\mu,v)$ à 22.5° et $d_{i,rot}(\mu,v)$ à 45° et ainsi de suite jusqu'à 90° . À la somme de ces différences, on ajoute la somme des différences au carré entre les distances $d_i(\mu,v)$ à 0° et $d_{i,rot}(\mu,v)$ à -22.5° , celle des différences entre $d_i(\mu,v)$ à -22.5° et -45° et ainsi de suite jusqu'à -90° . Pour calculer la fonction de minimisation $f(\mu,v)$, on ajoute à la somme $\sum_{i=1}^n (d_i(\mu,v) - d_{i,rot}(\mu,v))^2$, le carré de l'erreur de la longueur de référence.

3.1.4.4 Paramètres géométriques obtenus et graphiques

Les paramètres géométriques déterminés sont :

- le PGÉV radial de l'axe de mouvement C dans la direction X, $e_x(c_m)$,
- le PGÉV radial de l'axe de mouvement C dans la direction Y, $e_y(c_m)$,
- le PGÉV angulaire d'échelle de l'axe de mouvement C, $\gamma_z(c_m)$.

Les figures 3.18 à 3.20 présentent les résultats pour ces trois paramètres.

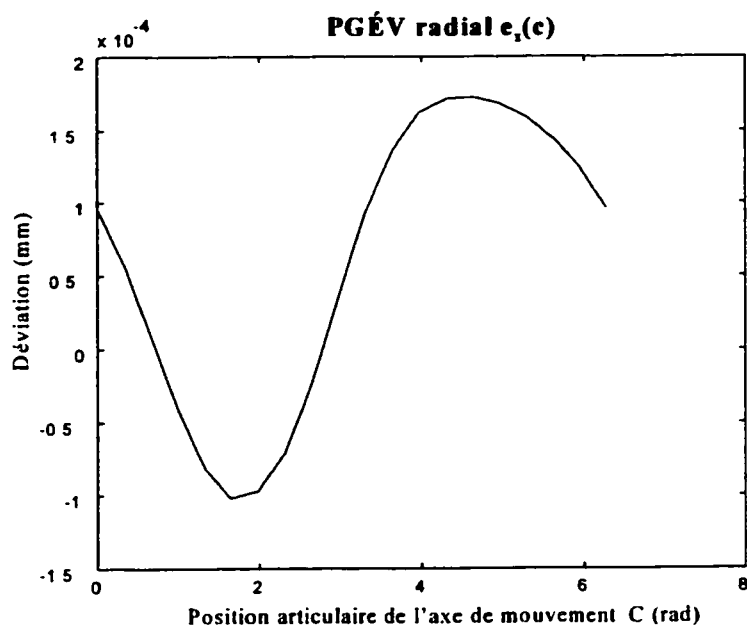


Figure 3.18 Graphe du PGÉV radial de l'axe de mouvement C dans la direction X, $e_x(c)$

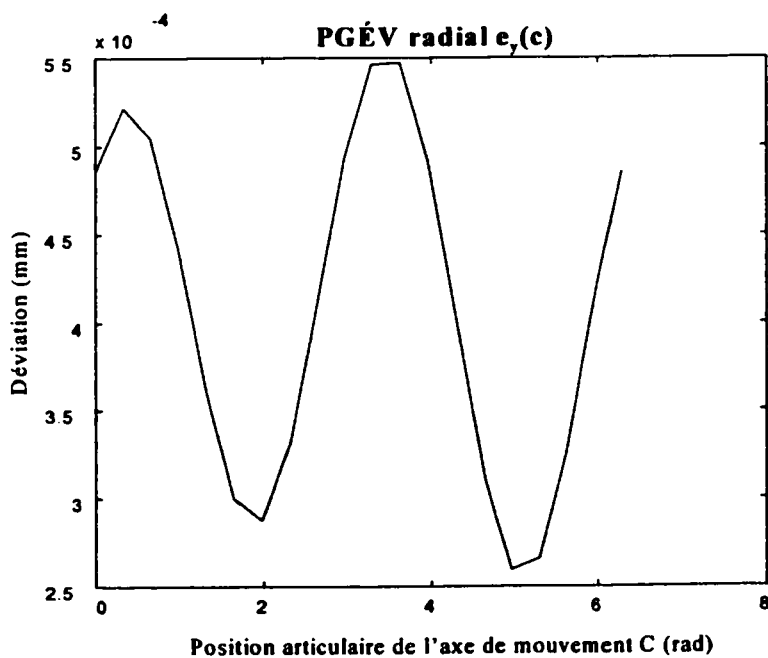


Figure 3.19 Graphe du PGÉV radial de l'axe de mouvement C dans la direction Y, $e_y(c)$

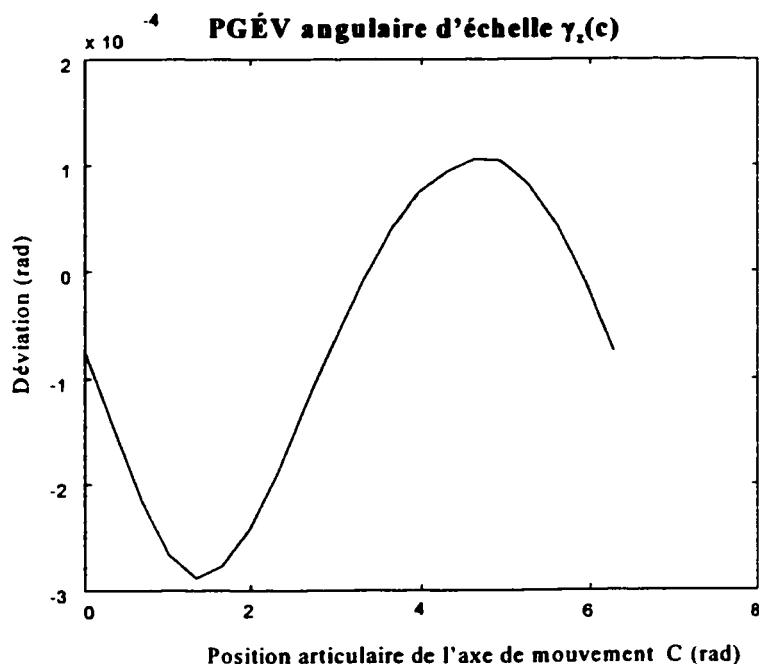


Figure 3.20 Graphe du PGÉV angulaire d'échelle de l'axe de mouvement C, $\gamma_1(c)$

3.1.5 Mesures obtenues en utilisant l'artefact circulaire. Processeur du niveau 1

3.1.5.1 Artefact utilisé

Après avoir mesuré les axes de mouvement X et Y à l'aide de l'artefact linéaire à marches, un artefact circulaire a été construit pour faire le diagnostic de l'état géométrique de l'axe de mouvement C de la palette. L'artefact a la forme d'une couronne avec des rainures sur sa surface latérale (voir figure 3.21).

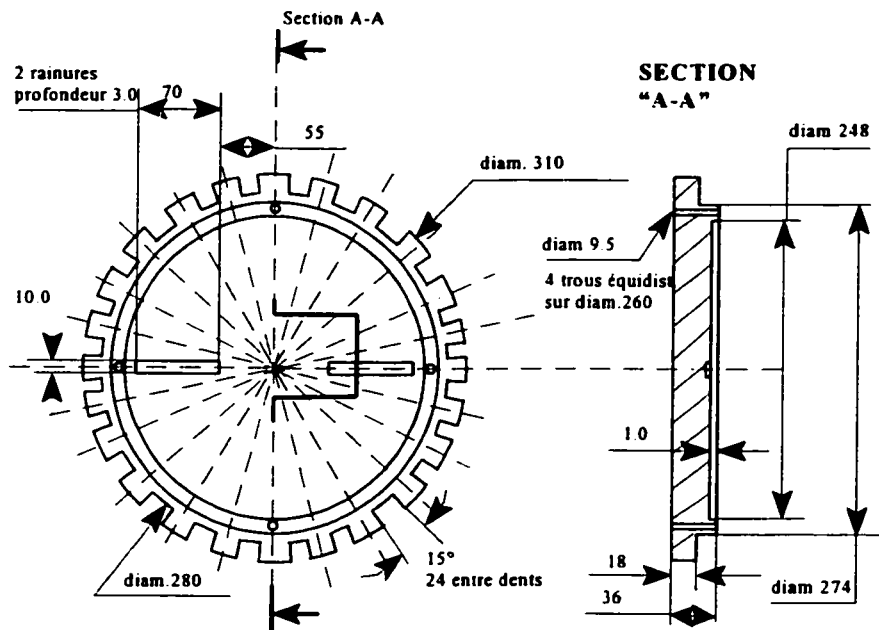


Figure 3.21 Schéma de l'artefact circulaire

Les dimensions dans la figure 3.21 sont en mm.

3.1.5.2 Stratégie de palpage

Le premier test consiste en l'alignement de l'artefact de telle façon qu'il soit possible de toucher la surface à l'intérieur des dents dans la direction X, à chaque incrément d'angle de 15° de l'axe de mouvement C.

La figure 3.22 montre le schéma de mesure de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction X. Le palpeur touche la surface intérieure de la dent en l'approchant selon X. Après la touche, le palpeur remonte selon l'axe de mouvement Z suffisamment pour permettre à la palette, sur laquelle est monté l'artefact circulaire, de tourner de 15° . L'angle de 15° est l'angle entre deux dents. La surface de touche de la dent est alignée selon l'axe de mouvement Y.

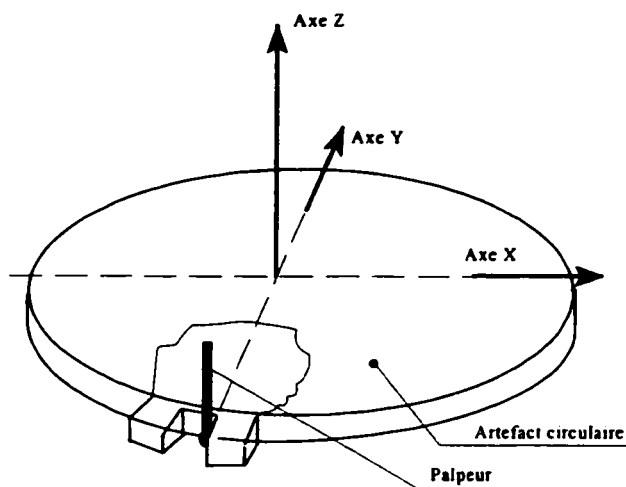


Figure 3.22 Schéma de mesure de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction X.

Dans le deuxième test, le palpeur touche dans la direction Y. La surface de touche de la dent est alignée selon l'axe de mouvement X (figure 3.23).

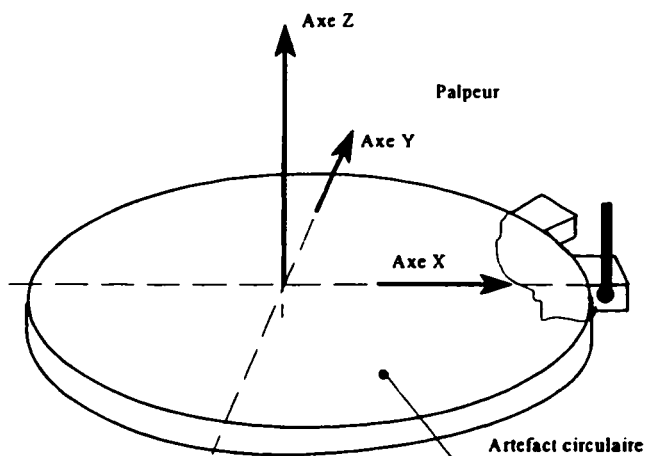


Figure 3.23 Schéma de mesure de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction Y

Le troisième test est pour déterminer l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction Z (figure 3.24).

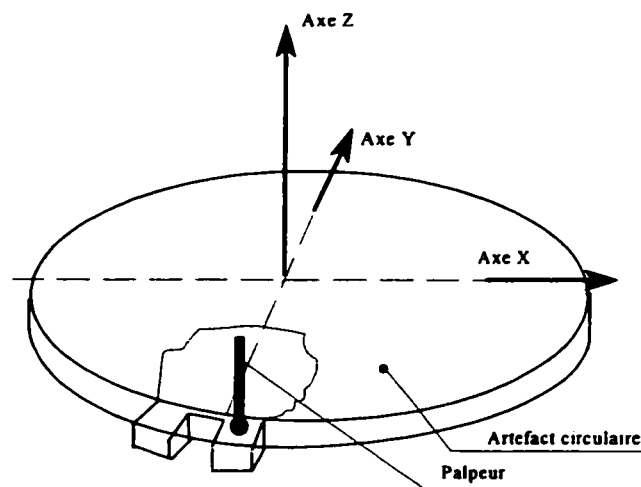


Figure 3.24. Schéma de mesure de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction Z

3.1.5.3 Résultats et conclusions

Les erreurs résultantes de l'axe de mouvement C sont :

$$\omega = \omega_{act} - \omega_{mt} \quad [3.14]$$

où ω_{act} sont les valeurs mesurées sur l'artefact monté sur la machine-outil. ω_{mt} sont les valeurs mesurées aux mêmes points de l'artefact sur la machine à mesurer tridimensionnelle.

Le processeur du niveau 1 enlève, comme pour les axes de mouvement linéaires X, Y ou Z, l'effet cumulé des autres axes de mouvement, des erreurs de perpendicularité ou parallélisme et du mauvais alignement de l'artefact selon les axes de mouvement linéaires. En plus, pour l'expérience présente, le montage de l'artefact peut causer une excentricité du centre de l'artefact par rapport au centre de la palette. L'effet de cette excentricité est analysé dans ce qui suit.

Estimation de l'effet de l'excentricité de montage de l'artefact sur la machine

On considère, dans le schéma de la figure 3.25, que O est le centre théorique de rotation de l'axe de mouvement C et A est le centre de l'artefact. La direction de palpation est orientée comme dans la figure. L'excentricité de l'artefact par rapport à l'axe de mouvement C et projetée sur la direction de palpation est notée avec e . Le palpeur touche la première dent au point P. En tournant l'artefact de m degrés, le palpeur devrait toucher la deuxième dent au même point P s'il n'y avait pas d'excentricité. En réalité, la deuxième dent est touchée au point P'. C'est la déviation PP' qui va fausser les mesures sur les dents consécutives à la première dent.

En tournant l'artefact autour de O, le point A se rend au point A'. Les points P' et A' sont sur la même droite qui est perpendiculaire à l'axe AO. Pour une démonstration mathématique plus détaillée, voir Reason, R.E., 1966. La déviation PP' est égale à:

$$PP' = e (1 - \cos(m)) \quad [3.15]$$

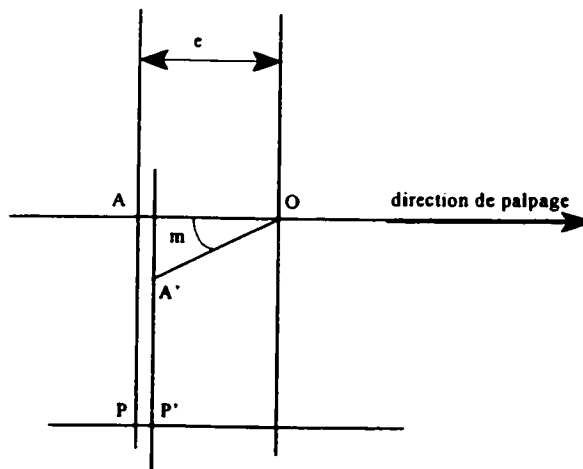


Figure 3.25 Schéma de déviation du point de palpation P quand l'artefact est tourné de l'angle m .

En écrivant l'expression de la déviation due à l'excentricité sous la forme:

$$PP' = e - e \cos(m), \quad [3.16]$$

l'effet de la partie constante e de PP' a été annulé par le traitement d'enlèvement du biais du processeur. L'effet de la partie variable de PP' c'est-à-dire $e \cos(m)$, reste inclus dans le résultat du processeur $\Delta\omega$.

La figure 3.26 suivante montre pour le palpé dans la direction X la variation de l'erreur résultante ω , la courbe 1, et la variation de l'erreur résultante post-processeur $\Delta\omega$, la courbe 2, en fonction de la coordonnée articulaire de l'axe de mouvement C.

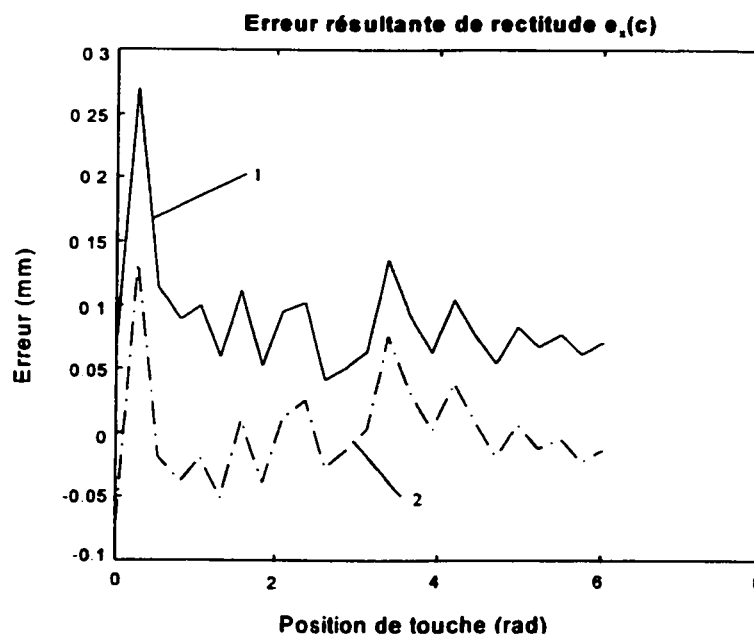


Figure 3.26 Variation de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction X, $e_x(c)$

La figure 3.27 représente la variation de l'erreur résultante ω , et l'erreur après traitement $\Delta\omega$, quand le palpeur touche dans la direction Y. Comme auparavant, la courbe 1 représente la

variation de ω et la courbe 2 la variation de $\Delta\omega$, en fonction de l'angle effectué par C.

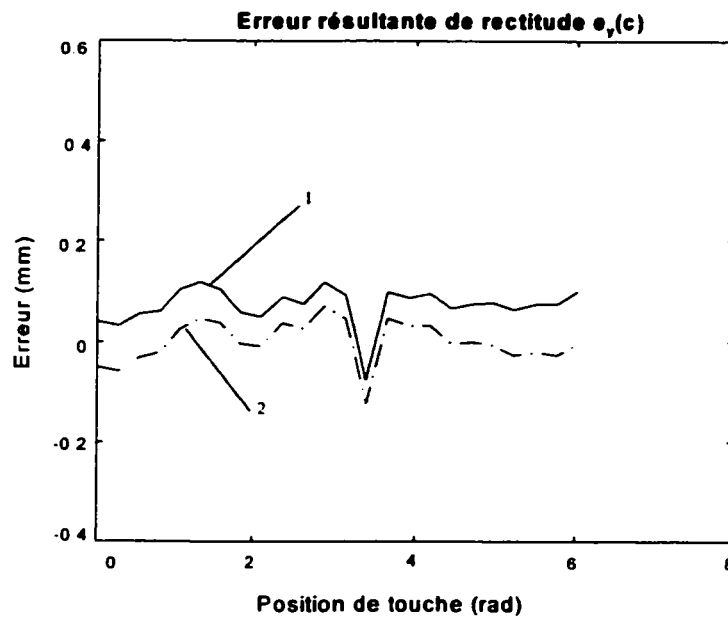


Figure 3.27 Variation de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction Y, $e_y(c)$

Un dernier test mesure les erreurs résultantes de l'axe de mouvement C dans la direction Z (figure 3.28).

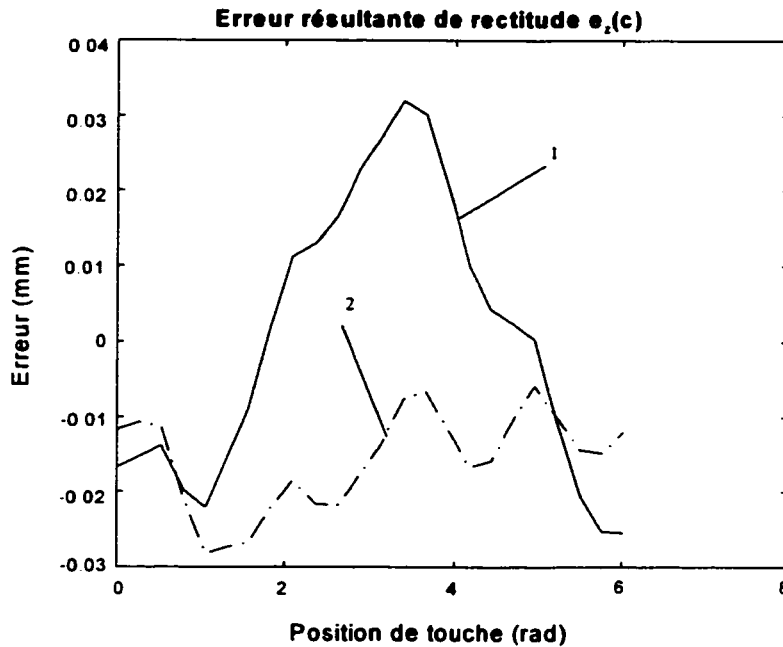


Figure 3.28. Variation de l'erreur résultante de rectitude de l'axe de mouvement C dans la direction Z, $e_z(c)$

Dans l'analyse de l'effet de l'excentricité effectuée jusqu'ici, on a considéré l'excentricité linéaire seulement, conformément à la figure 3.25. L'erreur angulaire d'alignement de l'artefact dans le plan horizontal (voir figure 3.29) est considéré négligeable dans le cas de cette construction d'artefact.

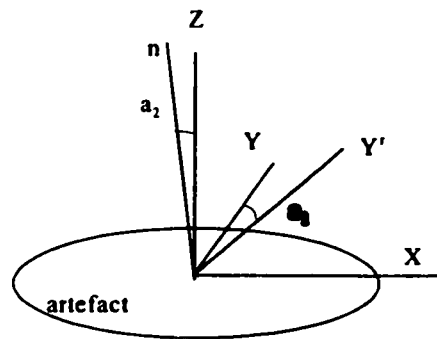


Figure 3.29. Situation possible de mauvais alignement angulaire

Dans un cas général indépendant de la construction de l'artefact, une erreur d'alignement a_1 est présente dans les valeurs mesurées et le modèle est incapable d'enlever son effet. L'erreur d'alignement a_2 dans le plan vertical est l'angle entre la normale réelle de l'artefact et l'axe de mouvement Z (voir figure 3.29). Cette dernière erreur influence les mesures, et elle a un effet sinusoïdale. Par conséquent, cet effet peut être annulé pendant le traitement effectué par le processeur

3.1.6 Calcul des erreurs résultantes des axes de mouvement en utilisant les valeurs des PGÉV obtenus suite à l'étalonnage; comparaison avec les valeurs mesurées

En faisant des tests de l'axe de mouvement C sur la machine Matsuura, on utilise au total 3 axes de mouvement de la machine: les deux axes de mouvement linéaires X et Y, identifiés avec la stratégie de la plaque à trous explicitée à la section 3.1.1, et l'axe de mouvement de rotation C identifié selon la stratégie de la section 3.1.4. Les PGÉV sensibles à l'identification effectuée sont tous ceux mentionnés déjà aux sections 3.1.1 et 3.1.4.

Nous voulons propager les PGÉV identifiés q_{act} aux points de l'artefact circulaire et ensuite comparer les erreurs obtenues f , avec les mesures faites directement sur l'artefact, ω et $\Delta\omega$.

Le calcul des erreurs résultantes f aux points de touche de l'artefact circulaire est fait en utilisant la relation:

$$f = J \cdot q_{act} \quad [3.16]$$

où J est la matrice jacobienne de la machine à trois axes de mouvement. L'erreur résultante des effets cumulés des PGÉV de la machine est:

$$f = f_{act} - \omega_{mmt} \quad [3.17]$$

Le calcul peut nous fournir les erreurs de l'axe de mouvement C dans la direction X et celles dans la direction Y. Ensuite, les erreurs résultantes calculées sont traitées par le processeur du niveau 1. Les figures 3.30 et 3.31 présentent les deux courbes 1 et 2 de mesures sur l'artefact circulaire et discutées déjà au chapitre précédent, ainsi que les courbes 3 et 4, qui représentent les variations des erreurs résultantes calculées *f* avant et après le traitement appliqué par le processeur.

On remarque le fait que les courbes 2 et 4, suite au traitement, soient assez rapprochées. Les différences existantes peuvent être expliquées par l'existence d'une excentricité de l'artefact par rapport au centre de la palette.

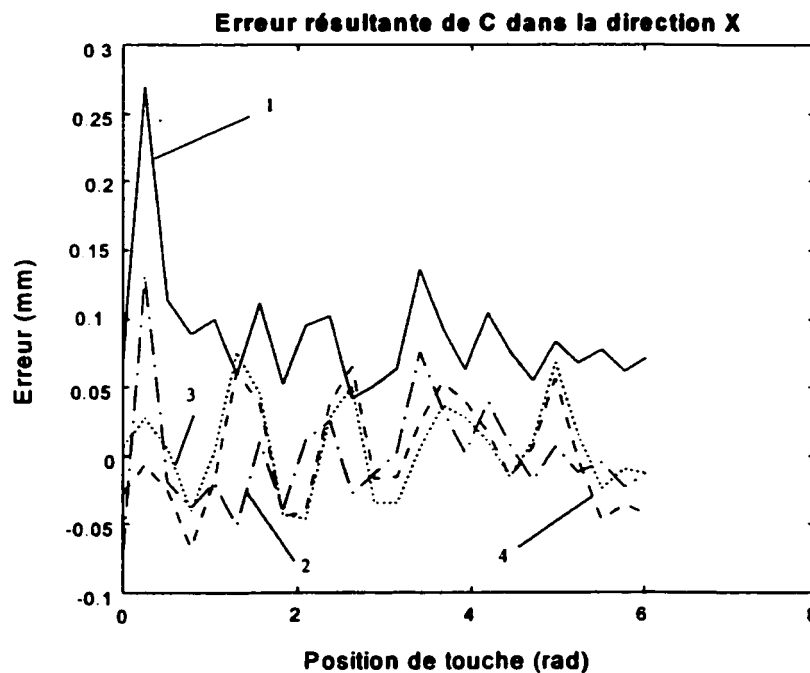


Figure 3.30 Comparaison des variations des erreurs résultantes mesurées avec celles calculées, pour l'axe de mouvement C dans la direction X

La deuxième figure nous permet de continuer notre comparaison (figure 3.31).

On remarque tout de suite que les différences entre les courbes 2 et 4 sont encore plus grandes qu'elles étaient dans la figure précédente. On peut conclure que l'artefact a été monté excentriquement sur la machine surtout selon l'axe Y.

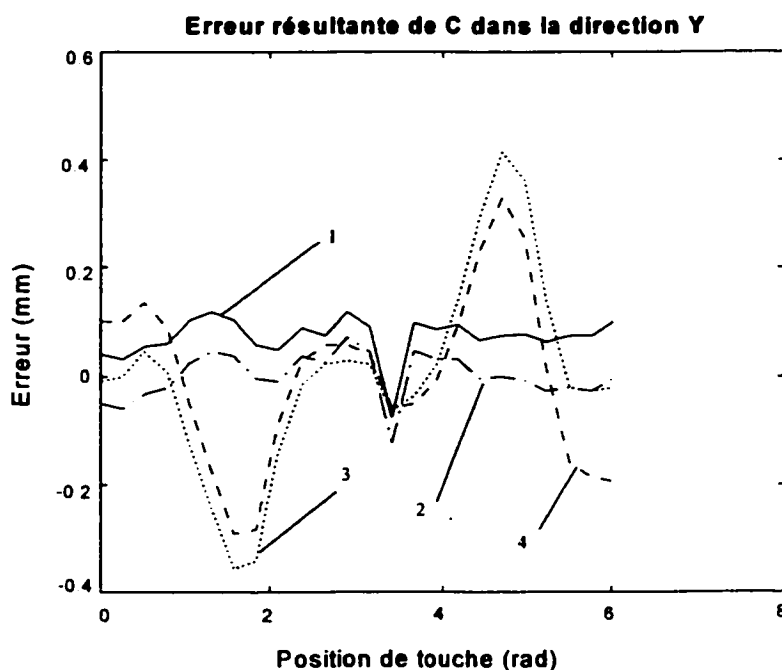


Figure 3.31 Comparaison des variations des erreurs résultantes mesurées avec celles calculées, pour l'axe de mouvement C dans la direction Y

Pour annuler l'effet de l'excentricité de montage de l'artefact sur la machine-outil ou sur la MMT, il faut recentrer les données de mesures (voir Reason, 1966 et les relations 3.18 et 3.19 à la section 3.1.7 suivante). Les trois graphiques tracés suite au recentrage sont montrés à l'annexe G.

Le rapprochement des courbes 2 et 4 est très faible. La composante périodique de l'erreur d'alignement de l'artefact est incorporée aux palpées des axes de rotation. Le paragraphe suivant montre les résultats obtenus suite à l'application d'une procédure mathématique (Mayer, 1998) qui enlève la composante périodique de l'erreur d'alignement.

Application de la procédure d'annulation des erreurs d'alignement dans le cas des axes de mouvement de rotation

Cette procédure mathématique consiste en l'annulation de l'effet linéaire et de celui sinusoïdal dus à l'erreur d'alignement de l'artefact sur la machine-outil. Le torseur d'écart d'alignement et de position de l'artefact est optimisé pour minimiser les palpées par moindres carrés. L'avantage et la différence par rapport à la procédure présentée dans l'analyse du processeur du modèle sont l'annulation de la composante périodique de l'erreur d'alignement. Cet effet se manifeste seulement pour les axes de mouvement de rotation. Par exemple, les palpées radiaux de l'axe de mouvement de rotation A de la machine-outil dans les directions Y et Z incorporent cet effet. Les erreurs résultantes mesurées sur l'artefact circulaire ont été traitées par la méthode décrite ci-haut. Les graphes sont montrés aux figures 3.32 et 3.33.

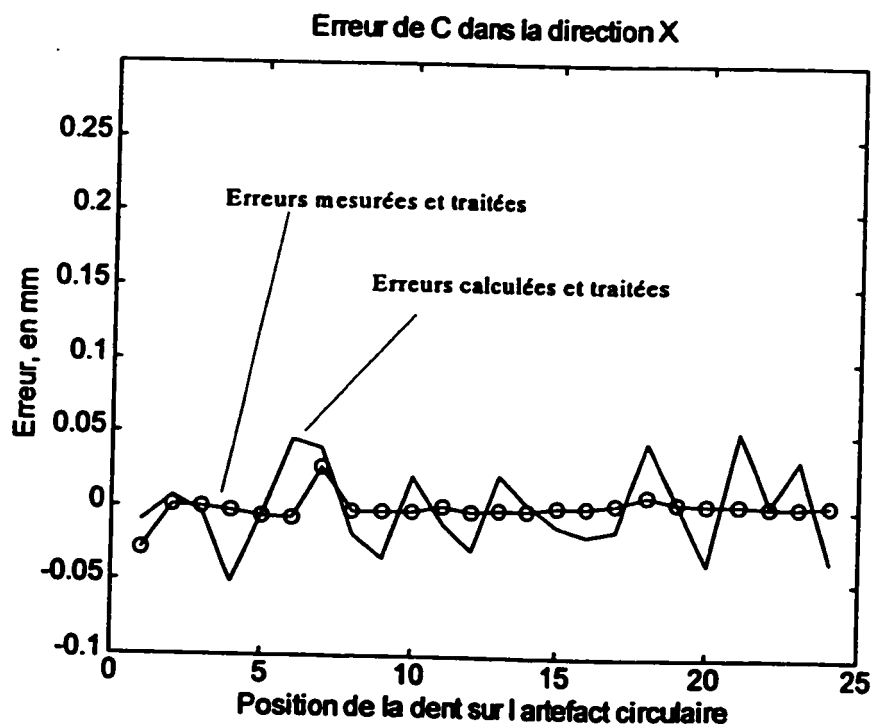


Figure 3.32 Erreur résultante radiale de l'axe de mouvement C dans la direction X suite au

traitement d'annulation de l'effet de l'erreur d'alignement de l'artéfact.

Les deux courbes, celle des erreurs résultantes obtenues par étalonnage avec l'artéfact à trous (dite "calculée") et celle obtenue par mesures sur l'artéfact circulaire (dite "mesurée"), sont beaucoup plus rapprochées qu'elles étaient en utilisant le processeur précédent.

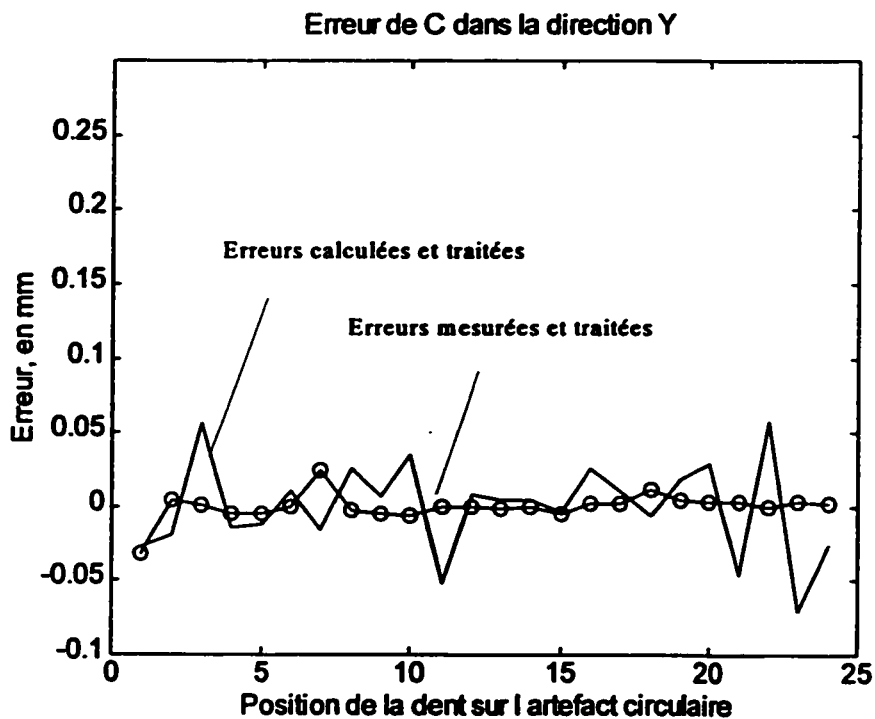


Figure 3.33 Erreur résultante radiale de l'axe C dans la direction Y suite au traitement d'annulation de l'effet de l'erreur d'alignement de l'artéfact.

Nous pouvons remarquer le rapprochement de la courbe des erreurs résultantes obtenues par le palpé de l'artéfact circulaire de la courbe des erreurs résultantes obtenues à partir de l'étalonnage par plaque à trous.

3.1.7 Identification des erreurs de perpendicularité entre deux axes de mouvement linéaires en utilisant le test de l'ellipse

3.1.7.1 Principe de la méthode

La procédure pratique utilisée ici est d'identifier les erreurs de perpendicularité par un test autonome, tel que décrit au chapitre 2, et par la suite comparer les valeurs obtenues avec celles déduites du calcul de la pente des PGÉV de rectitude des axes de mouvement linéaires de la machine obtenues par l'étalonnage avec la plaque à trous.

On se rappelle que le test consiste à prendre des mesures sur l'artefact circulaire quand ce dernier est monté sur la palette. Le palpeur se déplace selon les axes de mouvement X et Y, l'axe de mouvement C restant fixe. La normale à la surface extérieure de touche est orientée selon le rayon de l'artefact.

Les valeurs mesurées sont compensées par rapport aux valeurs d'étalonnage du palpeur et par rapport à la surface réelle de l'artefact. L'étalonnage du palpeur est effectué sur la machine, en utilisant une bague de référence de rayon $R_b = 2.40004$ po. La surface réelle latérale des dents est mesurée sur la machine à mesurer tridimensionnelle.

3.1.7.2 Étalonnage du palpeur sur la machine-outil. Erreur d'étalonnage du palpeur

L'étalonnage du palpeur est fait sur la surface intérieure de la bague étalon. Le palpeur a un rayon $R_p = 2.5$ mm. Les valeurs obtenues par mesure directe sont notées (x_{cal}, y_{cal}) . On répète le test 10 fois. On aura donc les valeurs moyennes des mesures, (x_{cal}^m, y_{cal}^m) . On estime que l'excentricité du palpeur par rapport à la bague pour des mesures également distribuées (Reason, 1966) est de :

$$\begin{aligned} E_x &= 2 * x_{cal}^m \\ E_y &= 2 * y_{cal}^m \end{aligned} \quad [3.18]$$

Les mesures recentrées (x_c, y_c) sont :

$$\begin{aligned} x_c &= x_{cal}^m - E_x \\ y_c &= y_{cal}^m - E_y \end{aligned} \quad [3.19]$$

$$\text{Le rayon mesuré est } R_m = \sqrt{(x_c^2 + y_c^2)} \quad [3.20]$$

Par conséquent, la compensation $comp_{MO}$, que l'on doit soustraire des valeurs mesurées sur l'artefact circulaire, est égale à la différence entre le rayon mesuré et celui théorique :

$$comp_{MO} = R_m - (R_b - R_r) \quad [3.21]$$

Nous avons comparé ces valeurs $comp_{MO}$ (appelée compensation de la m.o. dans la figure 3.34) avec les valeurs de compensation fournies par le processeur de la machine-outil. Les deux graphiques sont montrés à la figure 3.34.

Pour la suite des calculs, nous utilisons la compensation calculée, car les autres valeurs semblent contenir une excentricité résiduelle.

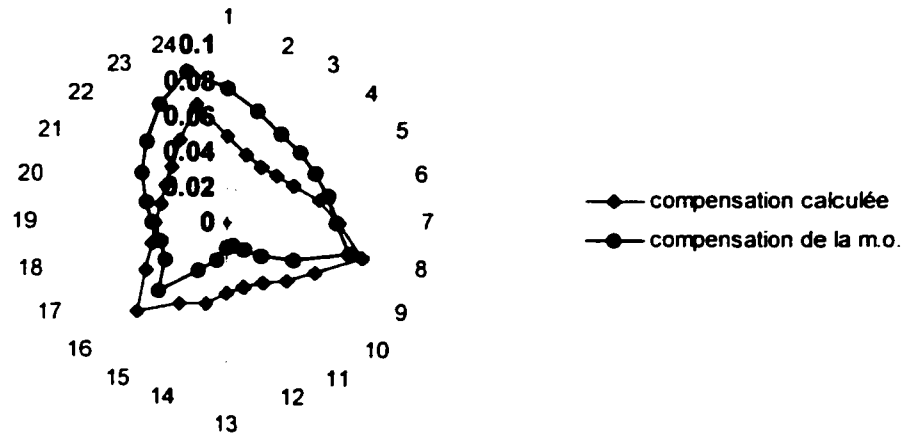


Figure 3.34 Étalonnage du palpeur de la machine-outil. L'échelle radiale est en mm.

3.1.7.3 Étalonnage du palpeur de la machine à mesurer tridimensionnelle

La même procédure d'étalonnage du palpeur de la machine-outil a été appliquée au palpeur de la MMT. La bague d'étalonnage choisie a un diamètre de 0.7" et le palpeur a un diamètre de 4 mm.

Les résultats d'étalonnage du palpeur de la MMT sont les valeurs $comp_{MMT}$ ou le pré-déplacement, et leur variation est représentée à la figure 3.35.

On remarque la petitesse des valeurs de pré-déplacement du palpeur de la MMT à chaque 15° à l'intérieur de la bague en comparaison avec les valeurs de pré-déplacement du palpeur de la machine-outil.

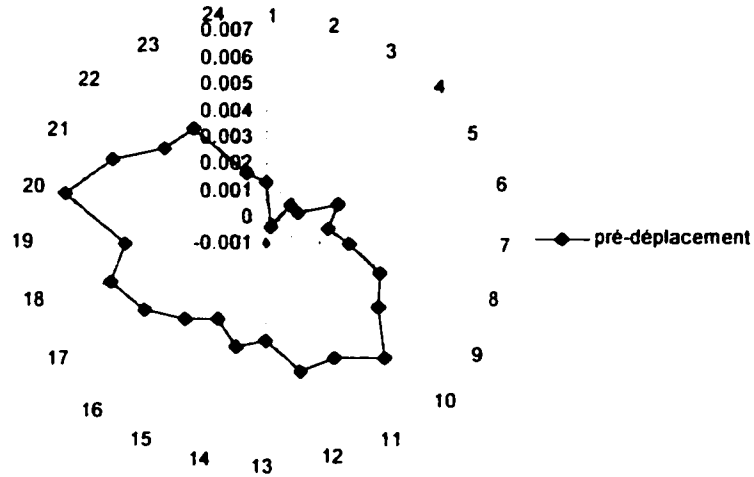


Figure 3.35 Étalonnage du palpeur de la MMT. L'échelle radiale est en mm.

3.1.7.4 Non-circularité de l'artefact

On veut déterminer la non-circularité de la surface extérieure des dents de l'artefact mesuré sur la machine-outil. En effectuant les mesures de l'artefact monté sur la palette fixe de la machine-outil, on obtient les valeurs de touche dans la direction du rayon de l'artefact, ω_{mo} . Nous avons tenu compte du fait que l'étalonnage est fait sur un diamètre interne de la bague et les mesures sont effectuées sur le diamètre externe de l'artefact, en appliquant la compensation à 180° . Les valeurs compensées dans un point de touche i en soustrayant le pré-déplacement du palpeur sont :

$$\omega_{mo, comp, i} = \omega_{mo, i} - R_{r, mo} - comp_{M(i)} \quad [3.22]$$

$R_{r, mo}$ est le rayon du rubis de la machine-outil. Après compensation, les valeurs $\omega_{mo, comp}$ sont recentrées. La relation [3.23] décrit la valeur centrée $\omega_{c, mo, i}$ en fonction de la moyenne des mesures compensées $\omega_{mo, comp, i}^m$.

$$\omega_{c,mo,i} = \omega_{mo,comp,i} - 2 * \omega_{mo,comp,i}^m \quad [3.23]$$

De la même façon on obtient les valeurs de l'état initial de la surface des dents en mesurant en compensant et en recentrant les mesures sur la MMT.

$$\omega_{mmt,comp,i} = \omega_{mmt,i} - R_{r,mmt} - comp_{MO} \quad [3.24]$$

$$\omega_{c,mmt,i} = \omega_{mmt,comp,i} - 2 * \omega_{mmt,comp,i}^m \quad [3.25]$$

La non-circularité $\Delta\omega$ est égale à la différence entre les valeurs $\omega_{c,mo}$ et les valeurs de l'état réel de l'artefact $\omega_{c,mmt}$.

$$\Delta\omega = \omega_{c,mo} - \omega_{c,mmt} \quad [3.26]$$

La graphique suivant montre la variation de la non-circularité pour chacune des dents à 15° de l'artefact (voir figure 3.36).

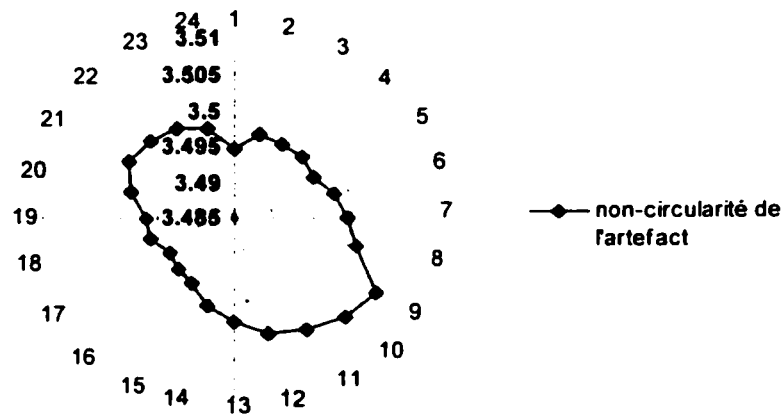


Figure 3.36 Non-circularité de l'artefact mesuré sur la machine-outil (en mm)

On constate l'effet de l'erreur de perpendicularité entre les axes de mouvement X et Y de la machine-outil, qui se traduit graphiquement par l'apparition d'une ellipse au lieu d'un cercle. Le même effet apparaît lorsque nous faisons tester la perpendicularité des axes avec une barre à bille ("ball-bar"). On remarque aussi une faible excentricité du graphique.

3.1.7.5 Analyse de l'ellipse. Résultats

Pour déterminer la valeur de l'erreur de perpendicularité, on utilise l'algorithme développé au chapitre 3 appelé analyse de l'ellipse. L'erreur de perpendicularité entre les axes horizontaux de la machine-outil, obtenue par analyse de l'ellipse, est de $r_{XY,ell} = 0.62 \cdot 10^{-6}$ rad. Dans le chapitre 3.1.1.4 nous avons montré les pentes sur les graphes des PGÉV de rectitude $e_x(y)$ et $e_y(x)$ dans les figures 3.7 et 3.8. La différence des valeurs des pentes est de $1.0 \cdot 10^{-6}$ rad et elle près de l'erreur de perpendicularité calculée auparavant.

3.2 Validation expérimentale du niveau 2 du modèle

3.2.1 Résultats du processeur du niveau 2

Le niveau 2 consiste en une analyse des mesures de l'artefact linéaire pour trouver les paramètres géométriques d'écart en faute, c'est-à-dire ces paramètres qui, en variant d'une séance de diagnostique à l'autre, font varier les mesures sur l'artefact linéaire.

Pour réaliser cette analyse, le modèle construit la matrice S de sensibilité (section 2.3). Pour cette validation, le niveau 2 est validé expérimentalement pour une machine qui a seulement deux axes de mouvement, les axes X et Y. La figure 3.37 illustre des résultats des mesures effectués à un intervalle de temps d'environ 5 mois. La matrice de sensibilité fournit par le modèle nous informe que les mesures sur l'artefact linéaire, et pour la stratégie de mesure montrée à la section antérieure 3.1.1, sont sensibles aux paramètres suivants (Tableau 3.1).

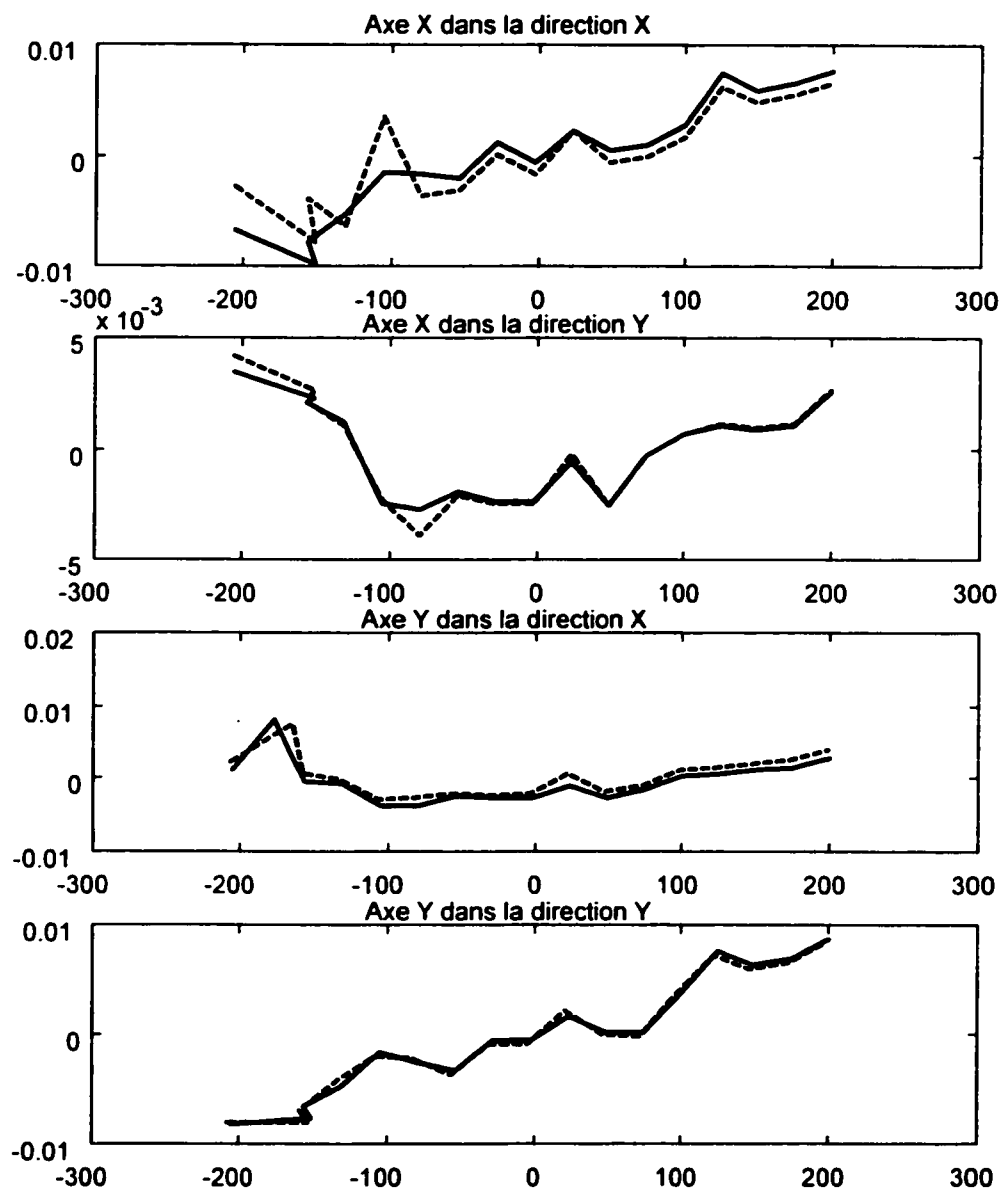


Figure 3.37 Erreurs résultantes obtenues à deux séances de diagnostique différentes

La dégradation la plus significative est celle de l'axe de mouvement X, alors les doublets d'identificateurs attachés sont [1 1] pour l'axe de mouvement X et [0 0] pour l'axe de mouvement Y.

Tableau 3.1 Sensibilité de chaque test aux PGÉV (d=axe testée, φ =direction de palpation)

	$e_x(d)$	$e_y(d)$	$e_z(d)$	$\gamma_x(d)$	$\gamma_y(d)$	$\gamma_z(d)$	doublets
Test 1 $d=x, \varphi=x$	1	0	0	0	0	✓	1
Test 2 $d=x, \varphi=y$	0	1	0	✓	0	✓	1
Test 3 $d=x, \varphi=z$	valeurs non-disponibles						
Test 4 $d=y, \varphi=x$	1	0	0	0	✓	✓	0
Test 5 $d=y, \varphi=y$	0	1	0	0	0	✓	0
Test 6 $d=y, \varphi=z$	valeurs non-disponibles						

Dans le tableau ci-dessus, la variable d représente l'axe de mouvement pour chaque test. La variable φ est la direction de palpation.

La matrice de sensibilité nous fournit des informations supplémentaires, comme par exemple les valeurs de certains PGÉV linéaires ou d'ensembles de PGÉV. Les PGÉV ou les ensembles des PGÉV qui sont sensibles aux tests effectués et pour lesquels on peut déterminer la variation ont été nommés des paramètres-clés.

À partir de la matrice de sensibilité, on peut déduire les variations des paramètres-clés suivants :

$$e_x(x) + S_{\gamma z(x)} \gamma_z(x) = \Delta\omega_x(x) \quad : \text{Test 1}$$

$$e_y(x) + S_{\gamma z(x)} \gamma_z(x) + S_{\gamma x(x)} \gamma_x(x) = \Delta\omega_y(x) \quad : \text{Test 2}$$

$$e_x(y) + S_{\gamma y(y)} \gamma_y(y) + S_{\gamma z(y)} \gamma_z(y) = \Delta\omega_x(y) \quad : \text{Test 4}$$

$$e_y(y) + S_{\gamma(y)} \gamma_z(y) = \Delta\omega_y(y) \quad : \text{Test 5} \quad [3.27]$$

Le multiplicateur $S_{e(i)}$ est le terme de la matrice de sensibilité S qui multiplie le paramètre géométrique correspondant, dans l'équation :

$$\Delta\omega = S q_{act} \quad [3.28]$$

où $\Delta\omega$ représente les valeurs obtenues à la sortie du processeur du niveau 1.

En connaissant la sensibilité de chaque test, on peut construire la matrice A en forme de tableau (voir le tableau 3.2).

Tableau 3.2 Représentation de la matrice A en forme de tableau logique (Matsuura)

Tests	Paramètre					
	$e_x(s)$	$e_y(s)$	$e_z(s)$	$\gamma_x(s)$	$\gamma_y(s)$	$\gamma_z(s)$
$\Delta\omega_x(x)$, Test 1	1	0	0	0	0	1
$\Delta\omega_y(x)$, Test 2	0	1	0	1	0	1
$\Delta\omega_z(x)$, Test 3	0	0	1	1	1	0
$\Delta\omega_x(y)$, Test 4	1	0	0	0	1	1
$\Delta\omega_y(y)$, Test 5	0	1	0	0	0	1
$\Delta\omega_z(y)$, Test 6	0	0	1	1	0	0

Le résultat du processeur de niveau 2 est au tableau 3.3. Ce résultat provient de l'analyse faite sur seulement deux axes de mouvement de la machine, lorsque l'artefact linéaire à marches est orienté successivement selon l'axe de mouvement X et ensuite selon l'axe de mouvement Y. Les doublets obtenus suite aux tests sont montrés en gras.

L'identificateur "1" dans les rangées du début du tableau signifie que le test concerné a montré une variation par rapport à une séance de tests de référence. L'identificateur "0"

signifie que le test n'a pas varié par rapport à la référence. En fonction de différentes combinaisons d'identificateurs parmi les trois tests qui définissent un axe de mouvement, le processeur déduit les paramètres-clés.

Tableau 3.3. Résultat du processeur de niveau 2, Matsuura

Test 1	1	0	0	1
Test 2	0	1	0	1
Test 3				
param. en faute	$e_x(x), \gamma_z(x)$	$e_y(x), \gamma_x(x), \gamma_z(x)$		$e_x(x), e_y(x), \gamma_x(x), \gamma_z(x)$
Test 4	1	0	0	1
Test 5	0	1	0	1
Test 6				
param en faute	$e_x(y), \gamma_y(y), \gamma_z(y)$	$e_y(y), \gamma_z(y)$		$e_x(y), e_y(y), \gamma_y(y), \gamma_z(y)$

Les PGÉV dégradés depuis la dernière séance de diagnostique sont: $e_x(x)$, $e_y(x)$, $\gamma_x(x)$, $\gamma_z(x)$. La séance de mesure a été accompagnée par une nouvelle séance d'étalonnage à la plaque à trous. Cette séance a vérifié que les PGÉV dégradés identifiés par la séance de diagnostique par palpation ont vraiment changé depuis la dernière séance d'étalonnage.

La séance d'étalonnage fournit les paramètres $e_x(x)$, $e_y(x)$ ainsi que les $e_x(y)$, $e_y(y)$ et $\gamma_z(y)$. Les figures 3.38 à 3.42 montrent les PGÉV obtenus par étalonnage direct suite aux deux séances d'étalonnage.

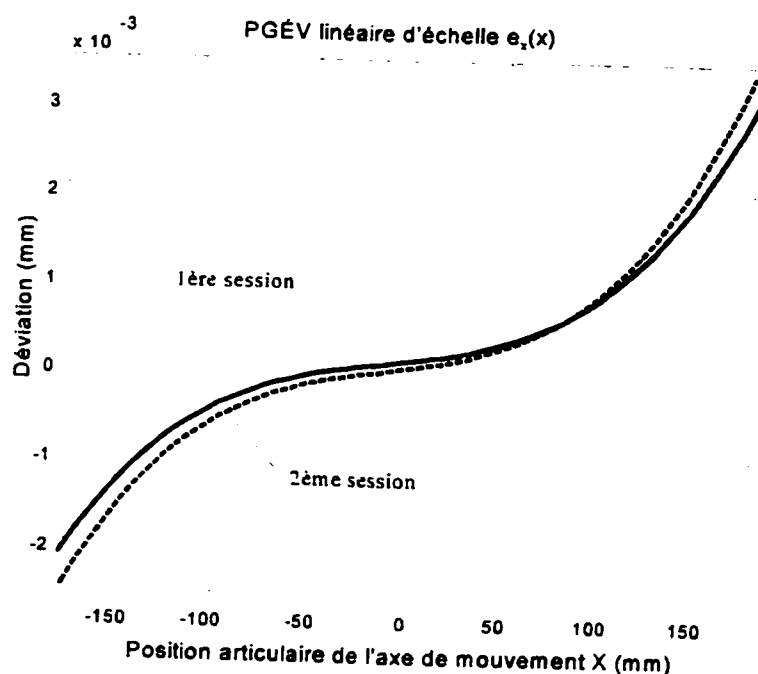


Figure 3.38 Représentation du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement X obtenu par étalonnage direct

La ligne pleine représente la variation du PGÉV de la première séance d'étalonnage, la ligne interrompue est le PGÉV de la deuxième séance d'étalonnage. La dégradation du paramètre d'une séance à l'autre, ou la différence entre les deux courbes à la même position articulaire de l'axe, varie de zéro à 0.4×10^{-3} mm. Pour des valeurs négatives de la position articulaire de l'axe de mouvement X, la dégradation du paramètre retrecit, et elle devient plus grande pour les valeurs positives. La dégradation visible sur ce graphique peut indiquer aussi la présence d'une dégradation du roulis de l'axe de mouvement Z.

La figure 3.40 représente la dégradation du paramètre de rectitude $e_y(x)$. La dégradation varie de 0.6×10^{-4} à 1.0×10^{-4} mm. Ces deux graphes confirment la dégradation de l'axe de mouvement X dans les directions X et Y, ce qui était la conclusion du niveau 2 du modèle de diagnostique.

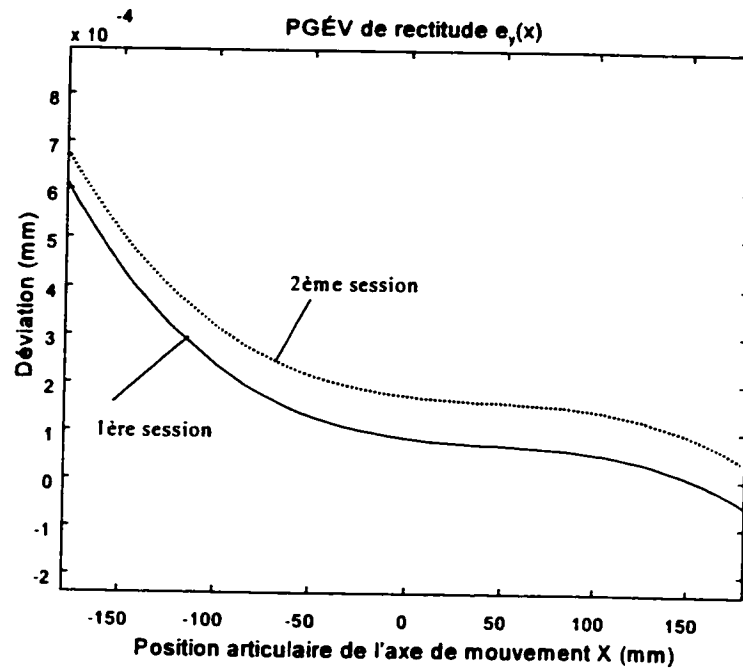


Figure 3.39 Représentation du PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y obtenue par étalonnage direct

Les deux graphes suivants montrent les PGÉV linéaires obtenus pour l'axe de mouvement Y suite aux séances d'étalonnage. La figure 3.40 montre la dégradation de $e_x(y)$ qui a une valeur maximale de 0.2×10^{-4} mm. En considérant que l'erreur de lecture du palpeur utilisé sur la machine est de 10^{-4} mm, des valeurs plus petites que 10^{-4} mm obtenues suite aux mesures n'ont pas de signification pratique. La figure 3.41 représente la dégradation du paramètre $e_x(y)$ d'une séance de mesure à l'autre. Cette dégradation est plus petite que 0.2×10^{-4} mm.

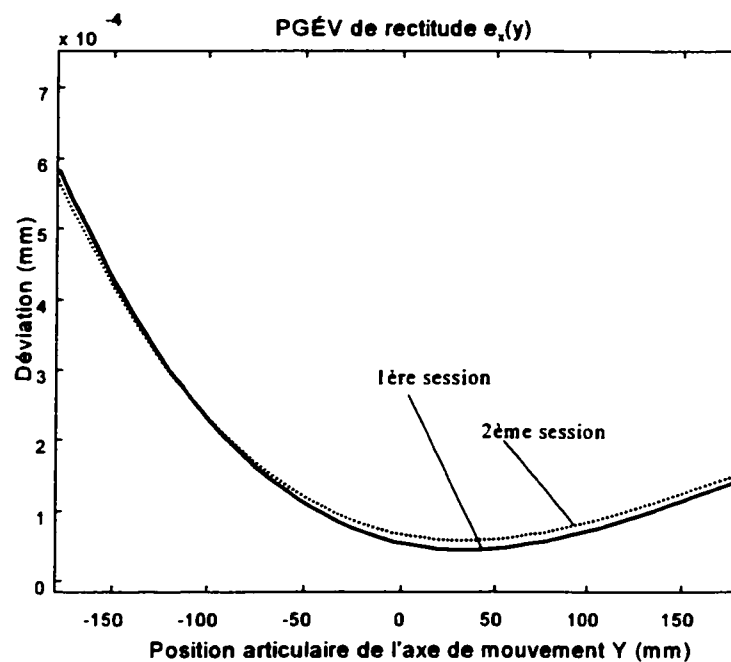


Figure 3.40 Graphe du PGÉV de rectitude de l'axe de mouvement X dans la direction Y

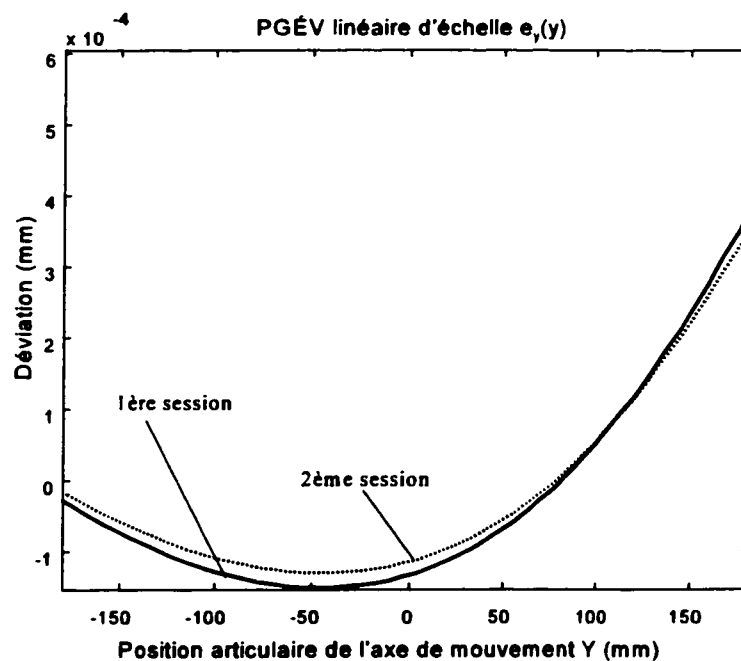


Figure 3.41 Graphe du PGÉV linéaire d'échelle de l'axe de mouvement Y

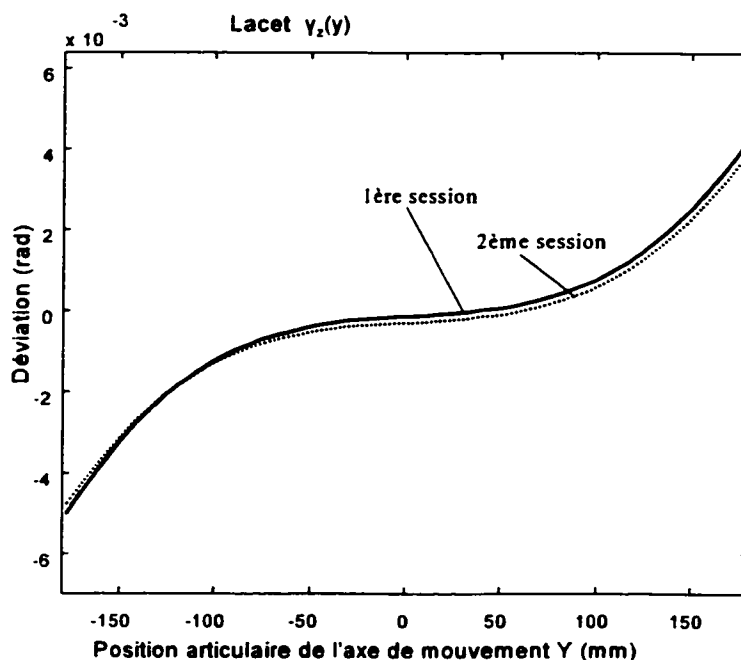


Figure 3.42 Graphe du lacet de l'axe de mouvement Y obtenu par étalonnage direct

L'étalonnage direct montre une dégradation du lacet de l'axe de mouvement Y d'une séance à l'autre d'au plus 0.1×10^{-3} mm, ce qui n'est pas une dégradation significative de ce paramètre, à la limite de l'erreur de mesure de 10^{-4} mm.

La validité du diagnostic obtenu du niveau 2 est appuyé par l'étalonnage des paramètres géométriques d'écart par la méthode de la plaque à trous.

Remarque concernant le logiciel: Le prototype du modèle, 'Performance Monitoring', fournit le résultat de l'analyse des paramètres géométriques dans une fenêtre apparaissant à l'écran et qui montre la liste des paramètres sensibles aux différentes combinaisons d'identificateurs alloués aux tests. La machine Matsuura à deux axes de mouvement n'a pas été créée dans le prototype. Les machines créées dans le prototype sont Omnimill 60 et Mitsui Seiki.

3.3 Validation expérimentale du niveau 3 du modèle

3.3.1 Résultats du processeur du niveau 3

Le processeur du niveau 3 du modèle utilise les valeurs $\Delta\omega$ obtenues par le traitement des mesures effectuées sur l'artefact linéaire, pour estimer les erreurs géométriques résultantes qui vont se manifester pendant l'usinage d'une pièce, à partir des PGÉV développées dans les axes de la machine.

En connaissant les coordonnées articulaires d'un des points i situés sur la pièce à usiner, nous pouvons calculer les coordonnées des points-images i_{img} qui lui correspondent. Les points-images (section 2.4) sont les points qui ont les mêmes coordonnées que celles des points du test respectif, à l'exception de la coordonnée articulaire correspondante à l'axe de mouvement du test, qui garde la valeur du point i de la pièce. Parce qu'on a effectué six tests de palpéage pour les axes de mouvement X et Y, chaque point i aura six points-images.

Pour ces points-images i_{img} on calcule les matrices de sensibilité S_{img} . De chacune des matrices S_{img} on extrait la ligne S_φ qui correspond à la direction d'approche du palpeur, parce que c'est la seule qui a une signification physique. Ses lignes S_φ sont empilées en créant une matrice de sensibilité S_i du point i , qui explique la sensibilité du point i en fonction des tests effectués. Toujours pour les points-image i_{img} on calcule les valeurs des erreurs $\Delta\omega_{intp,i}$ en interpolant entre les points de chaque test.

La relation

$$\Delta\omega_{intp,i} = S_i q_{act,i} \quad [3.29]$$

nous conduit aux valeurs du $q_{act,i}$ -

$$q_{act,i} = S_i^+ \Delta\omega_{intp,i} \quad [3.30]$$

Ces valeurs calculées représentent l'estimation de la variation des PGÉV entre deux séances de tests, la solution étant une parmi une infinité de solutions possibles.

L'estimation de la détérioration de l'erreur géométrique résultante, entre deux séances de mesures, effectuée par la machine-outil dans un point i de son espace de travail est :

$$f_{act,i}' = J_i q_{act,i} \quad [3.31]$$

Nous nous rappelons que, pendant l'identification des paramètres géométriques d'écart en utilisant la plaque à trous, dans le but de valider le modèle, nous avons considéré les erreurs de perpendicularité incluses dans les PGÉV de rectitude des axes de mouvement linéaires. Par conséquent, pour permettre une comparaison des résultats fournis par le processeur du niveau 3 avec les erreurs obtenues en propageant les PGÉV sur la pièce, il faut injecter les erreurs de perpendicularité dans le modèle. La validation pratique que nous avons développé ici nous a permis l'identification de l'erreur de perpendicularité r_{xy} entre les axes de mouvement X et Y de la machine. Pour ce faire, on ajoute aux erreurs f_{act}' les erreurs f_{perp} .

$$f_{act} = f_{act}' + f_{perp} \quad [3.32]$$

$$f_{perp} = r_{xy} [Q_{o,y} \ Q_{o,x}]^T \quad [3.33]$$

La matrice colonne transposée $[Q_{o,y} \ Q_{o,x}]^T$ est constituée des deux coordonnées articulaires des points i appartenant à la pièce par rapport au zéro de l'artefact (figure 3.43). La relation [3.33] est valide seulement dans ce cas particulier de la machine à deux axes de mouvement horizontaux.

La figure 3.43 suivante montre un schéma de la pièce usinée sur la machine-outil dans le but de valider le niveau 3 du modèle.

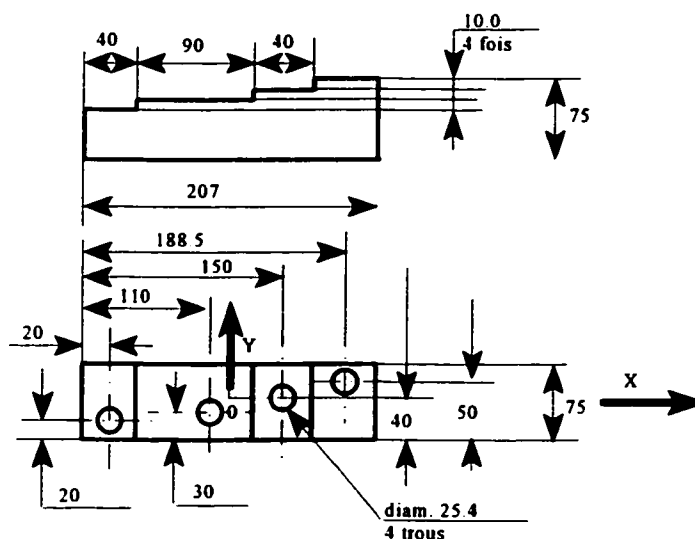


Figure 3.43 Représentation de la pièce spéciale utilisée pour la validation du niveau 3

Les points choisis sur la pièce appartiennent aux éléments géométriques de type trou et surfaces planes. La pièce a été alignée selon l'axe de mouvement X de la machine, le centre de la pièce dans son plan horizontal coïncident avec le centre de la palette.

Les premiers 4 points pour lesquels nous avons estimé l'erreur géométrique résultante sont les centres des trous, T1 à T4. Ensuite nous avons considéré trois points à la même hauteur sur chacune des surfaces latérales des marches, de M1 à M12, tel que montré à la figure 3.44.

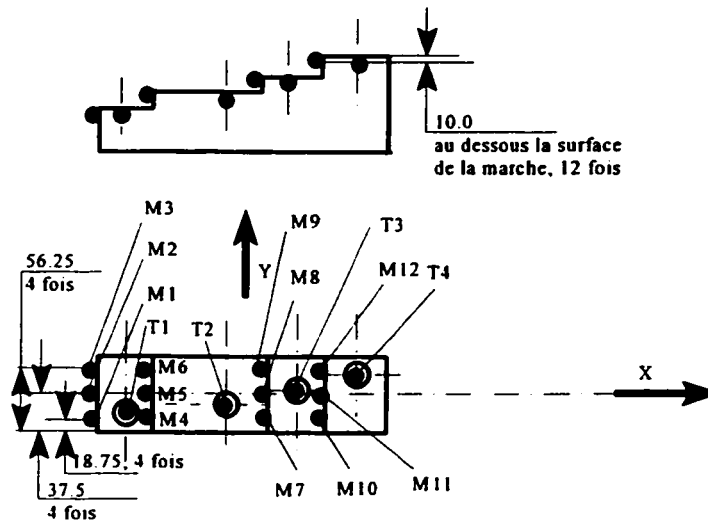


Figure 3.44 Schéma des points choisis sur la pièce pour valider le niveau 3

Le tableau 3.4 de l'annexe H montre les résultats obtenus suite à l'application du processeur de niveau 3.

3.3.2. Calcul des erreurs résultantes dans des points appartenant à la pièce

Les PGÉV identifiés en utilisant la plaque à trous se propagent, pendant le mouvement des axes, dans les points appartenant à l'espace de travail. L'effet résultant des PGÉV est calculé aux points situés sur la pièce de la figure 3.45.

Ces erreurs sont appelées les erreurs résultantes f . Elles sont égales à:

$$f = J \cdot q_{act} \quad [3.34]$$

La matrice J considérée dans ce calcul a gardé seulement ses trois premières rangées, pour obtenir l'effet des PGÉV propagés seulement selon les trois directions linéaires.

3.3.3 Résultats des mesures de palpation effectuées directement sur la pièce et comparaison avec les deux autres méthodes d'identification des erreurs résultantes sur ses éléments géométriques

Une troisième approche de détermination des erreurs résultantes sur la pièce consiste dans le palpation de la pièce directement sur la machine-outil. Le palpeur, monté dans la broche de la machine, touche les points des éléments géométriques choisis dans la section 3.3.1, figure 3.44. Les valeurs des erreurs de position identifiées par cette méthode sont les E_{act} . Les erreurs géométriques aux points de la pièce sont égales à la différence entre les valeurs E_{act} et les erreurs propres de la pièce déterminées sur la machine à mesurer tridimensionnelle E_{mmc} .

$$E = E_{act} - E_{mmc} \quad [3.35]$$

Les mesures effectuées sur la MMT sont faites aux mêmes points de la pièce où on applique le niveau 3 du modèle, en prenant la même origine des mesures et en alignant la pièce toujours selon l'axe de mouvement X de la machine, comme à la figure 3.44. Les valeurs brutes des mesures sont traitées pour enlever l'erreur de perpendicularité des axes de mouvement horizontaux de la MMT.

La comparaison entre les valeurs calculées par le processeur du niveau 3 du modèle à la section 3.3.1, les erreurs résultantes obtenues suite à la propagation des PGÉV identifiées à la section 3.3.2, et les valeurs mesurées E , est représentée dans les trois figures suivantes.

Les figures 3.45 et 3.46 montrent les erreurs résultantes aux centres des quatre trous de la pièce, dans la direction de l'axe de mouvement X et dans la direction de l'axe de mouvement Y de la machine.

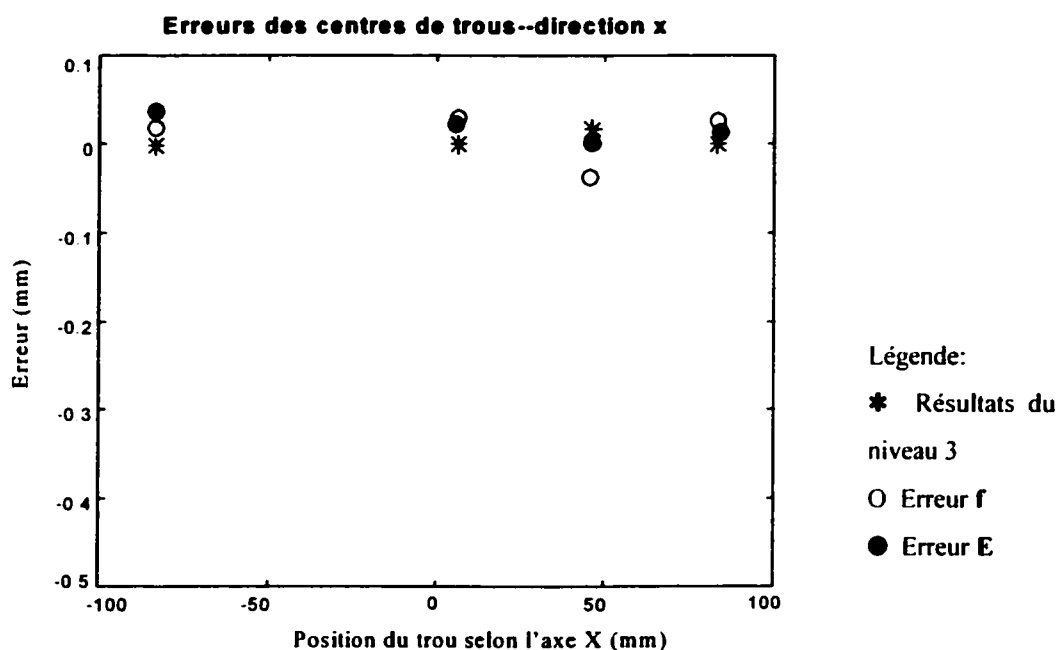


Figure 3.45 Comparaison des erreurs géométriques résultantes obtenues par les trois techniques, dans le cas des surfaces de type trou et dans la direction X

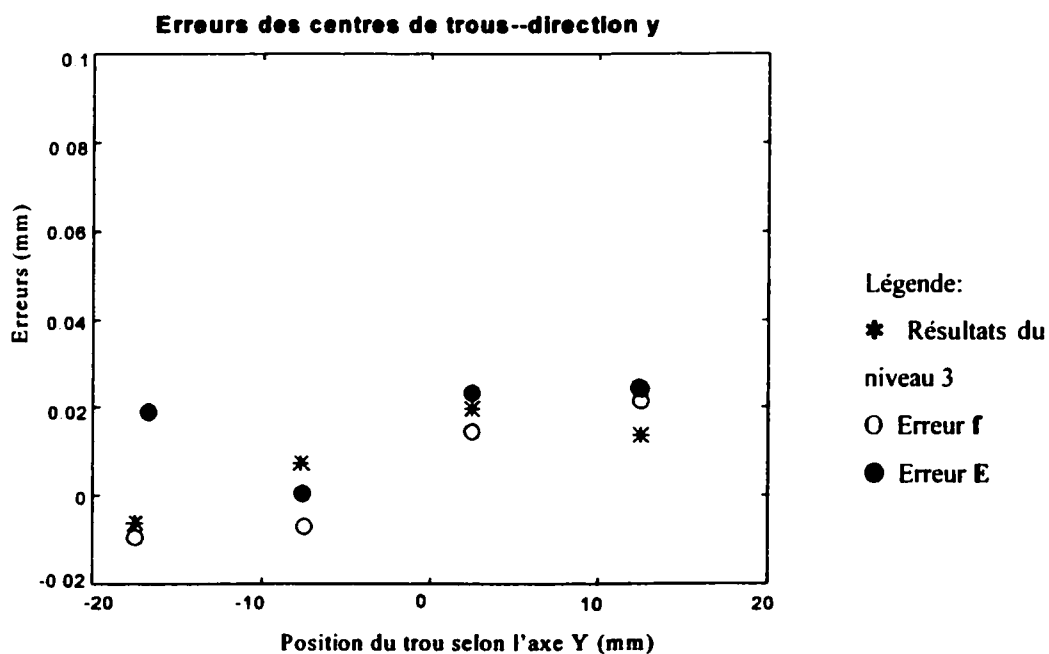


Figure 3.46 Comparaison des erreurs géométriques résultantes obtenues par les trois techniques, dans le cas des surfaces de type trou et dans la direction Y

Nous remarquons dans ces deux premières figures que les valeurs f et E sont assez près, mais ne sont pas superposées comme on aurait espéré idéalement. Les différences peuvent être causées par les erreurs d'alignement de la pièce spéciale selon les axes de mouvement et par l'effet éventuel de la rectitude de l'axe de mouvement Z due à la différence de profondeur de touche dans les trous. Ce mauvais alignement pendant les mesures directes de palpé sur la machine se traduit par le fait que les coordonnées nominales des points utilisées pour faire les calculs de f ne coïncident pas avec les coordonnées des points réels testés sur la machine pour identifier le E . Par conséquent, l'erreur E inclut un biais par rapport à l'erreur f . Nous remarquons que le mauvais alignement est plus grand dans la direction Y de la machine. La troisième figure représente les erreurs résultantes des points situés sur les surfaces latérales des marches de la pièce spéciale. Parce que les points sont testés dans la direction d'approche X , ce sont seulement les erreurs dans cette direction qui vont être considérées (figure 3.47).

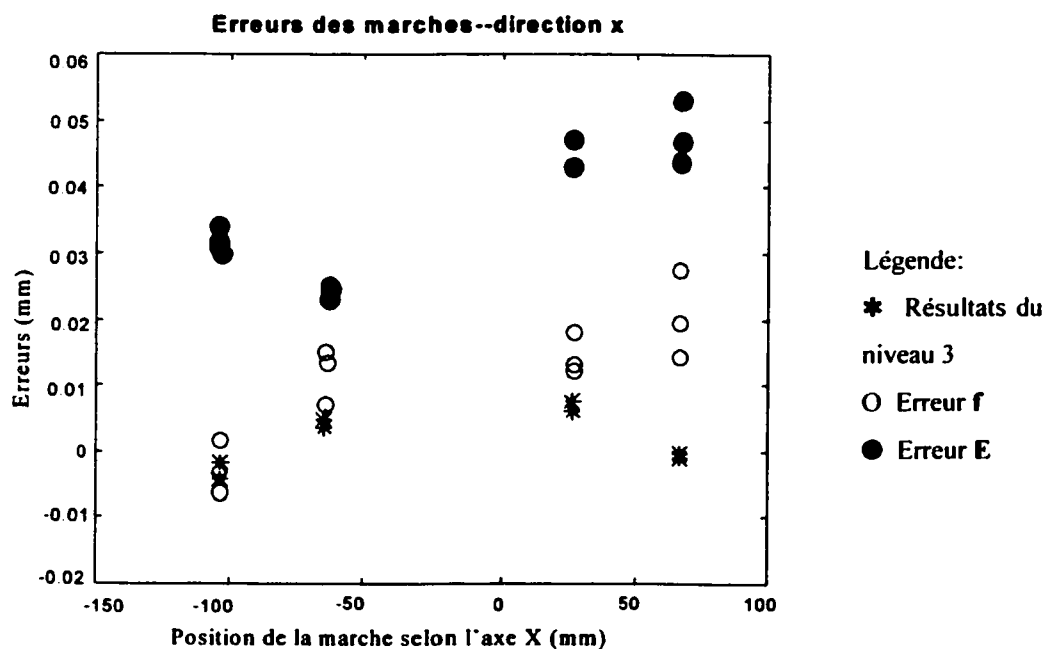


Figure 3.47 Comparaison des erreurs géométriques résultantes obtenues par les trois

techniques, dans le cas des surfaces de type marche et dans la direction X

Nous remarquons de nouveau que l'erreur E inclut un effet constant, qui est du, encore une fois, au mauvais alignement de la pièce selon les axes de mouvement et aux erreurs de rectitude de l'axe de mouvement Z manifestées sur la différence de profondeur de touche. La conclusion principale qui découle de l'analyse faite jusqu'ici est que le niveau 3 sous-estime l'erreur propagée dans l'espace de travail.

Le niveau 3 du modèle doit répondre à la question de la faisabilité des éléments géométriques d'une pièce à l'intérieur des tolérances imposées par le concepteur. Pour valider les réponses données à ce niveau du modèle, on va imposer différentes tolérances de positionnement aux points appartenant aux éléments géométriques de la pièce. Par exemple, en mettant une tolérance de ± 0.1 mm sur toute la pièce, la réponse du modèle est que tous les points sont faisables, et elle est la même que la réponse vérifiée en palpant la pièce. Par contre, en imposant une tolérance de ± 0.02 mm partout, la réponse du modèle est différente de celle vérifiée par palpement. Le modèle s'est trompé sur la faisabilité ou la non faisabilité de plusieurs éléments géométriques, et le taux de succès de sa réponse est de 75%. Ce succès signifie que le modèle apprécie correctement la faisabilité ou la non faisabilité, pour 75% des éléments géométriques de la pièce.

La figure 3.48 montre le taux de succès du modèle. L'analyse a été faite en variant la tolérance imposée d'une valeur très près de 0 jusqu'à la valeur de 0,1 mm. Le taux de succès est calculé pour chaque élément géométrique et dans chacune des deux directions des axes de mouvement X et Y. Il baisse beaucoup pour des tolérances situées autour de 0,01 mm.

Il faut remarquer que le taux de succès baisse à 75% quand le pourcentage des pièces bonnes est de 85%. Pour le taux de succès le plus bas (65%), le pourcentage des pièces bonnes est moins de 50%, donc la machine est en réalité incapable d'exécuter plus de 50% d'éléments

géométriques d'une pièce dans les tolérances demandées.

Nous avons considéré trois situations de "faisabilité de la pièce". Le modèle peut identifier que

- la pièce est faisable quand tous les éléments géométriques sont faisables,
- elle n'est pas faisable quand tous les éléments géométriques ne le sont pas, et la pièce est faisable avec beaucoup de précautions, en restant dans une zone de risque de "non faisabilité", quand une partie seulement des éléments géométriques est faisable.

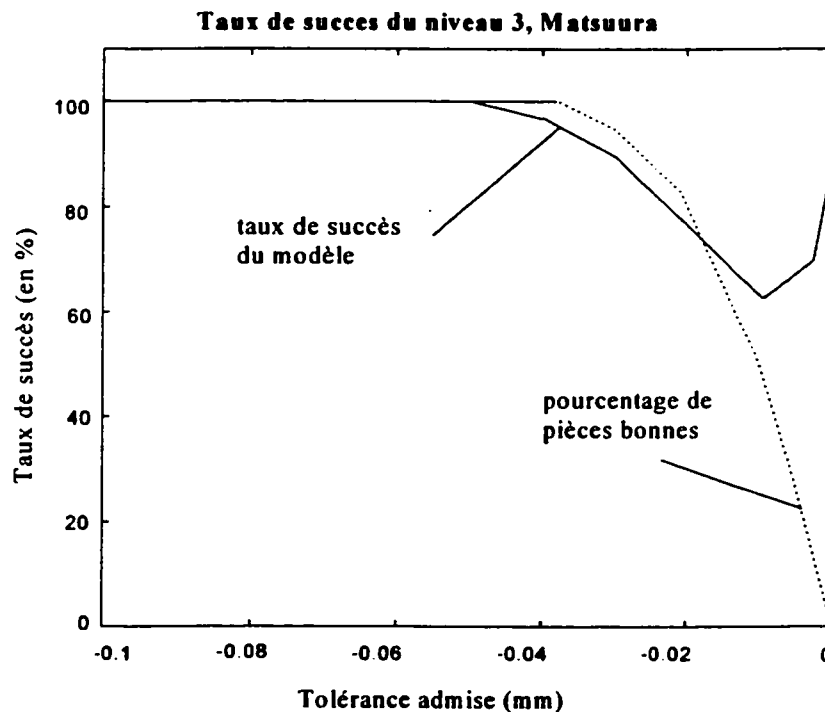


Figure 3.48 Représentation du taux de succès du modèle en fonction de la tolérance imposée

Si on veut une réponse générale, sans préciser quel élément géométrique est faisable ou non faisable, la réponse du modèle est de 98 % correcte.

CONCLUSION

La problématique de l'état géométrique d'une machine-outil et de son effet sur les pièces à usiner est un sujet qui préoccupe intensément les utilisateurs de machines. En connaissant les effets des paramètres géométriques d'écart sur les axes de mouvement, leur propagation dans l'espace de travail et en étant avisé sur les avantages et les désavantages de plusieurs méthodes d'identification des paramètres, il devient possible de connaître le taux de dégradation de l'état géométrique actuel de la machine en faisant un diagnostic rapide en se rapportant à un état géométrique antérieur pris comme référence.

Le suivi de l'état géométrique de la machine-outil basé sur un modèle géométrique et cinématique et sur des données de palpéage effectués sur la machine, permet de déterminer l'évolution des axes de mouvement, d'indiquer les paramètres-clés ou les ensembles de paramètres-clés qui sont responsables de la dégradation de déplacement des axes de mouvement, et enfin d'estimer la faisabilité d'une pièce ou des éléments géométriques de cette pièce qui sera usinée sur la machine.

La méthode s'appuie sur le développement de stratégies de palpéage et d'artefacts de mesure. L'étude d'étalonnage des machines-outils et la conception des méthodologies originales de mesure ont été indispensables à la création du modèle.

Le bon fonctionnement du modèle a été testé dans un simulateur informatique. Plusieurs machines-outils ont été simulées et le comportement du modèle a été testé et ensuite validé par une procédure de calcul parallèle déjà connue dans la littérature et en pratique.

La recherche a inclus aussi la réalisation pratique d'un prototype informatique qui utilise les connaissances acquises pendant la recherche et qui peut être utilisé sur le plancher des usines

de fabrication. Le prototype fournit des réponses aux trois niveaux mentionnés auparavant, au niveau des axes de mouvement, des paramètres-clés et de la pièce à usiner.

La validation expérimentale des notions développées dans cette recherche a été effectuée en utilisant une machine réduite à deux axes de mouvement horizontaux. La validation a inclut l'identification des paramètres géométriques d'écart variables en fonction de la coordonnée articulaire et ensuite le diagnostic de l'état géométrique de la machine. Le modèle a été testé en passant par tous les trois niveaux du processeur.

Cette recherche a été réalisé de manière à satisfaire des conditions qui ont été imposées au début pour garder les avantages de productivité et de réduction des coûts par rapport aux méthodes d'étalonnage exhaustives connues jusqu'ici.

La validation du modèle a démontré les limites d'applicabilité du modèle. Le premier niveau du modèle peut être appliqué pour n'importe quelle configuration de machine-outil ou MMT. La stratégie d'étalonnage est conçue pour être facile à adapter à d'autres machines. Le deuxième niveau fonctionne aussi très bien pour n'importe quelle configuration, parce que le développement de la matrice de sensibilité est fait en considérant une structure générale de machine-outil. Le troisième niveau présente des limites évidentes quand le pourcentage des éléments géométriques réellement usinables sur la machine-outil est plus petit que 85%.

Les erreurs de perpendicularité ont été incluses dans les PGÉV de rectitude. Le modèle peut être amélioré en faisant l'analyse approfondie des erreurs de perpendicularité et en les considérant comme des paramètres géométriques d'écart distincts par rapport aux autres paramètres géométriques.

La méthodologie développée par cette recherche peut être appliquée aux machines-outils qui

ont une configuration ou un nombre d'axes de mouvement différents de ceux utilisés dans l'étude présente. Le modèle est général, et par conséquent devrait s'adapter à n'importe quelle topologie sérielle de centre d'usinage.

Le prototype informatique inclus peut être appliqué directement sur une machine-outil en atelier ou il peut servir comme outil dans le développement d'autres simulations ou modèles, mêmes si ces derniers ne concernent pas nécessairement ou exclusivement le comportement géométrique des machines.

La présente recherche peut constituer le point de départ pour un modèle intégrant plusieurs méthodes d'évaluation des paramètres géométriques, comme par exemple les lasers ou les réseaux neuronaux. Les questions à répondre dans ce genre d'étude pourront être la compatibilité des différentes stratégies de mesure, et leur intégration dans une procédure de maintenance et entretien préventif vue dans le temps.

Cette recherche constitue seulement une étape dans une construction plus complète, appelons-la l'étude générale du comportement d'une machine-outil, pendant et entre les opérations d'usinage.

L'étude de la précision géométrique du centre d'usinage peut être complétée par une analyse des dispersions aléatoires. Par exemple, l'étude de la répétabilité des mouvements des axes de mouvement représente une avenue possible de recherche, qui pourra compléter le modèle présenté ici. En guise de conclusion, cette thèse se veut seulement une brique dans le développement très varié de recherches concernant les dispersions des machines-outils.

BIBLIOGRAPHIE

ANGELES, J., MA, O. *Quadmin: An Integrated Package for Constrained Nonlinear Least-Square Problems*, 1989, The American Society of Mechanical Engineers.

ANGELES, J., ANDERSON, K. *An Orthogonal-Decomposition Algorithm for Constrained Least-Square Optimisation*, 1995, before printing.

BACH, G. *Advanced Math III*, 1993, cours universitaire 4 crédits à l'Université McGill, département 'Mechanical Engineering'.

BALSAMO, A. *Effects of Arbitrary Coefficients of CMM Error Maps on Probe Qualification*, 1995, Annals of the CIRP.

BEN-ISRAEL, A., GREVILLE, T.N.E. *Generalized Inverse Theory and Applications. Pure and Applied Mathematics*, 1974, A.Wiley-Interscience Publication.

BOOTHROYD, G. *Fundamentals of Metal Machining*, 1965, ed. Edward Arnold Publishers Ltd., London.

BROWNE, J.W. *The Theory of Machine Tools. Book 1*, 1965, ed. Cassel & Comp. Ltd.

BUSCH, K., KUNZMANN, H., WÄLDELE, F. *Numerical Error Correction of a Coordinate Measuring Machine*, 1984, Proceedings of the International Symposium on Metrology for Quality Control, Tokyo.

CHATTERJEE, S. *An Assessment of Quasi-Static and Operational Errors in NC Machine Tools*, 1997, J. of Manufacturing Systems.

CHRYSSOLOURIS, G., GUILLOT, M. *A Comparison of Statistical and AI Approaches to the Selection of Process Parameters in Intelligent Machining*, 1990, J. of Engineering for Industry, vol. 112.

COOREWITZ, T., DAVID, J.P. *Elimination of Geometrical Errors by Permutation - Application to a Rotary Table*, 1991, Annals of the CIRP, vol. 40, no.1.

DAVID, M. *L'intégration du contrôle dimensionnel dans le processus d'usinage*, 1992, Revue Pratique de Contrôle Industriel no.176.

DEFORGE, Y., LEYNAUD, A., ORTIS, C. *Manipulation et travaux pratiques de métrologie*, 1971, ed. Dunod Paris.

DINAUER, W.R., DUFFIE, W.A., PHILPOTT, M.L. *Error Compensation Algorithms for Sculptured Surface Production*, 1993, J. of Engineering for Industry.

DRAPER, N.R., SMITH, H. *Applied Regression Analysis*, 1966, ed John Wiley & Sons Inc.

EISHENWAY, A.K., *Performance Improvement in Coordinate Measuring Machines by Errors Compensation*, 1989, J. of Manufacturing Systems, vol.8.

EMAN, K.F., WU, B.T. *A Generalized Geometric Error Model for Multi-Axis Machines*, 1987, Annals of the CIRP, vol. 36.

ETESAMI, F. *Tolerance Verification through Manufactured Part Modeling*, 1988, J. of Manufacturing Systems.

FERREIRA, P.M., LIU, C.R. *A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of a Machining Center*, 1986, Annals of the CIRP, vol. 35.

FORTIN, C., GARANT, M., BALAZINSKI, M. *The Processing of Inspection Data on CAD/CAM System*, 1990, CSME Mechanical Engineering Forum, Univ. of Toronto Campus.

GOLUB, G.H., VAN LOAN, C.F. *Matrix Computations*, 1983, The John Hopkins University Press.

HOLLERBACH, J.M., WAMPLER, C.W. *The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematics Calibration Methods*, 1996, The International J. of Robotics Research.

KALININ, M.A. *Les tolérances en fabrication mécanique*, 1985, Questions de la Construction et la Technologie des Machines-Outils, Moscou (trad. de russe).

KOENIGSBERGER, E. *Design Principles of Metal Cutting Machine Tools*, 1964, ed. McMillan Co., New York.

KOMANDURI, R., FLOM, D.G., LEE, M. *Highlights of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) - Advanced Machining Research Program*, 1985, J. of Engineering for Industry, vol. 107.

KOPS, L., GOULD, M., MIZRACH, M. *Accuracy Analysis in Turning a General Shape Workpiece*, 1992, Pacific Conference on Manufacturing, Osaka.

KOPS, L., GOULD, M., MIZRACH, M. *Improved Analysis of the Workpiece Analysis in Turning Based on the Emerging Diameter*, 1992, Transaction ASME, J. Eng. Ind.

KOSILOVA, A.G., MESHERIAKOV, P.K. *Précision de fabrication*, 1985, Questions de la Construction et la Technologie des Machines-Outils, Moscou (trad. de russe).

KRAVTCHENKO, I. *Modélisation des procédés de fabrication*, 1994, ensemble de conférences soutenues à l'École Polytechnique de Montréal.

KRONENBERG, M. *Machining Science and Application*, 1966, Pergamon Press.

KRUTH, J.P., VANHERCK, P., DE JONGE, L. *Self Calibration Method and Software Error Correction for Three-Dimensional Measuring Machines Using Artefact Measurements*, 1994, Elsevier Science, Measurement 14.

KUNZMANN, H., TRAPET, E., WÄLDELE, F. *A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines Using Reference Objects*, 1990, Annals of the CIRP.

KUNZMANN, H., TRAPET, E., WÄLDELE, F. *Concept for the Traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines*, 1993, Proceedings of the 7th International Precision Seminar, Kobe (Japan).

LAFLAMME, J.K., MAYER, R., CLOUTIER, G. *Calculs et analyse non-publiés extraites d'une recherche effectuée dans la période mai-septembre 1996*

LAZREG, M. *Modélisation de la qualité de production d'une cellule flexible d'usinage*

réactive, 1994, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France.

LIN, P.D., EHMANN, K.F. *Inverse Error Analysis for Multi-Axis Machines*, 1994, J. of Engineering for Industry.

LU, S.C.Y., WILHELM, R.G. *Automating Tolerance Synthesis : A Framework and Tools*, 1991, J. of Manufacturing Systems.

MA, Q., TULLAR, P. *Why Linear Measurements are not Sufficient*, 1994, Journal API. The Metrologist, vol.1.

MAYER, R.J.R., ANDRIAN, R., FORTIN, C., CLOUTIER, G., LUONG, T. *Performance Verification and Monitoring of NC Machine Tools for In Process Part Measurement by Touch Probing*, 1997, Proceeding of the 32nd International Matador Conference, Manchester.

MAYER, R.J.R. *Procédure d'annulation de l'erreur d'alignement de l'artefact pour les axes de rotation*, 1998, non publié.

MAYER, R.J.R., ANDRIAN, R., FORTIN, C., CLOUTIER, G.M. *Machine Tool Capability Diagnostic by Touch Probing*, 1998, Symposium on Manufacturing, Automation and Robotics, CSME98, Ryerson Polytechnic Institute.

MENG, C.H., YAU, H.T., LAI, G.Y., MILLER, R.A. *Statistical Evaluation of Form Tolerances Using Discrete Measurement Data*, 1990, Production Engineering Division, vol.47, Advances in Integrated Product Design and Manufacturing, ed. P.H. Cohen, S.B. Joshi, ASME.

MOU, J., DONMEZ, M.A., CETINKUNT, S. *An Adaptive Error Correction Method Using Feature-Based Analysis Techniques for a Machine Performance Improvement, Part 1 : Theory Derivation and Part 2 : Experimental verification*, 1995, J. of Engineering for Industry.

MOU, J., LIU, C.R. *An Adaptive Methodology for Machine Tool Error Correction*, 1995, J. of Engineering for Industry.

MOU, J., LIU, C.R. *An Innovative Approach to Increase the Accuracy of Multi-Axis Machines for Process-Intermittent Inspection*, 1996, J. of Manufacturing Science and Engineering.

MOU, J. *A Method of Using Neural Networks and Inverse Kinematics for Machine Tools Error Estimation and Correction*, 1997, J. of Manufacturing Science and Engineering.

NORMES ASME B5.54-1992, *Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers*, ASME.

NORMES ASME Y 14.5.1 M-1994, *Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing Principles*, ASME.

NORMES ISO 230/1-1986, et ISO 230/2-1988, *Tolérancement Géométrique*.

OUYANG, J.F., JAWAHIR, I.S. *Ball Array Calibration on a Coordinate Measuring Machine Using a Gage Block*, 1995, Elsevier Science, Measurement 16.

PERSONNE, D., PASCO, Y. *La mesure assistée par ordinateur chez Renault Automation*,

1991, *Revue Pratique de Contrôle Industriel*, no. 167.

RAFFIN, E., BERTHIAU, J.R. *Technologie générale professionnelle de mécanique*, 1969, Tome 1. ed. Dunod Paris.

RAUGH, M.R. *Absolute Two-Dimensional Sub-Micron Metrology for Electron Beam Litography*, 1985, Precision Engineering.

REASON, R.E. *Report on the Measurement of Roundness*, 1966, Rank Taylor Hobson Ltd.

REEVE, C.P. *A Method of Calibrating Two-Dimensional Reference Plates*, 1974, NBSIR 74-532.

SARTORI, S., ZHANG, G.X. *Geometric Error Measurement and Compensation of Machines*, 1995, Annals of the CIRP, vol. 44.

SCHELLEKENS, P.H., SOONS, J.A., SPAAN, H., LOOCK, V., TRAPET, E., DOOMS, H. de RUITER, MAISCH, M. *Development of Methods for the Numerical Errors Correction of Machine-Tools*, 1993, Final project report, Commission of the European Communities, EC Brussels.

SHIN, Y.C., WEI, Y. *A Statistical Analysis of Positional Errors of a Multi-Axis Machine Tool*, 1992, Precision Engineering.

SOONS, J.A., SCHELLEKENS, P.H. *On the Calibration of Multi-Axis Machines Using Distance Measurements*, 1992, Proceedings of the 4th ISNQC.

SOONS, J.A., THEWS, F.C., SCHELLEKENS, P.H. *Modeling the Errors of Multi-Axis Machines : a General Methodology*, 1992, Precision Engineering.

TAGUCHI, G. *Introduction to Quality Engineering. Designing Quality into Products and Processes*, 1986, Asian Productivity Organization, Tokyo.

TAGUCHI, G. *Taguchi on Robust Technology Development. Bringing Quality Engineering Upstream*, 1993, ASME Press, New York.

Tool and Manufacturing Handbook, 1989, SME Michigan.

TORVINEN, S., ANDERSSON, P.H., VIIHINEN, J., HÖLSÄ, J. *An Off-Line Condition Monitoring System for Machine Tools*, 1995, Laser Metrology and Machine Performance II.

TRAPET, E., WÄLDELE, F. *Determination of the Parametric Errors of Coordinate Measuring Machines and Machine Tools Using Reference Objects*, 1989, VDI Berichte no.761.

TRAPET, E., WÄLDELE, F. *A Reference Artifact-Based Method to Determine the Parametric Error Components*, 1991, Measurement Review, vol. 9.

VELDHUIS, S.C., ELBESTAWI, M.A. *Modeling and Compensation for Five Axis Machine Tool Errors*, 1994, Manufacturing Science and Engineering, vol.2, ASME.

YANG, S., YUAN, J., NI, J. *Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation*, 1996, J. of Manufacturing Systems.

ZHANG, G. *Error Compensation of Coordinate Measuring Machines*, 1985, Annals of the CIRP, vol. 1.

ZHANG, G. OUYANG, R., LU, B. A Displacement Method for Machine Geometry Calibration, 1988, Annals of the CIRP.

ANNEXE A: L'HYPOTHÈSE DES PETITS PARAMÈTRES. CALCUL DES MATRICES DE ROTATION

Cette annexe contient les détails de calcul des matrices de rotation qui font partie des matrices de transformation. On cherche les matrices R qui sont incluses dans les matrices homogènes de type

$$T_{\text{ges}} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrices de rotation pour les axes linéaires du centre d'usinage

Considérons les rotations subies par l'axe u , soit-il x , y ou z . Les rotations se font autour des directions i_u , j_u et k_u .

$$R_{(\gamma)}(u) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_x(u) & -\sin \gamma_x(u) \\ 0 & \sin \gamma_x(u) & \cos \gamma_x(u) \end{bmatrix}$$

$$R_{(y)}(u) = \begin{bmatrix} \cos\gamma_y(u) & 0 & \sin\gamma_y(u) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma_y(u) & 0 & \cos\gamma_y(u) \end{bmatrix}$$

$$R_{(z)}(u) = \begin{bmatrix} \cos\gamma_z(u) & -\sin\gamma_z(u) & 0 \\ \sin\gamma_z(u) & \cos\gamma_z(u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice résultante est le produit des matrices $R_{(x)}(u)$, $R_{(y)}(u)$, $R_{(z)}(u)$ en respectant l'hypothèse de petits angles.

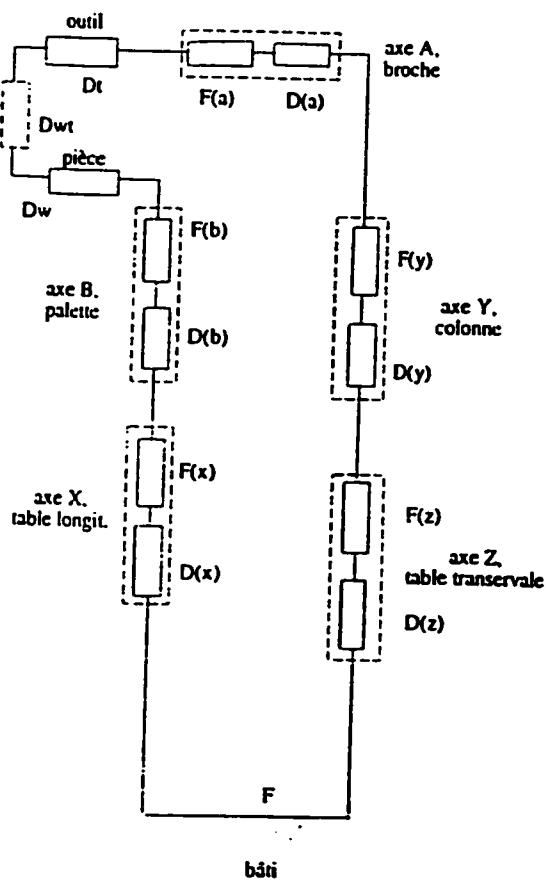
$$R(u) = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_z(u) & \gamma_y(u) \\ \gamma_z(u) & 1 & -\gamma_x(u) \\ \gamma_y(u) & \gamma_x(u) & 1 \end{bmatrix}$$

De la même façon nous voulons calculer la matrice de rotation résultante pour un axe u quand les petits angles ne dépendent pas de la position de l'axe. Dans ce cas la variable u disparaît de toutes les notations. La matrice R_u pour l'axe u , soit-il x , y ou z , devient:

$$R_u = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{z,u} & \gamma_{y,u} \\ \gamma_{z,u} & 1 & -\gamma_{x,u} \\ \gamma_{y,u} & \gamma_{x,u} & 1 \end{bmatrix}$$

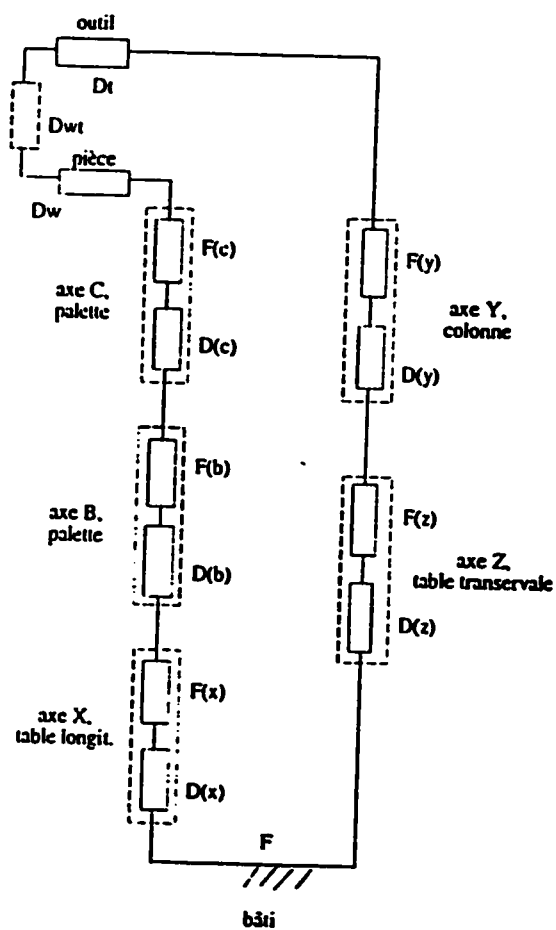
**ANNEXE B: CONFIGURATIONS DES CENTRES
D'USINAGE OMNIMILL 60 ET MITSUI SEIKI. GRAPHIQUES ET
VALIDATION NUMÉRIQUE DU NIVEAU 1 DU MODÈLE**

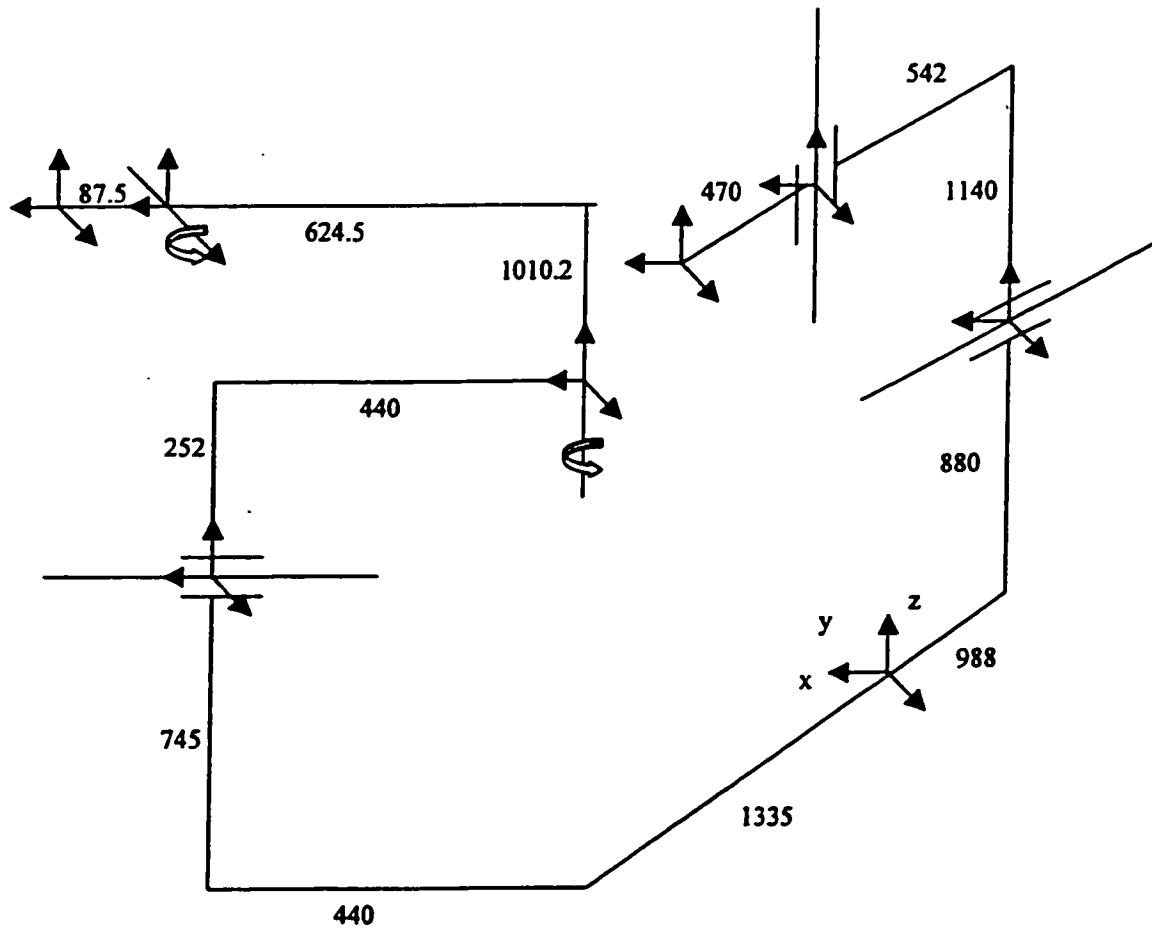
CONFIGURATION DU CENTRE D'USINAGE OMNIMILL 60



CONFIGURATION DU CENTRE D'USINAGE MITSUI SEIKI

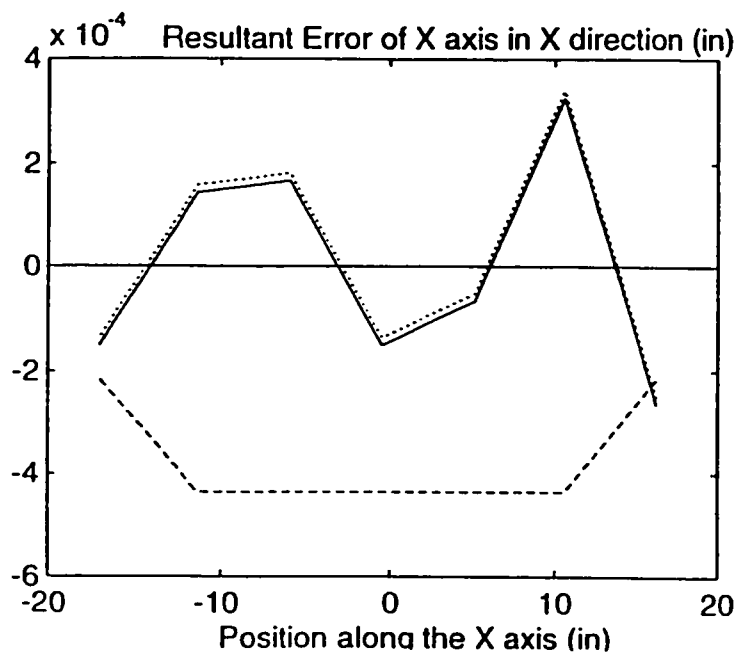
169





NOTE: Les mesures sont en mm.

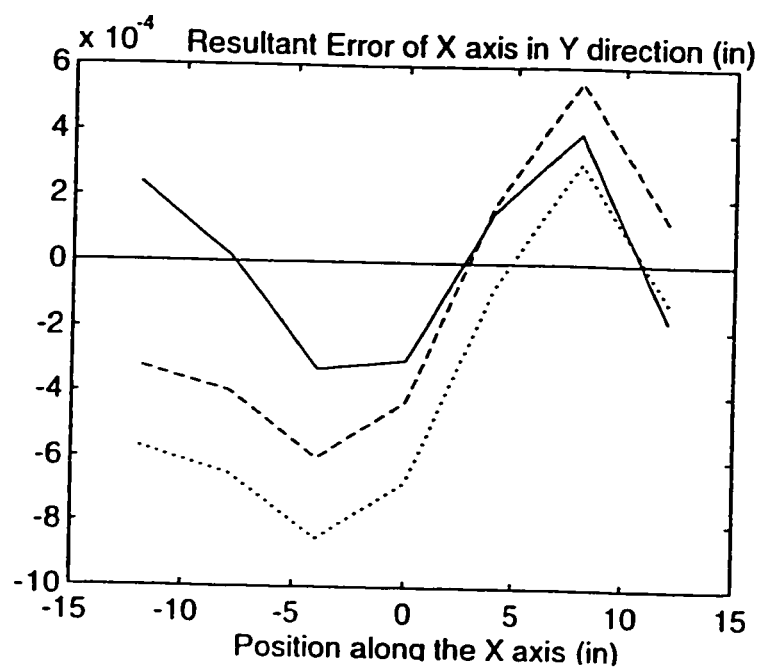
Résultats du test de l'axe X dans la direction X, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand seulement l'axe X est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

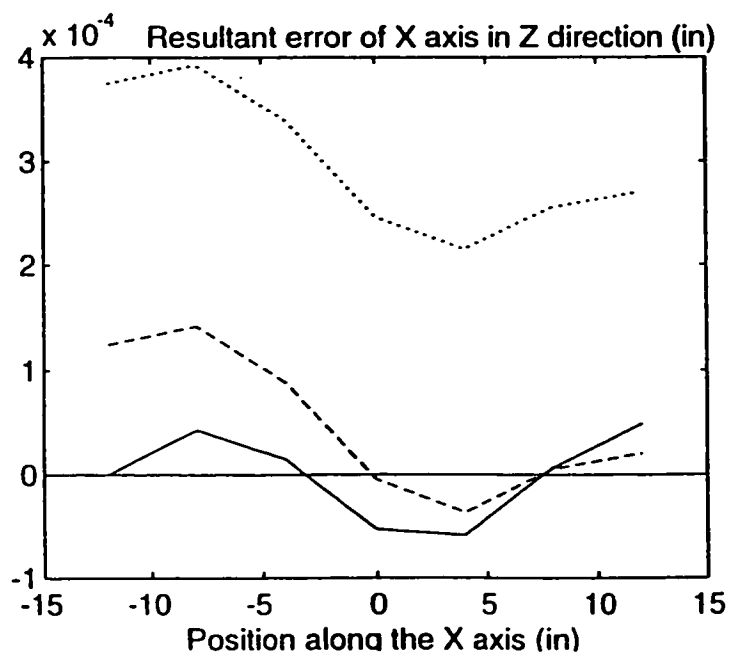
Résultats du test de l'axe X dans la direction Y, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand seulement l'axe X est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

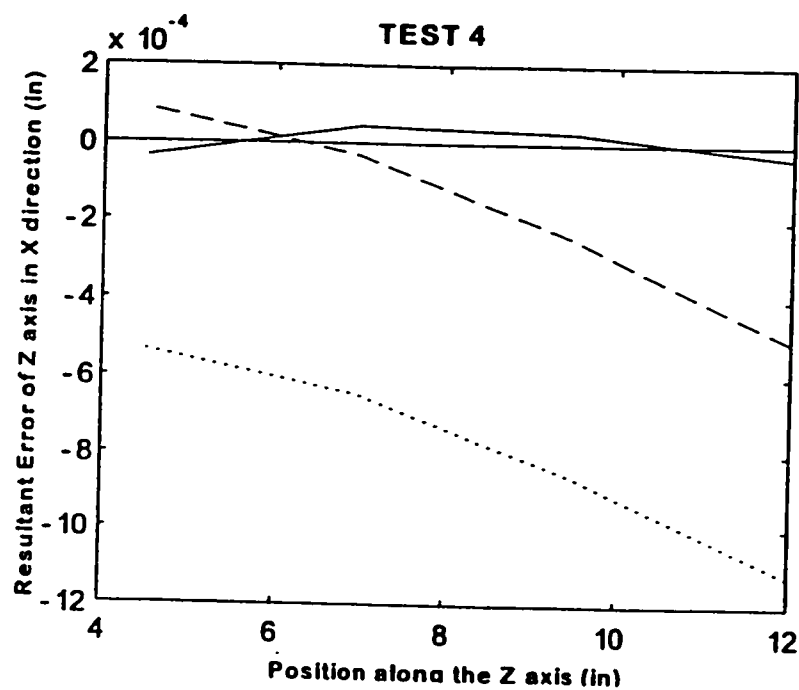
Résultats du test de l'axe X dans la direction Z, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand seulement l'axe X est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

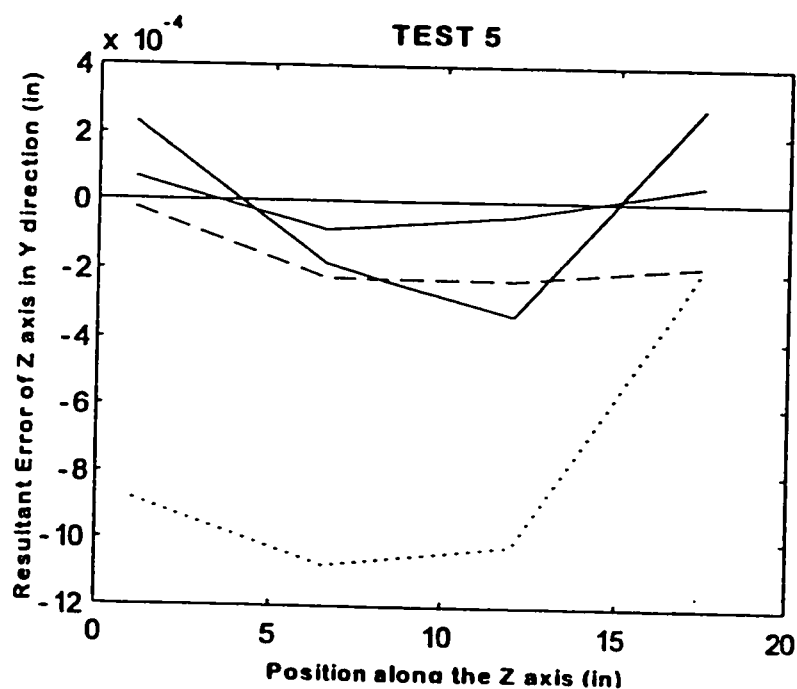
Résultats du test de l'axe Z dans la direction X, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand seulement l'axe Z est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe Z dans la direction Y, OMNIMILL 60



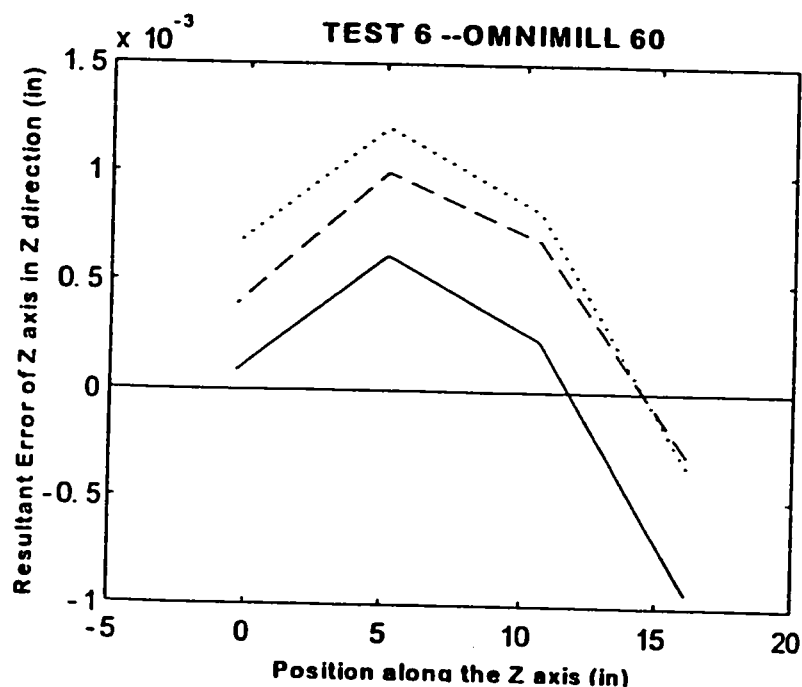
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand seulement l'axe Z est simulé en étant dégradé

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand tous les axes sont dégradés

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur co incident)

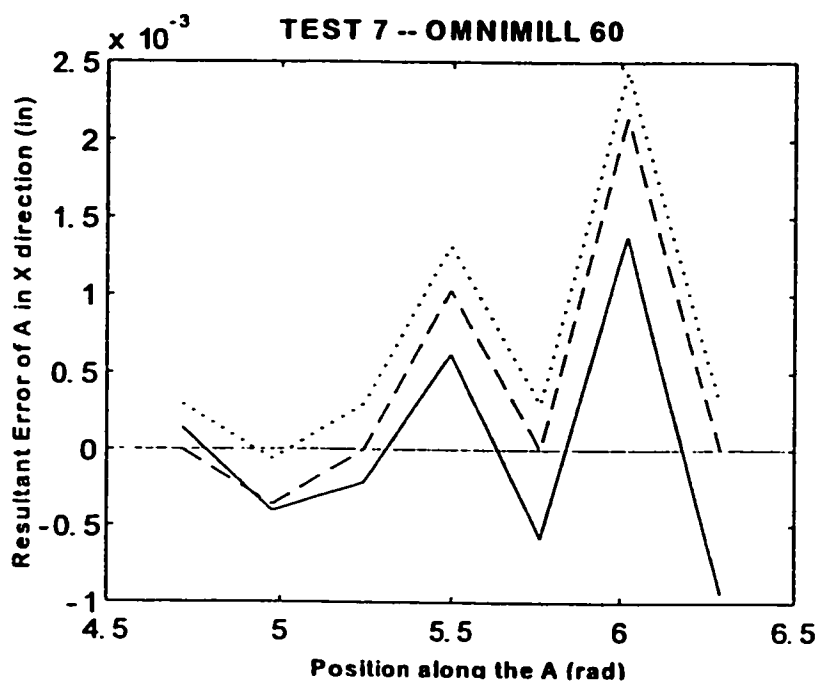
Résultats du test de l'axe Z dans la direction Z, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand seulement l'axe Z est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe A dans la direction X, OMNIMILL 60



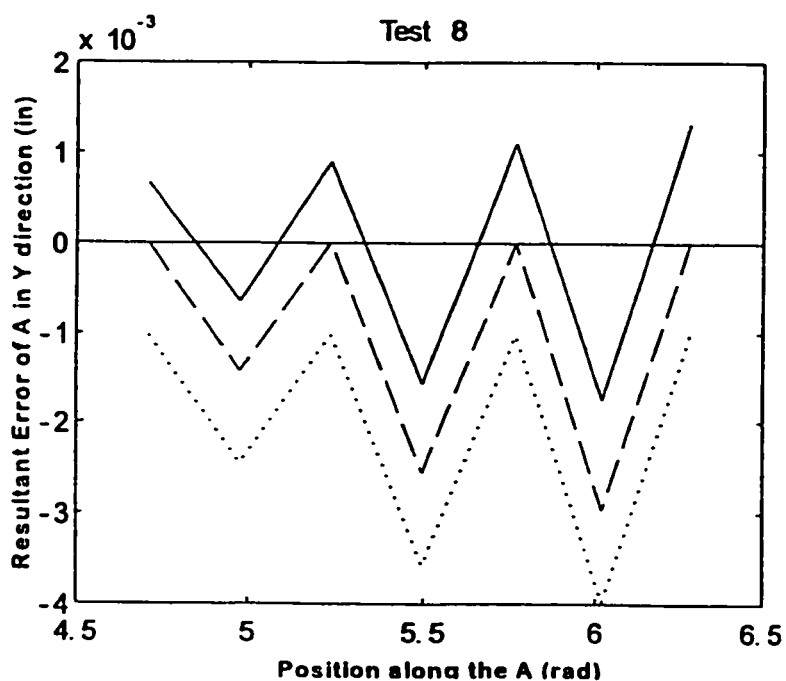
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe A quand seulement l'axe A est simulé en étant dégradé

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe A quand tous les axes sont dégradés

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

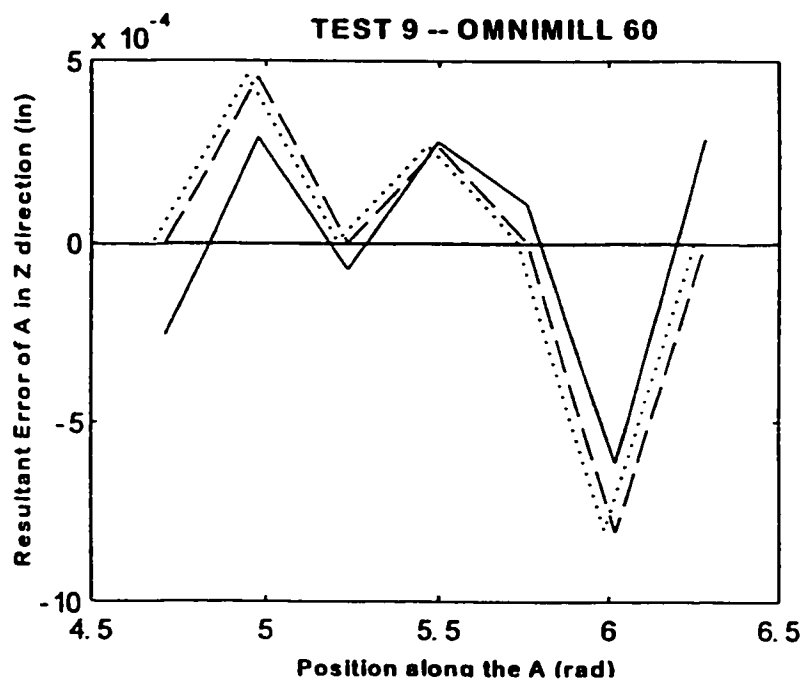
Résultats du test de l'axe A dans la direction Y, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe A quand seulement l'axe A est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe A quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe A dans la direction Z, OMNIMILL 60



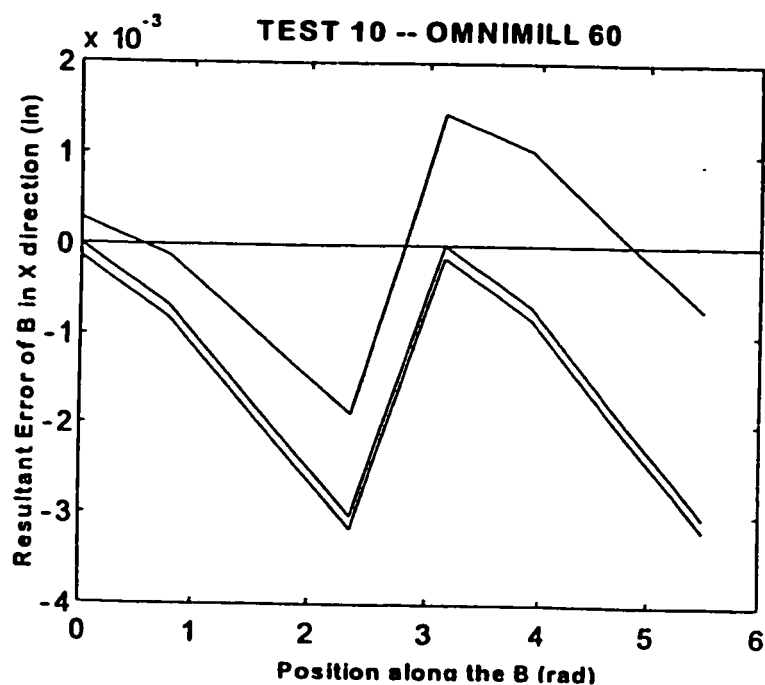
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe A quand seulement l'axe A est simulé en étant dégradé

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe A quand tous les axes sont dégradés

— représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

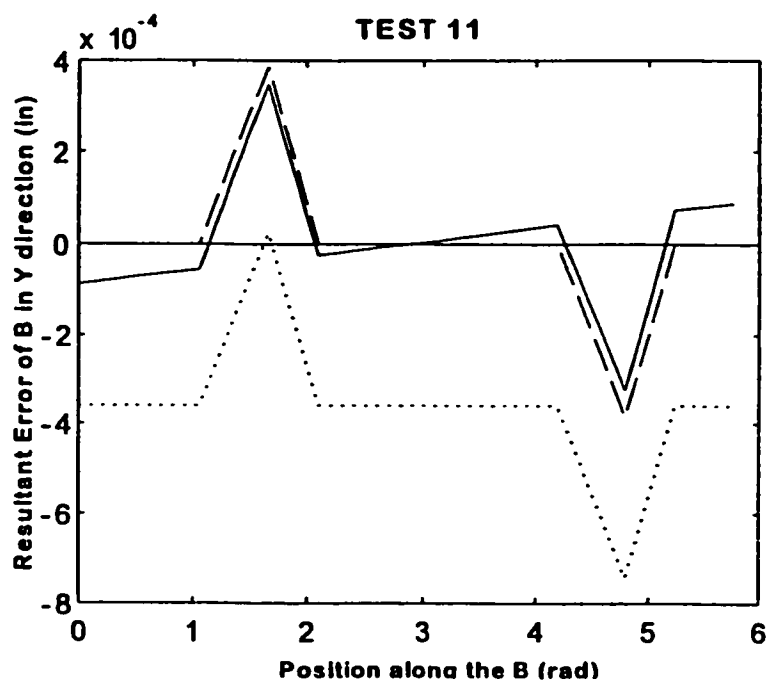
Résultats du test de l'axe B dans la direction X, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand seulement l'axe B est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

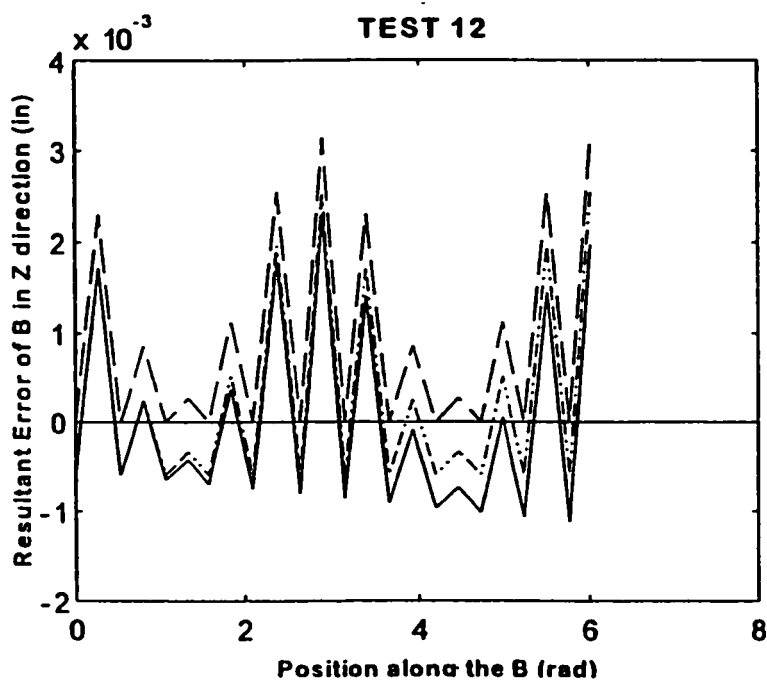
Résultats du test de l'axe B dans la direction Y, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand seulement l'axe B est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur co incident)

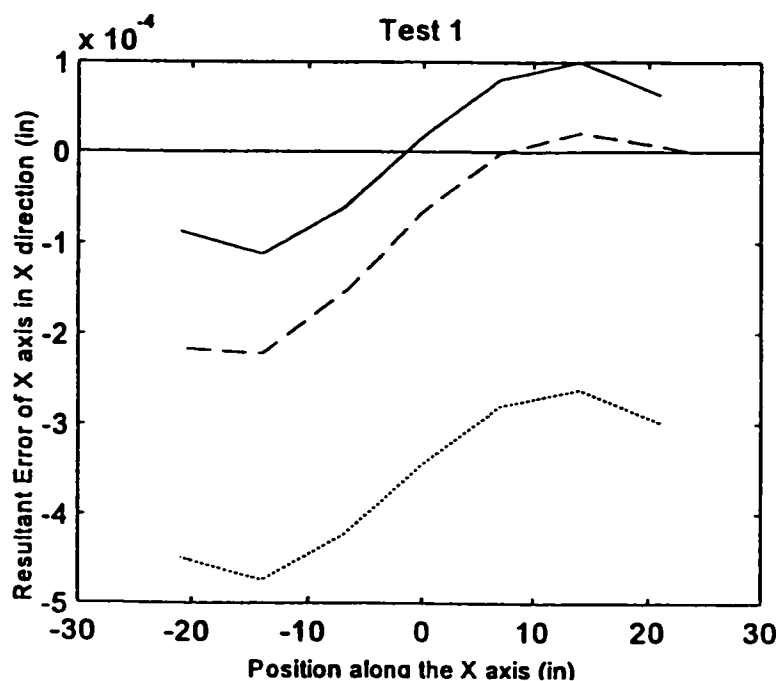
Résultats du test de l'axe B dans la direction Z, OMNIMILL 60



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand seulement l'axe B est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe X dans la direction X, MITSUI SEIKI



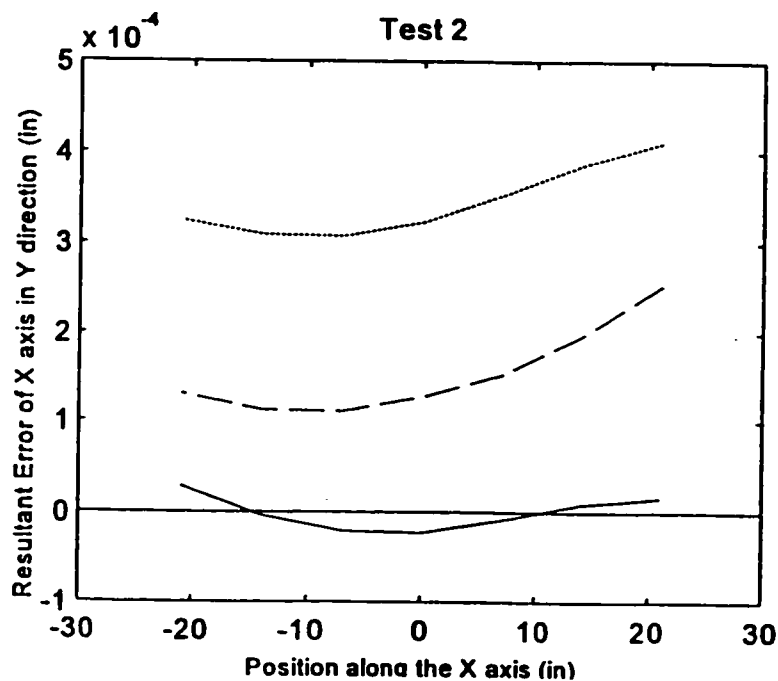
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand seulement l'axe X est simulé en étant dégradé

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand tous les axes sont dégradés

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur co  incident)

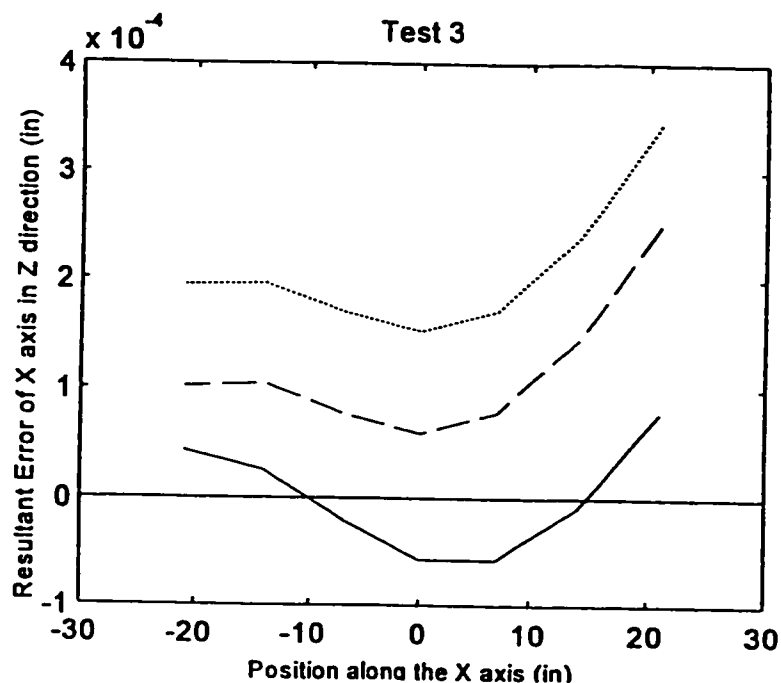
Résultats du test de l'axe X dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand seulement l'axe X est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

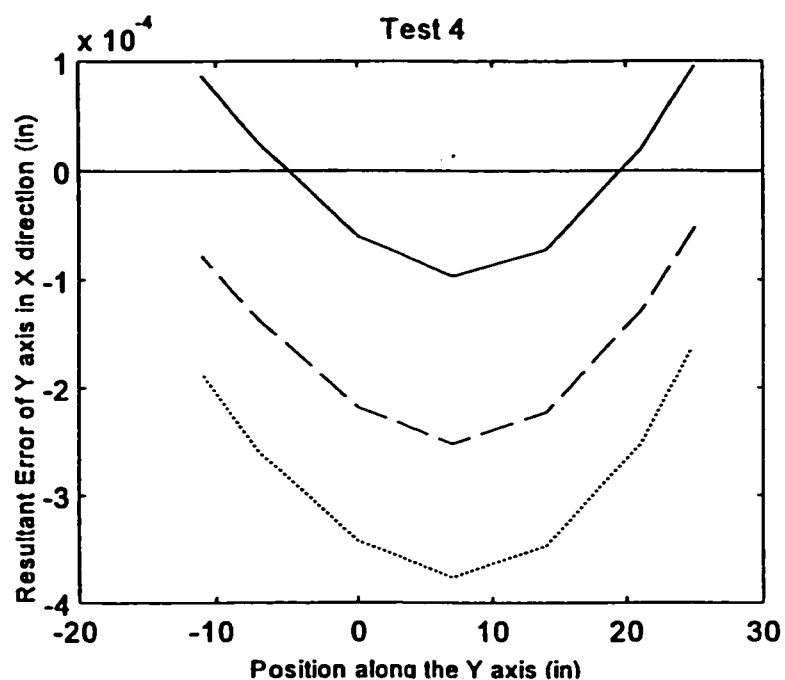
Résultats du test de l'axe X dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand seulement l'axe X est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

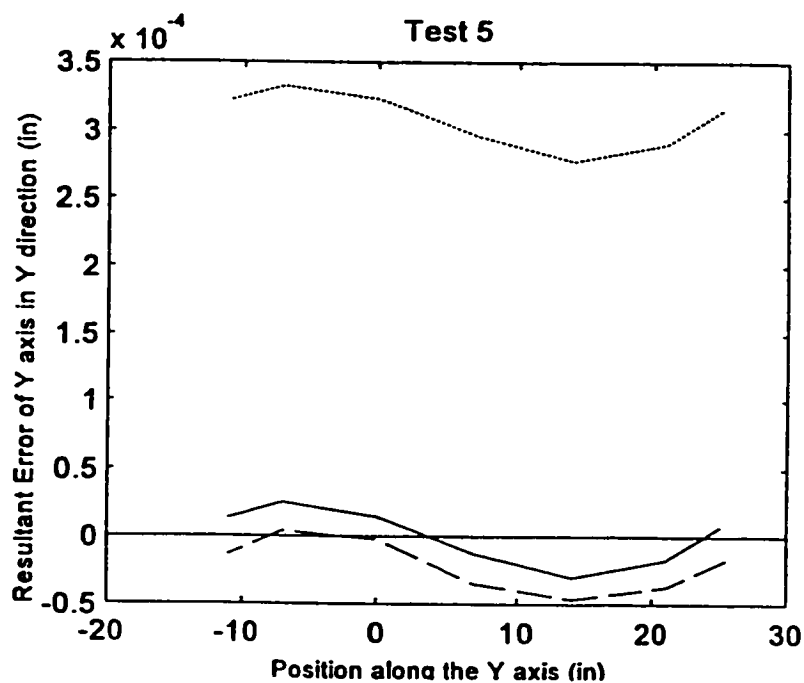
Résultats du test de l'axe Y dans la direction X, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand seulement l'axe Y est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

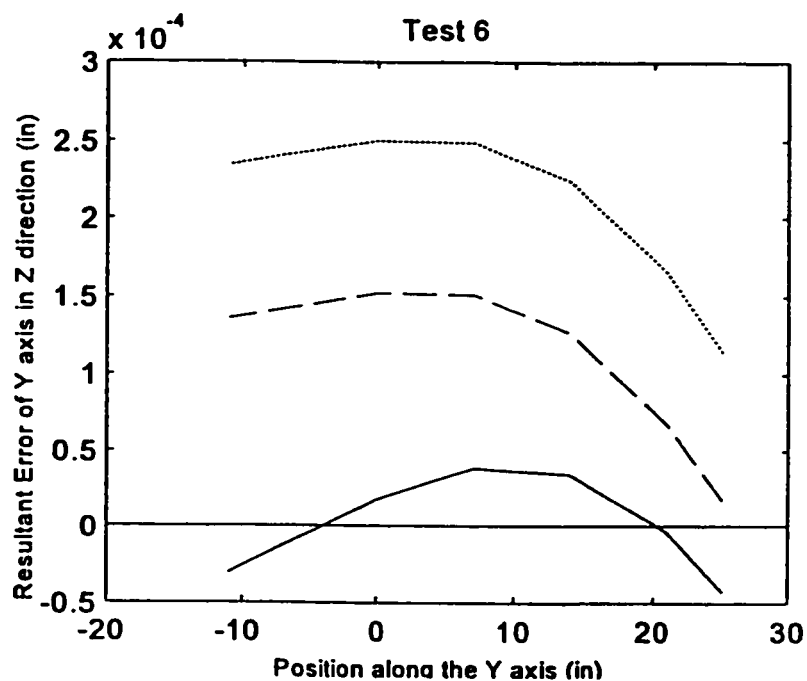
Résultats du test de l'axe Y dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand seulement l'axe Y est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

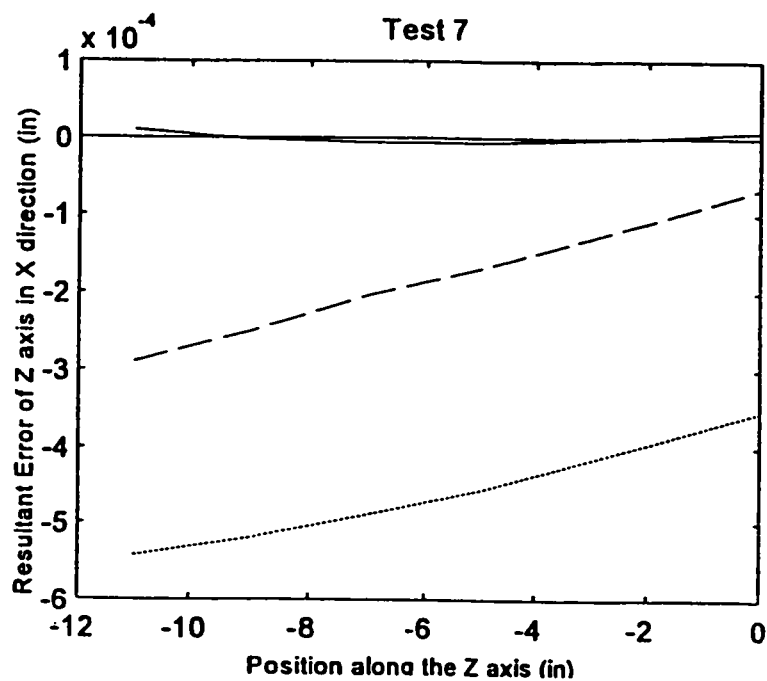
Résultats du test de l'axe Y dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand seulement l'axe Y est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe Z dans la direction X, MITSUI SEIKI



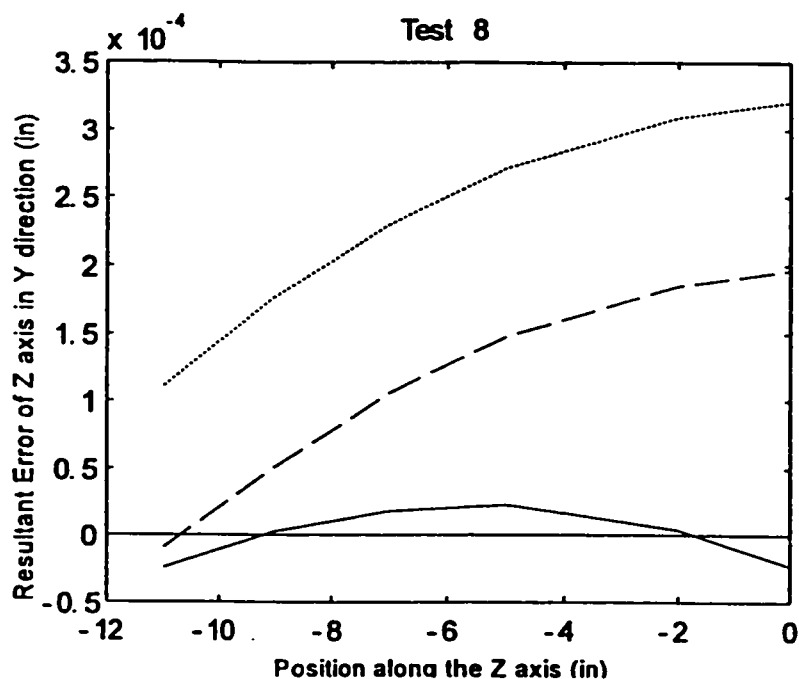
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand seulement l'axe Z est simulé en étant dégradé

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand tous les axes sont dégradés

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

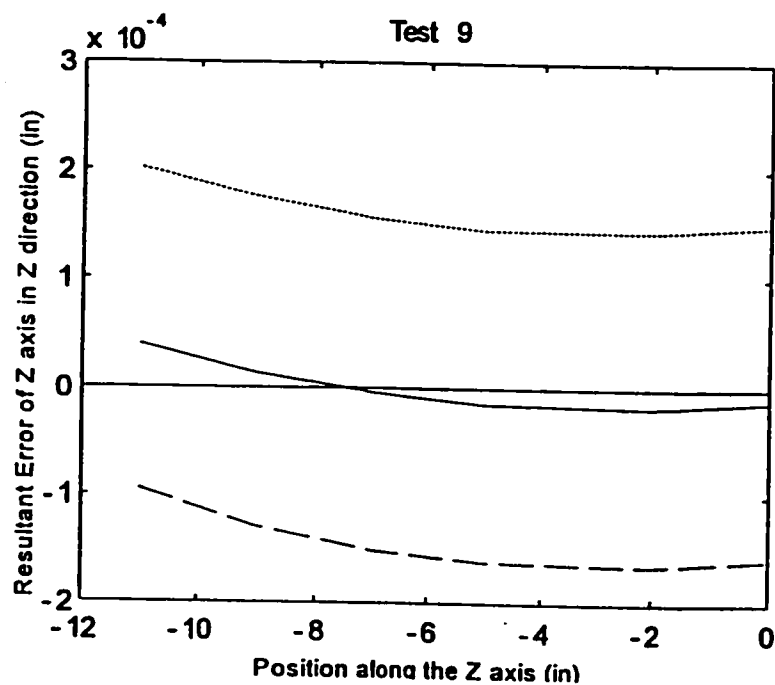
Résultats du test de l'axe Z dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand seulement l'axe Z est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

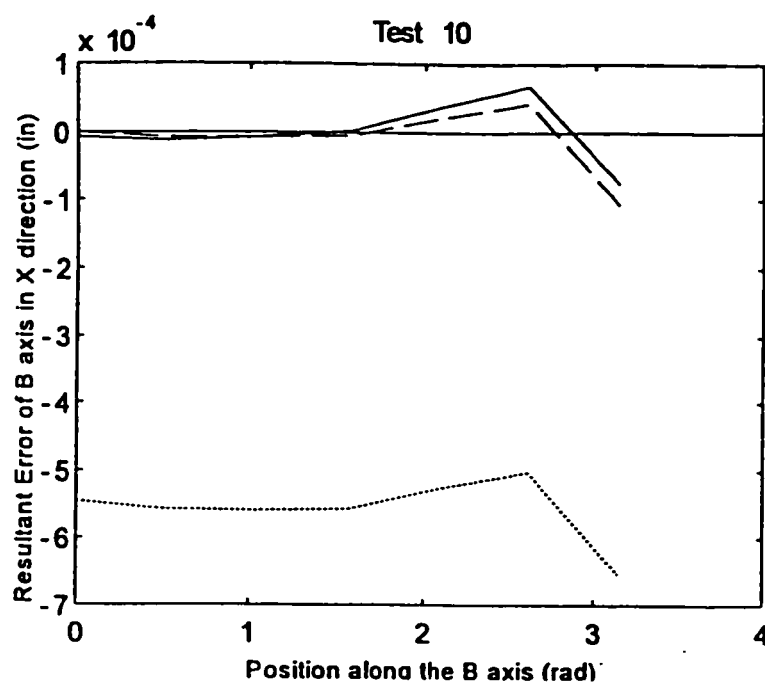
Résultats du test de l'axe Z dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand seulement l'axe Z est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe B dans la direction X, MITSUI SEIKI



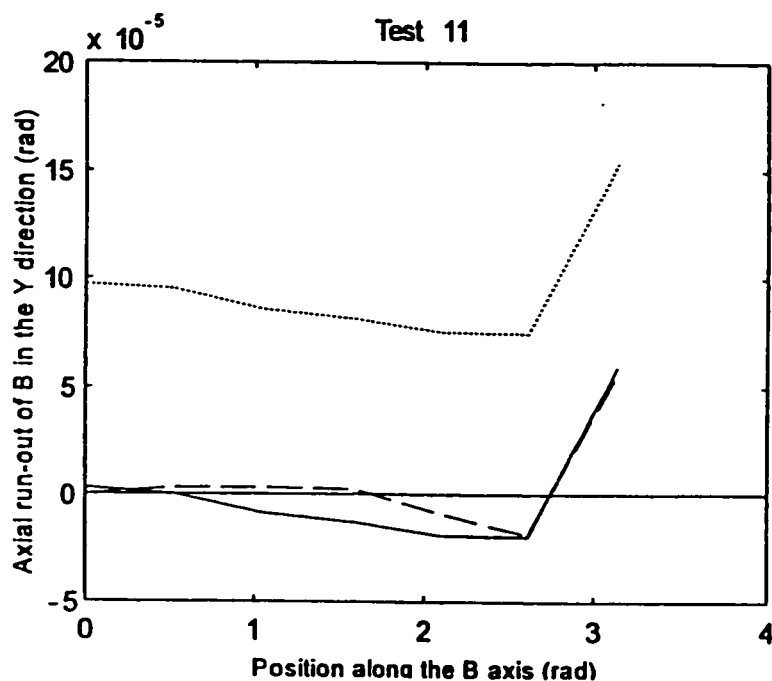
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand seulement l'axe B est simulé en étant dégradé

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand tous les axes sont dégradés

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur co  incident)

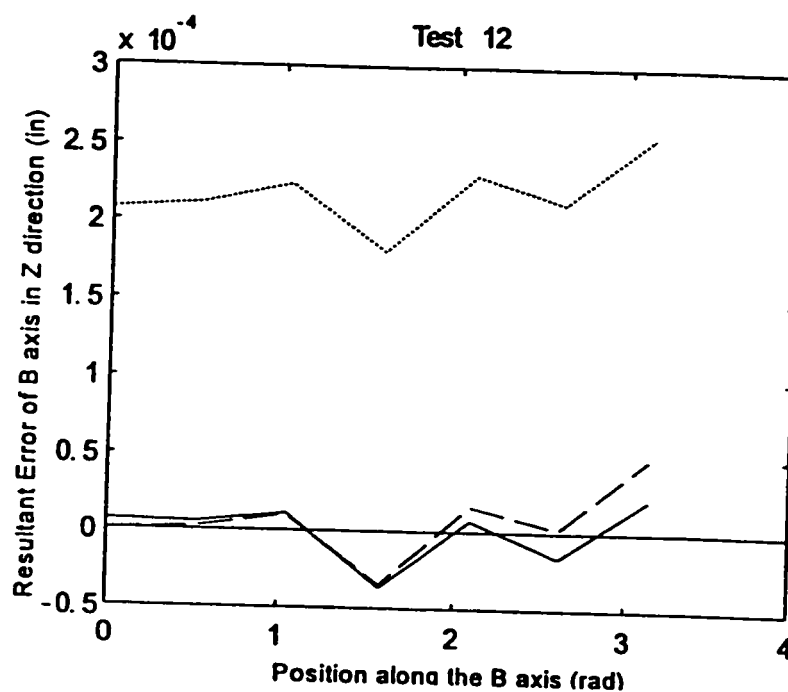
Résultats du test de l'axe B dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand seulement l'axe B est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

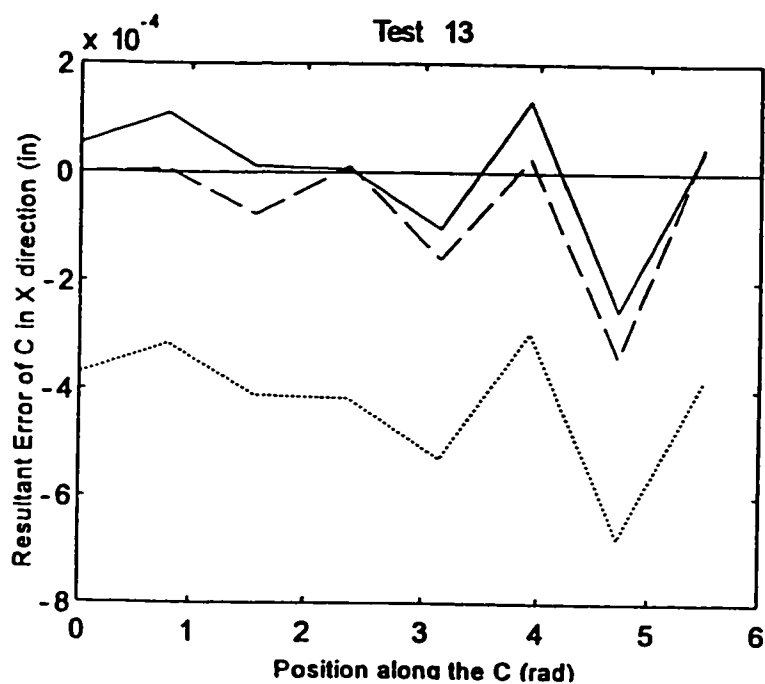
Résultats du test de l'axe B dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand seulement l'axe B est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

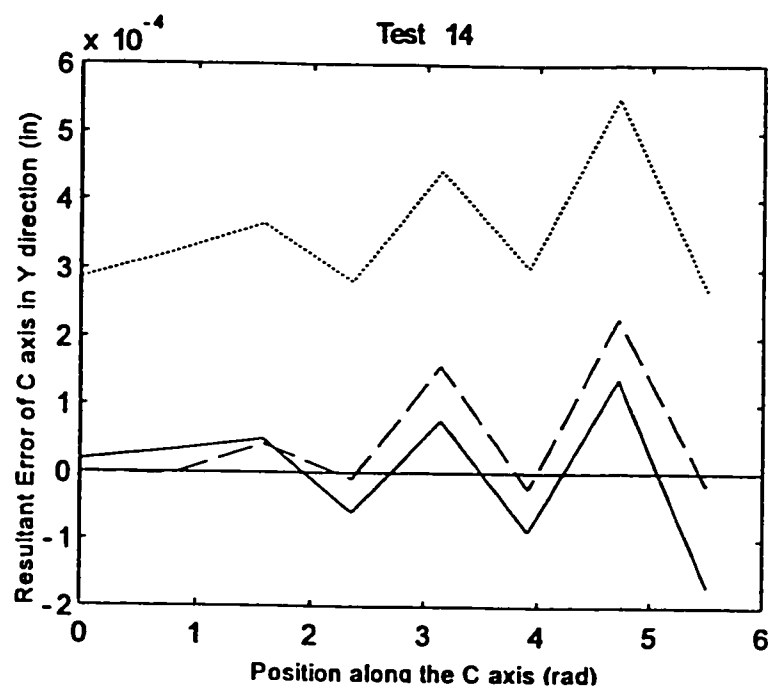
Résultats du test de l'axe C dans la direction X, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand seulement l'axe C est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

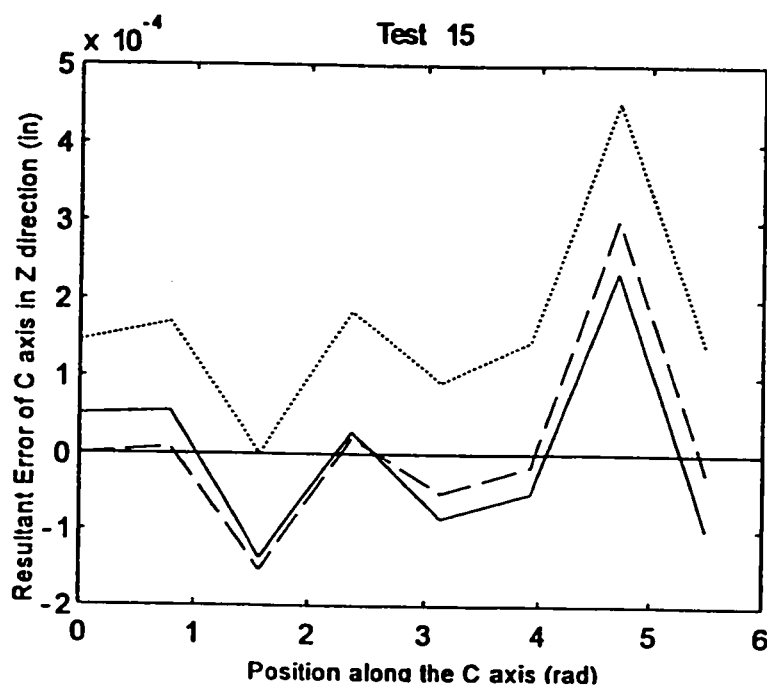
Résultats du test de l'axe C dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand seulement l'axe C est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe C dans la direction Z, MITSUI SEIKI

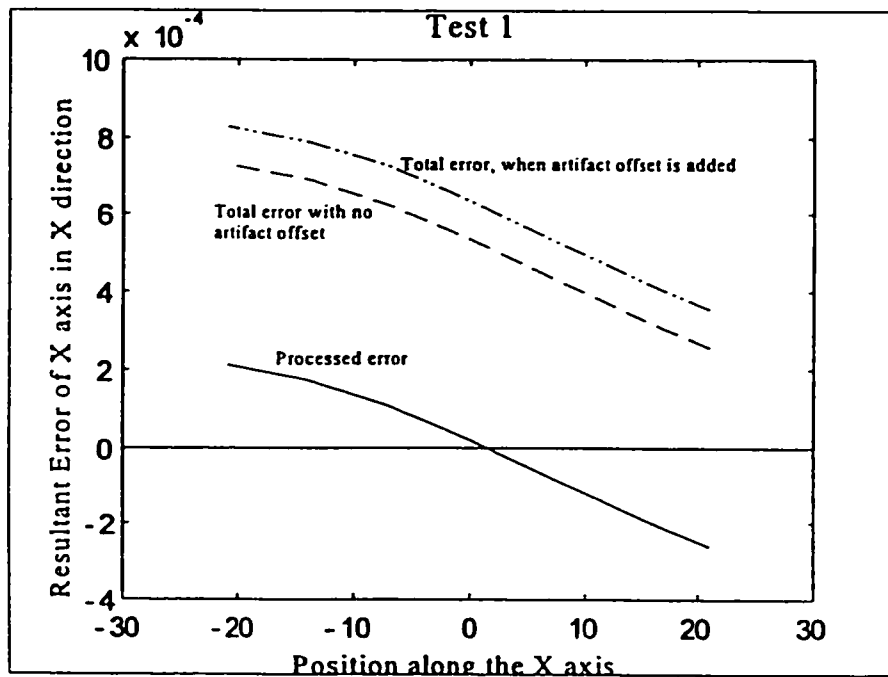


Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand seulement l'axe C est simulé en étant dégradé
- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand tous les axes sont dégradés
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

ANNEXE C: GRAPHIQUES ET VALIDATION NUMÉRIQUE DU NIVEAU 1 DU MODÈLE – ÉTUDE DE L'ERREUR D'ALIGNEMENT

Résultats du test de l'axe X dans la direction X, MITSUI SEIKI



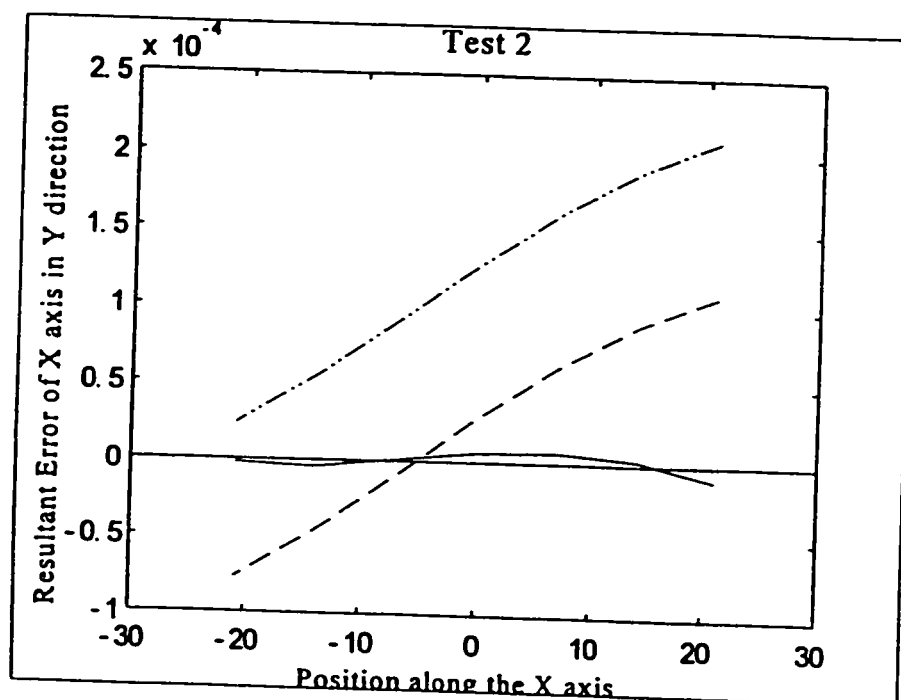
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe X en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

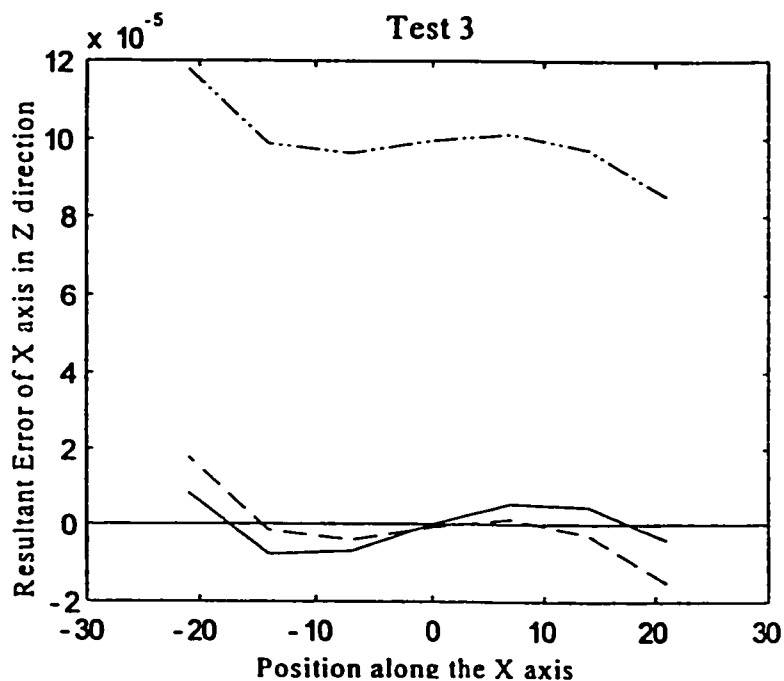
Résultats du test de l'axe X dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)
- représentation des erreurs résultantes de l'axe X en présence d'une erreur d'alignement
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe X dans la direction Z, MITSUI SEIKI



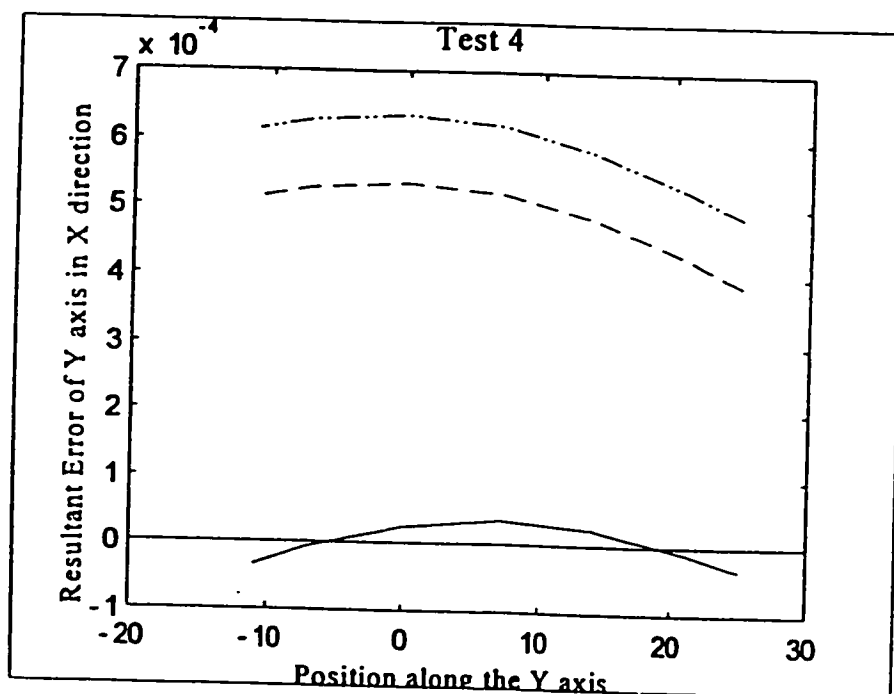
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe X quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

.... représentation des erreurs résultantes de l'axe X en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

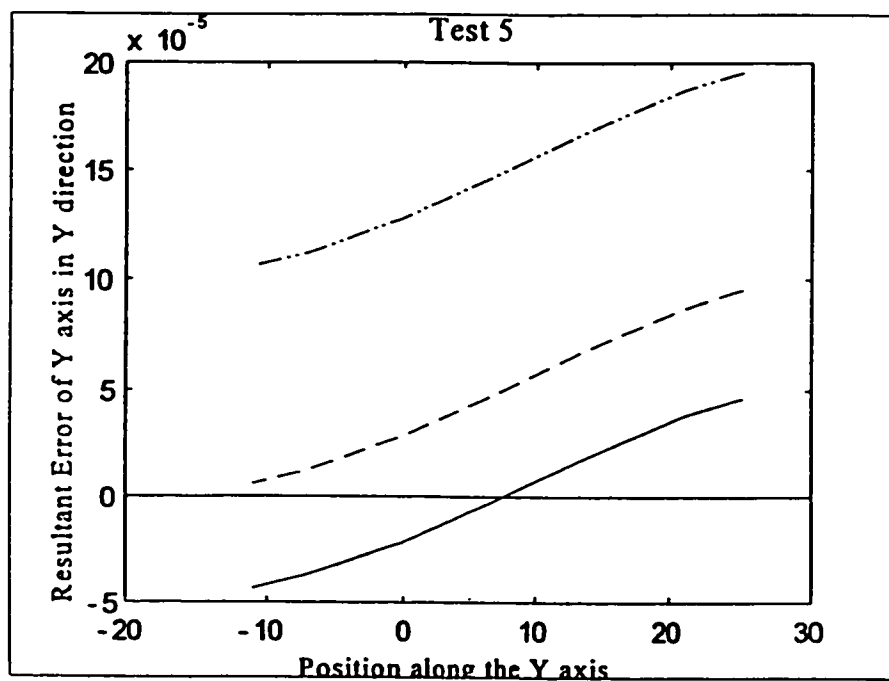
Résultats du test de l'axe Y dans la direction X, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y en présence d'une erreur d'alignement
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe Y dans la direction Y, MITSUI SEIKI



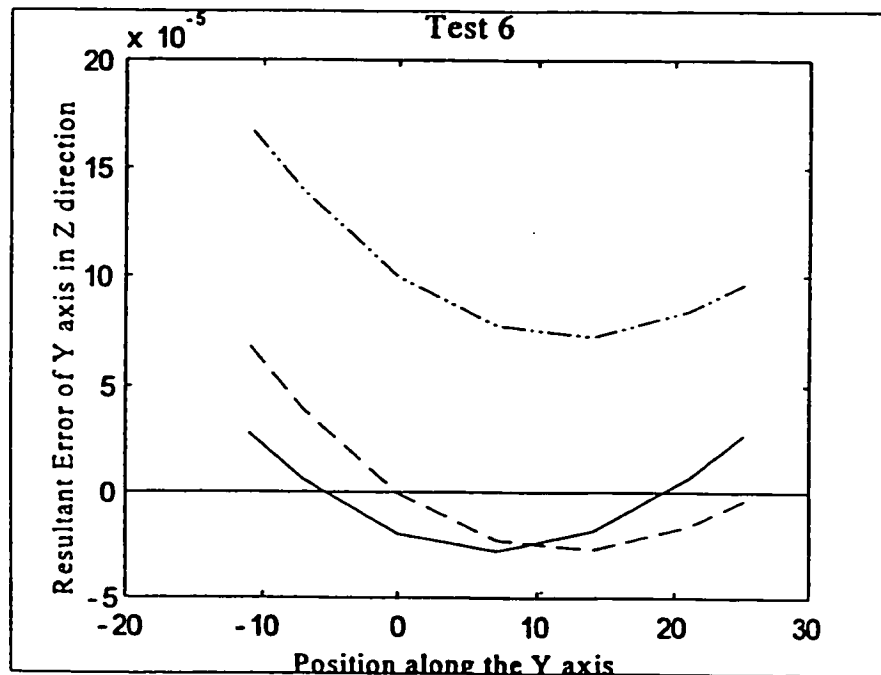
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

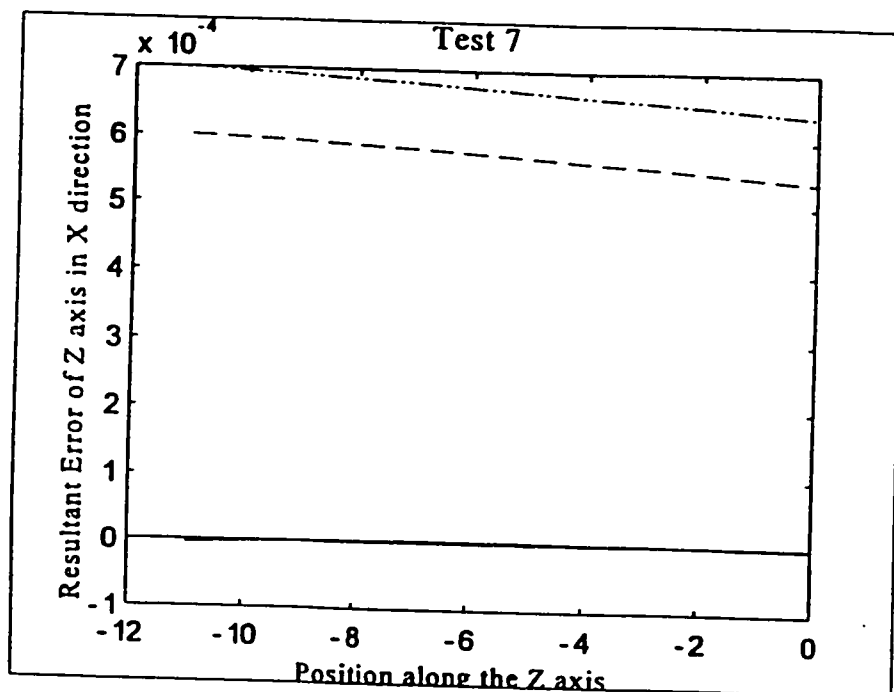
Résultats du test de l'axe Y dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)
- représentation des erreurs résultantes de l'axe Y en présence d'une erreur d'alignement
- représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe Z dans la direction X, MITSUI SEIKI



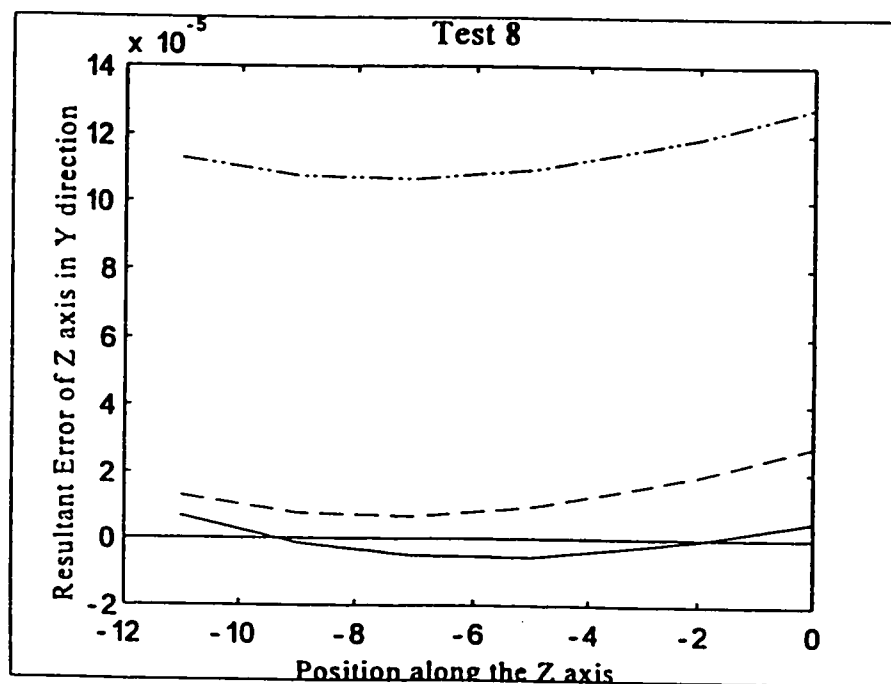
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

--- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

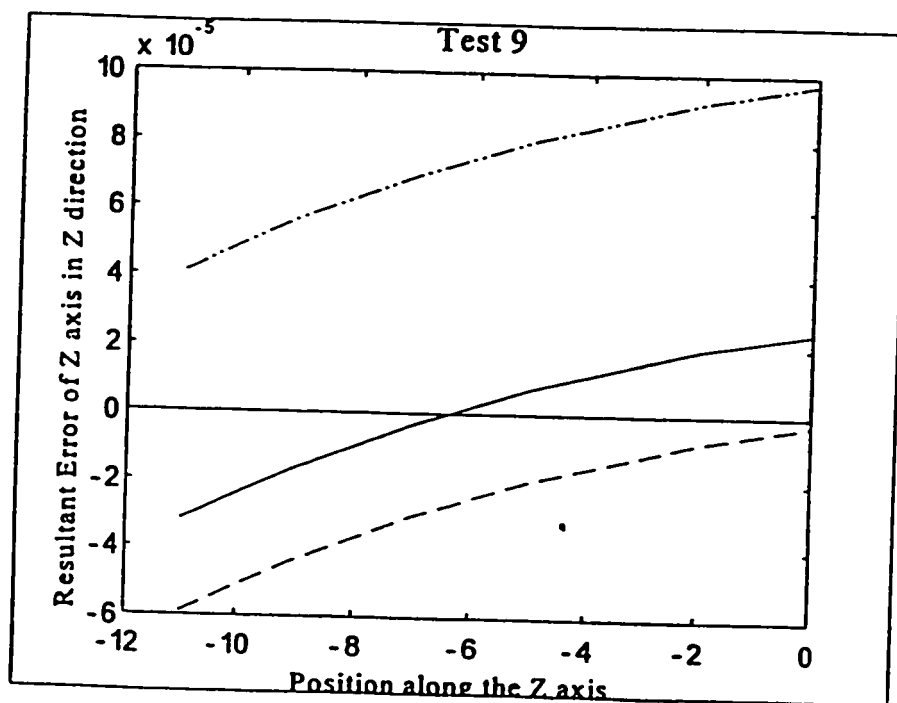
Résultats du test de l'axe Z dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)
- .-.-.- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z en présence d'une erreur d'alignement
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

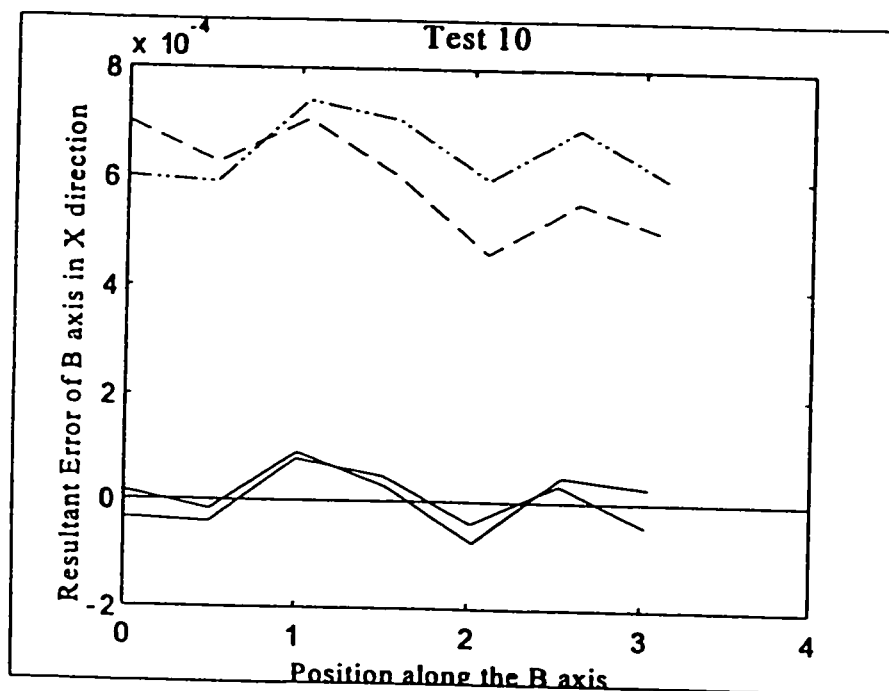
Résultats du test de l'axe Z dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe Z quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)
- · — · — représentation des erreurs résultantes de l'axe Z en présence d'une erreur d'alignement
- représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe B dans la direction X, MITSUI SEIKI



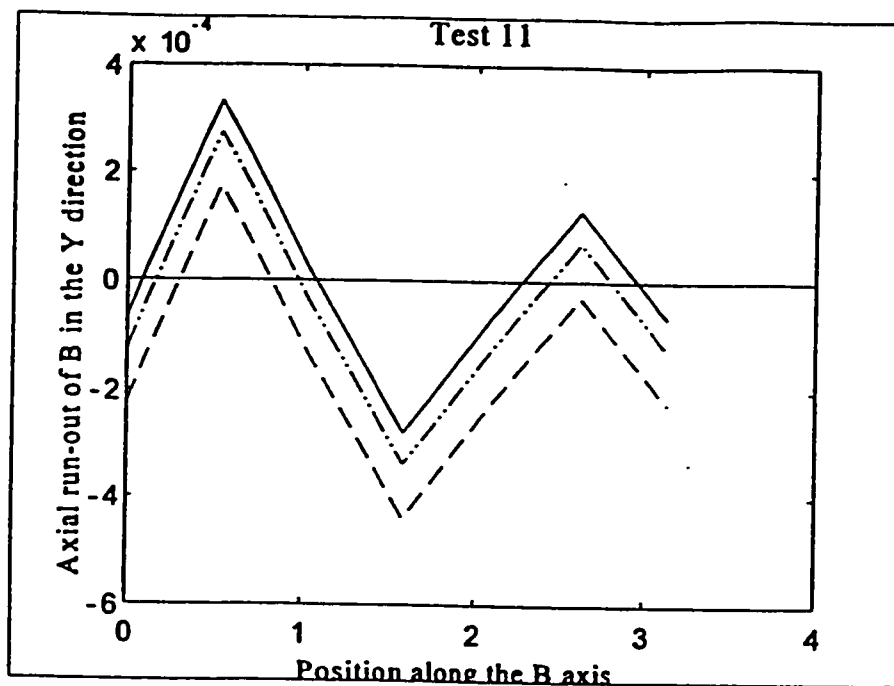
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

___ représentation des erreurs résultantes de l'axe B en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau I pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe B dans la direction Y, MITSUI SEIKI



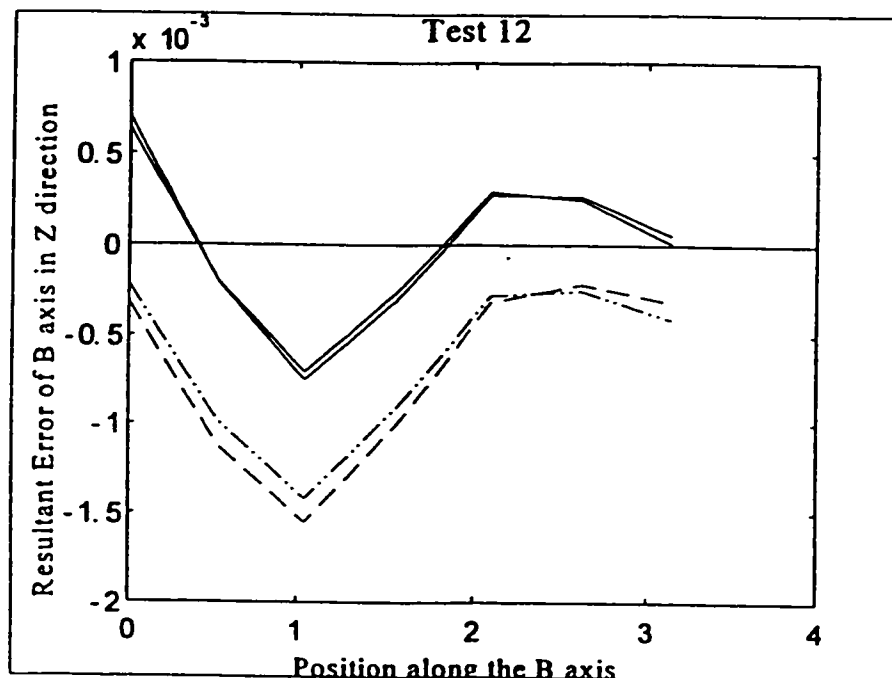
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

..... représentation des erreurs résultantes de l'axe B en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe B dans la direction Z, MITSUI SEIKI



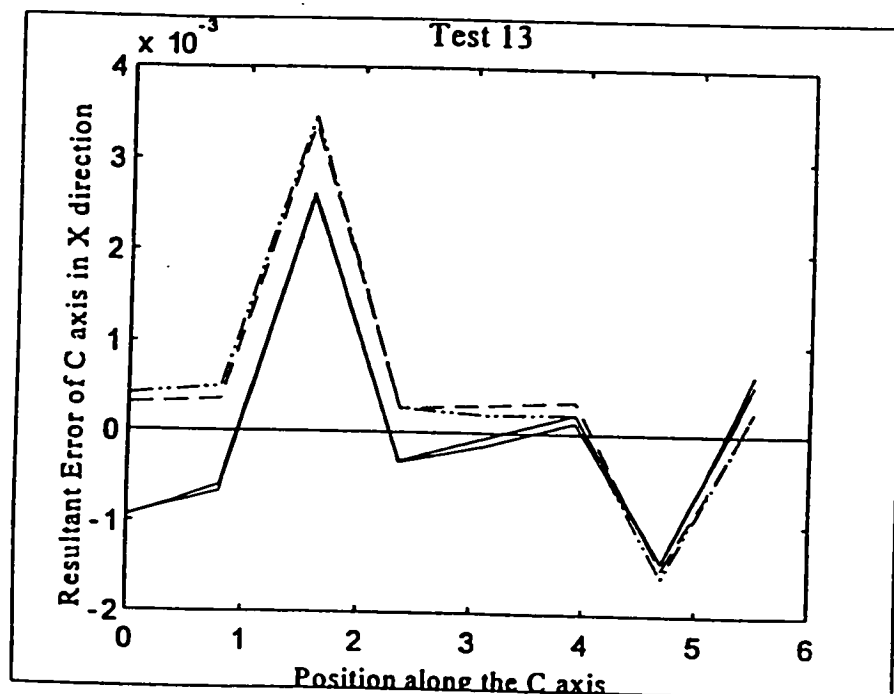
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe B quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

___ représentation des erreurs résultantes de l'axe B en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe C dans la direction X, MITSUI SEIKI



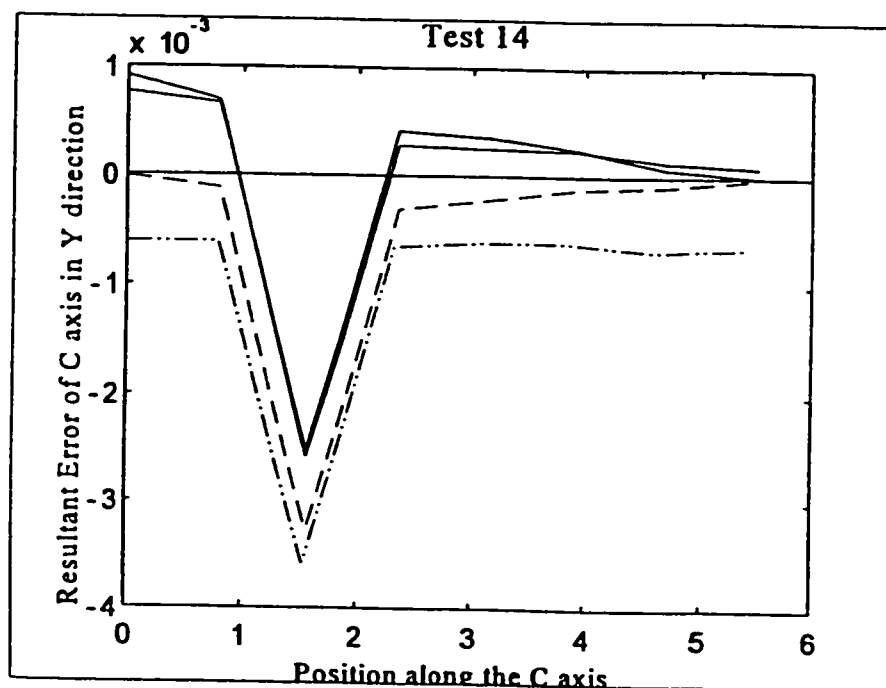
Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

— · — · — représentation des erreurs résultantes de l'axe C en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

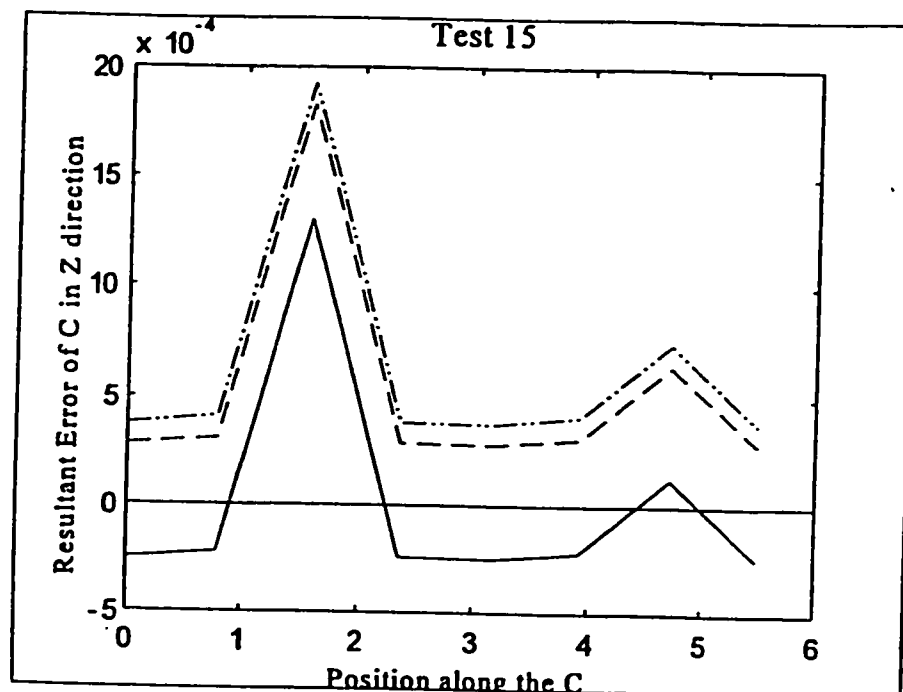
Résultats du test de l'axe C dans la direction Y, MITSUI SEIKI



Légende:

- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)
- ___ représentation des erreurs résultantes de l'axe C en présence d'une erreur d'alignement
- _____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

Résultats du test de l'axe C dans la direction Z, MITSUI SEIKI



Légende:

----- représentation des erreurs résultantes de l'axe C quand l'erreur d'alignement de l'artefact est nulle (tous les axes sont dégradés)

___ représentation des erreurs résultantes de l'axe C en présence d'une erreur d'alignement

_____ représentation de la sortie du processeur de niveau 1 pour les deux courbes d'avant (les deux sorties du processeur coïncident)

**ANNEXE D: MATRICE DE SENSIBILITÉ DE LA
MACHINE-OUTIL MITSUI SEIKI**

	$\theta_x(s)$	$\theta_y(s)$	$\theta_z(s)$	$\gamma_x(s)$	$\gamma_y(s)$	$\gamma_z(s)$
$\Omega_x(x)$, TEST 1	-1				✓	✓
$\Omega_y(x)$, TEST 2		-1		✓		✓
$\Omega_z(x)$, TEST 3			-1	✓	✓	
$\Omega_x(y)$, TEST 4	1				✓	✓
$\Omega_y(y)$, TEST 5		1		✓		
$\Omega_z(y)$, TEST 6			1	✓		
$\Omega_x(z)$, TEST 7	1				✓	✓
$\Omega_y(z)$, TEST 8		1		✓		
$\Omega_z(z)$, TEST 9			1	✓		
$\Omega_x(b)$, TEST 10	-1...1		-1...1	✓		✓
$\Omega_y(b)$, TEST 11		1		✓		✓
$\Omega_z(b)$, TEST 12	-1...1		-1...1	✓	✓	✓
$\Omega_x(c)$, TEST 13	-1...1	-1...1				✓
$\Omega_y(c)$, TEST 14	-1...1	-1...1				✓
$\Omega_z(c)$, TEST 15			1	✓	✓	

ANALYSE DES PARAMÈTRES CINÉMATIQUES MITSUI SEIKI

TEST 1	1	0	0	1	1	0	1
TEST 2	0	1	0	1	0	1	1
TEST 3	0	0	1	0	1	1	1
	$e_x(x) = \Delta\Omega_x(x)$	$e_y(x) = \Delta\Omega_y(x)$	$e_z(x) = \Delta\Omega_z(x)$	$e_x(x) \rightarrow S_1 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_x(x);$ $e_x(x) \rightarrow S_2 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_y(x)$	$e_x(x) \rightarrow S_1 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_x(x);$ $e_x(x) \rightarrow S_2 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_z(x)$	$e_x(x) \rightarrow S_1 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_y(x);$ $e_x(x) \rightarrow S_2 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_z(x)$	$e_x(x) \rightarrow S_1 \gamma_x(x) \rightarrow S_2 \gamma_x(x) = \Delta\Omega_x(x);$ —
TEST 4	1	0	0	1	1	0	1
TEST 5	0	1	0	1	0	1	1
TEST 6	0	0	1	0	1	1	1
	$e_x(y) = \Delta\Omega_x(y)$	$e_y(y) = \Delta\Omega_y(y)$	$e_z(y) = \Delta\Omega_z(y)$	$e_x(y) \rightarrow S_1 \gamma_x(y) \rightarrow S_2 \gamma_x(y) = \Delta\Omega_x(y);$ $e_x(y) = \Delta\Omega_y(y)$	$e_x(y) \rightarrow S_1 \gamma_x(y) \rightarrow S_2 \gamma_x(y) = \Delta\Omega_x(y);$ $e_x(y) = \Delta\Omega_z(y)$	$e_x(y) \rightarrow S_1 \gamma_x(y) = \Delta\Omega_y(y);$ $e_x(y) \rightarrow S_2 \gamma_x(y) = \Delta\Omega_z(y)$	$e_x(y) \rightarrow S_1 \gamma_x(y) \rightarrow S_2 \gamma_x(y) = \Delta\Omega_x(y);$ —
TEST 7	1	0	0	1	1	0	1
TEST 8	0	1	0	1	0	1	1
TEST 9	0	0	1	0	1	1	1
	$e_x(z) = \Delta\Omega_x(z)$	$e_y(z) = \Delta\Omega_y(z)$	$e_z(z) = \Delta\Omega_z(z)$	$e_x(z) \rightarrow S_1 \gamma_x(z) \rightarrow S_2 \gamma_x(z) = \Delta\Omega_x(z);$ $e_x(z) = \Delta\Omega_y(z)$	$e_x(z) \rightarrow S_1 \gamma_x(z) \rightarrow S_2 \gamma_x(z) = \Delta\Omega_x(z);$ $e_x(z) = \Delta\Omega_z(z)$	$e_x(z) \rightarrow S_1 \gamma_x(z) = \Delta\Omega_y(z);$ $e_x(z) \rightarrow S_2 \gamma_x(z) = \Delta\Omega_z(z)$	$e_x(z) \rightarrow S_1 \gamma_x(z) \rightarrow S_2 \gamma_x(z) = \Delta\Omega_x(z);$ —
TEST10	1	0	0	1	1	0	1
TEST11	0	1	0	1	0	1	1
TEST12	0	0	1	0	1	1	1
		$e_x(b) = \Delta\Omega_x(b)$	$\gamma_x(b) = \Delta\Omega_z(b)$	$e_x(b) = \Delta\Omega_y(b)$	$S_1 e_x(b) \rightarrow S_2 e_x(b) = \Delta\Omega_x(b);$ $S_1 e_x(b) \rightarrow S_2 e_x(b) \rightarrow S_2 \gamma_x(b) = \Delta\Omega_z(b)$	$e_x(b) \rightarrow S_1 \gamma_x(b) \rightarrow S_2 \gamma_x(b) = \Delta\Omega_x(b);$ $\gamma_x(b) = \Delta\Omega_z(b)$	$S_1 e_x(b) \rightarrow S_2 e_x(b) \rightarrow S_2 \gamma_x(b) \rightarrow S_2 \gamma_x(b) = \Delta\Omega_x(b);$ —
TEST13	1	0	0	1	1	0	1
TEST14	0	1	0	1	0	1	1
TEST15	0	0	1	0	1	1	1
			$e_x(c) \rightarrow S_1 \gamma_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_x(c);$	$S_1 e_x(c) \rightarrow S_2 e_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_x(c);$ $S_1 e_x(c) \rightarrow S_2 e_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_y(c)$	$S_1 e_x(c) \rightarrow S_2 e_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_x(c);$ $e_x(c) \rightarrow S_1 \gamma_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_z(c)$	$S_1 e_x(c) \rightarrow S_2 e_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_x(c);$ $e_x(c) \rightarrow S_1 \gamma_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_z(c)$	$S_1 e_x(c) \rightarrow S_2 e_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) \rightarrow S_2 \gamma_x(c) = \Delta\Omega_x(c);$ —

ANNEXE E: GUIDE DE L'UTILISATEUR (EN ANGLAIS)

CONTENTS

SECTION 1 - INTRODUCTION TO 'PERFORMANCE MONITORING'

1.1. First contact with 'PERFORMANCE MONITORING'

1.1.1. The structure

1.1.2. Start the session and understand the screen

1.2. Introduction to the basic functions

SECTION 2 - BASIC FUNCTIONS

2.1. Machine

2.1.1. New_machine

2.1.2. Activate_machine

2.1.3. Modify_machine

2.1.4. Delete_machine

2.2 Pallet

2.2.1. New_pallet

2.2.2. Activate_pallet

2.2.3. Modify_pallet

2.2.4. Delete_pallet

2.3. Probing

2.3.1. Strategy

2.3.2 Probing_data

2.3.2.1. Reference data

2.3.2.2. Actual data

2.4. Analysis

2.5. History

2.7. Parameters

2.6. Reset_lights

2.7. End

SECTION 3 - PROBLEMS THAT MIGHT APPEAR AND WAYS TO AVOID THEM

3.1. Creating new machines or new pallets

3.2. Deleting machines or pallets

3.3. Introducing new probing data

3.4. Restarting the session when an unjustified error is signaled on the screen.

SECTION 1 - INTRODUCTION TO 'PERFORMANCE MONITORING'

'PERFORMANCE MONITORING' is a prototype application consisting of a files package developed in the MATLAB with SIMULINK environment.

The MATLAB environment is very well fitted for high-performance numeric computation and visualization, integrating numerical and matrix computation and graphics.

1.1. First contact with 'PERFORMANCE MONITORING'

How to save the prototype application in your computer

This application runs in the MATLAB environment. The files that you want to use have to be saved in the *.m files directory of MATLAB that you currently use or in the *.m files directory that is specified in the startup.m file of your MATLAB version.

The prototype application comes in one diskette. Put the diskette in the A or B socket of your computer. Then save all the files from the diskette in your working directory of MATLAB, keeping the directory tree intact as it is on the diskette.

```
C:> save A:\*.*
```

After completion of the task verify if the application is completely saved and has an identical directory tree as the one on the diskette. This can be done using File Manager or Program Manager.

How to start the application

Enter the MATLAB Command Window and enter the monitor directory.

```
>> cd monitor
```

Type the word monitor and press ENTER.

```
>> monitor
```

1.1.1. The structure

The structure is represented in the FIGURE 1.

The root directories are the 'monitor' directory and one or more archive directories. The archive directories are storing all the specific files that are used in the main interface application.

After performing a new probing session, the data files should be stored in the archive directories before using them in the main interface application. When creating a new machine or when modifying an existing one, the new or modified calculation and data files should be promptly saved in the archive directories. This way of manipulating files should be considered the **rule number 1** for the best use of this application.

The main interface application gives the user the opportunity to create new machines or pallets, to modify or to delete existing machines and pallets. These functions are working directly on the file manager of your computer in the 'monitor' directory. These functions create, modify or delete directories together with the sub-directories and the files contained in them without any facility to undo, so that caution should be considered whenever choosing one of these functions. The use of the archive directories avoids destroying files that are not easy to recuperate otherwise.

1.1.2. Start the session and understand the screen

The interface appears as soon as you type the word 'monitor' in the MATLAB Command Window. The only button which is highlighted is the 'machine' button and it is the only one you can push.

At the beginning of the session, the buttons can be pushed only in chronological order.

Before pushing the buttons on the upper bar menu, we recommend to choose and highlight whether you are a 'system operator' or a 'operator' user. The difference is that as a 'system operator' you can create, modify or delete machines and pallets, while as an 'operator' you can only activate the existing machines or pallets. The switch between 'system operator' and 'operator' can be performed whenever you choose during the working session, but we recommend it at the beginning, as a caution against not-tested bugs.

SECTION 2 - BASIC FUNCTIONS

The basic functions of the 'MACHINE DIAGNOSIS' application are those which appear on the main upper bar menu of the interface window. The basic functions and the corresponding sub-functions are:

- 'Machine'
 - 'New machine'
 - 'Activate machine'
 - 'Modify machine'
 - 'Delete machine'

- 'Pallet'
 - 'New pallet'
 - 'Activate pallet'
 - 'Modify pallet'
 - 'Delete pallet'

- 'Probing'
 - 'Strategy'
 - 'Probing data'
 - 'Reference'
 - 'Actual'

- 'Analysis'

- 'History'

- 'Parameters'

- 'Reset_lights'

- 'End'

2.1. Machine

After you push the 'Machine' button, you can choose to create a new machine, or to activate, modify or delete one of the existing machines listed on the screen.

2.2. Pallet

This button is available only after an existing machine is chosen or a new machine is created. After you push the 'Pallet' button, you can choose to create a new pallet, or to activate, modify or delete one of the existing pallets listed for the machine specified in the previous step.

The 'Pallet' button implies the probing strategy procedure. If you want to load another probing strategy on the same pallet or artifact, you have to create a new pallet.

2.3. Probing

After choosing the machine and the pallet, this button is highlighted.

When the machine and the pallet were defined in a previous working session, the 'Probing strategy' label has a mark at its left, as well as the 'Reference data' label. The 'No. of actual probing' label is followed by the number of actual data which were loaded for that pallet.

2.3.1. Strategy

When the pallet (or the machine and the pallet) is newly created, you have to push the sub-button 'Strategy'. The File Manager is executed and its window appears on the screen. You can scroll through the directories and load the strategy that you wish. Of course, we recommend that you look for a file that is stored in your archive directories.

Attention: the name of the file that you want to load should be different from "strategy.m". The main application will load your chosen file and will save it in the current directory of the pallet naming it "strategy.m".

When loading is successful, a mark will appear at the left of the 'Probing strategy' label.

2.3.2. Reference data

Next, you have to load the reference data, which can be the nominal data or the data stored after a probing session which we want to consider as reference. When pushing the sub-button 'Reference', the File Manager window will appear on the screen. When you double-click on your reference data file in the archives, a comment window pops-up:

"You have to save all your calculation files in the current pallet directory."

You have to execute File Manager in another active window of your terminal and copy all the files stored from the calculation archive directory of your specific machine to the directory of the current pallet in your interface application.

example: `'copy \om60\calcul\*. * \monitor\mach_33\palt_3\*. * '`

Then you can load your reference data. When loading is successful, a mark will appear at the left of the 'Reference data' label. The data file is copied in the current pallet directory with the name 'ref.dat' (in the example in "\monitor\mach_33\palt_3\ref.dat").

2.3.3. Actual data

The same procedure is followed for the loading of the actual data as for the loading of the reference data. The data file is copied in the current pallet directory with the name 'actual*.dat' where the * is replaced with the number counted for the probing data file on the pallet.

2.4. Analysis

This function is available only after completion of all the previous steps. A successful functioning is the coloring of one of the traffic lights. The run of this function needs 30 to 60 seconds of waiting.

If you want to perform another analysis for different part features, you don't need to create a new machine or a new pallet. Look for the 'featbank.m' file in the current pallet directory and change it with another file with the same name. Don't forget to keep track of these changes in the archives. Then push the 'Reset_lights' button and push again the 'Analysis' button.

2.5. History

This function performs graphics of the variation of error measured by each test on the pallet. The abscissa represents the counting of the probed points (point no.1, no.2, and so on) and the ordinate represents the values of the error variation, in inches. The green curve represents the processed errors of the reference probing session and the yellow ones are the processed errors of all the previous probing sessions to the present one.

2.7. Parameters

This function takes as input the three graphics which are specific for each moving axis and outputs the key parameters or key parameter sets which are causing the deterioration of the axis.

The function requires the human intervention. After the 'History' step, the operator will visualize the actual error variations of each axis in three graphics, one for each of the linear directions x, y, and z. He will appreciate which of the graphics shows a deterioration with respect to a past variation chosen as reference. The operator will input '1' when the variation shows a significant change and '0' when there is no change with respect to the reference. For example, if the first and the third graphic show geometric changes in their respective variations, but the second graphic lies on the reference one in

between some given limits ($\text{ref} \pm 0.001$ "), then the input for the 'Parameters' function is '101'.

2.6. Reset lights

This button performs the switching off of the traffic lights.

2.7. End

This function ends the monitoring application.

SECTION 3- PROBLEMS THAT MIGHT APPEAR AND WAYS TO AVOID THEM

3.1. Creating new machines or new pallets

Whenever you create a new machine or a new pallet you will remark on the screen that the image is not stable during the 3 to 4 seconds while running the function. This is due to some sensitivity of Windows 3.1 when performing File Manager functions in a MATLAB environment and has no consequences on the functioning of the application.

3.2. Deleting machines or pallets

When deleting machines or pallets the same remark as before can be noticed. For reasons that are very similar to the reasons mentioned above, sometimes a window of '**Error! This application must be closed**' will pop out that will force you to close MATLAB. Don't worry, the machines or the pallets that you have previously created are still there. When you re-open MATLAB, check out if the pallet that you wanted to delete is still present. Normally, the 'Delete' function performed very well and completed its task.

3.3. Introducing new probing data

When wrongly using the application, the error is signaled as a double horn. You can check for some explanation of the error in the MATLAB Command Window. The usual causes of errors when introducing new probing data are:

- the format of the date and machine name written on the first line of the data file (*.dat) is wrong;

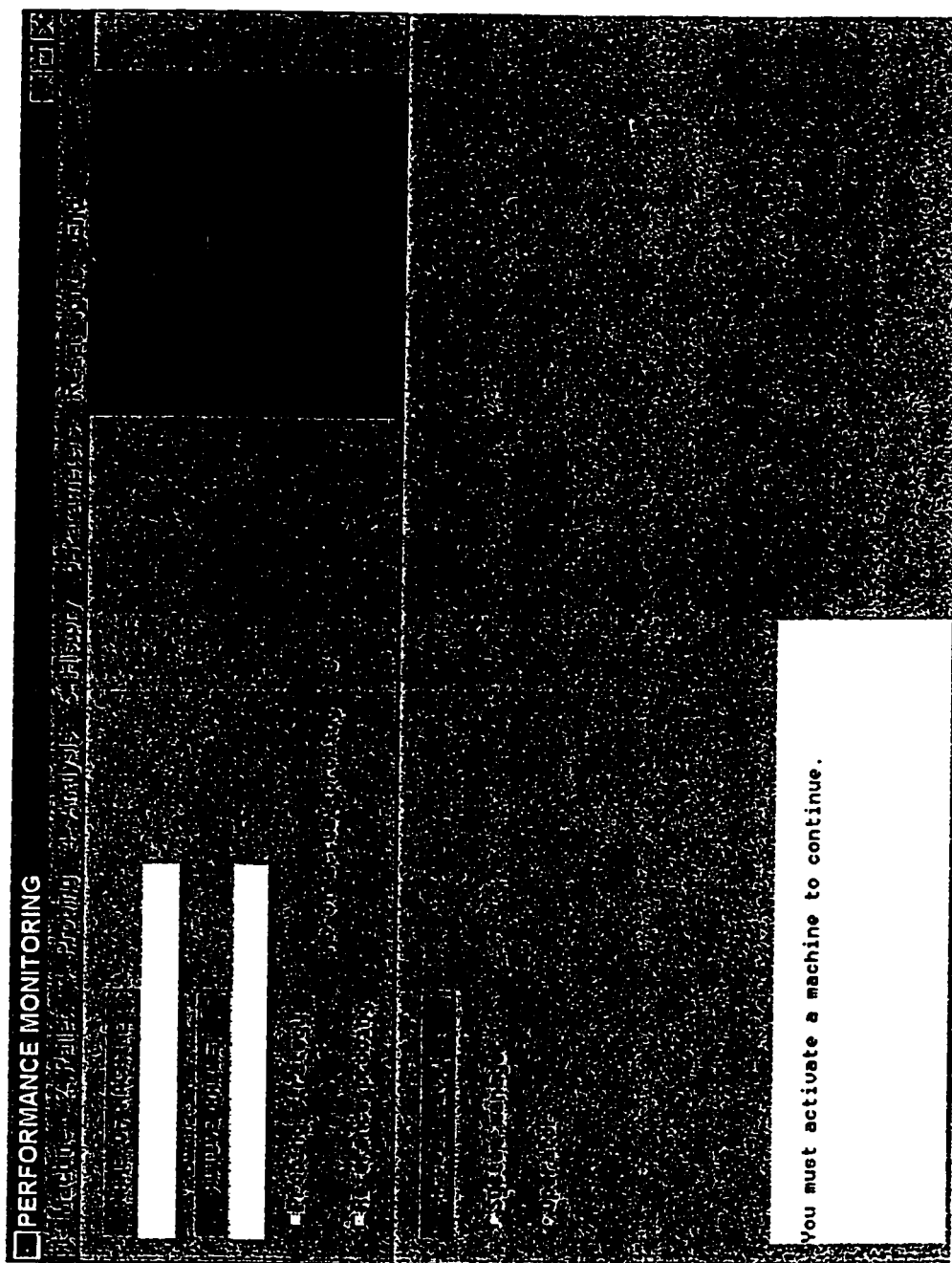
- the number of points in one of the tests is not the same as in the reference data file ('ref.dat') or in the 'strategy.m' file;
- the number of tests is wrong;
- a writing error occurred in the new data file (for example an extra blank space);

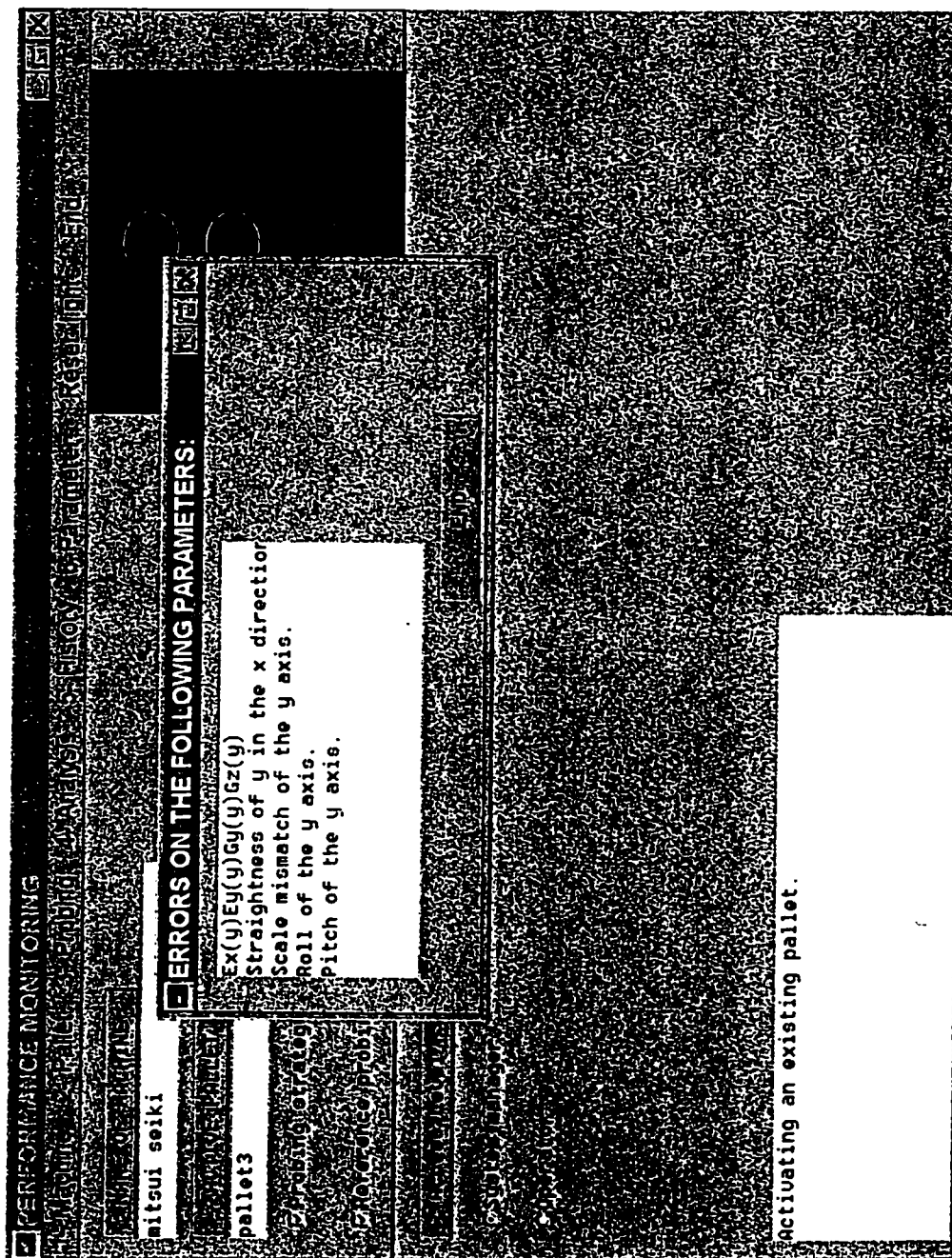
3.4. Restarting the session when an unjustified error is signaled on the screen

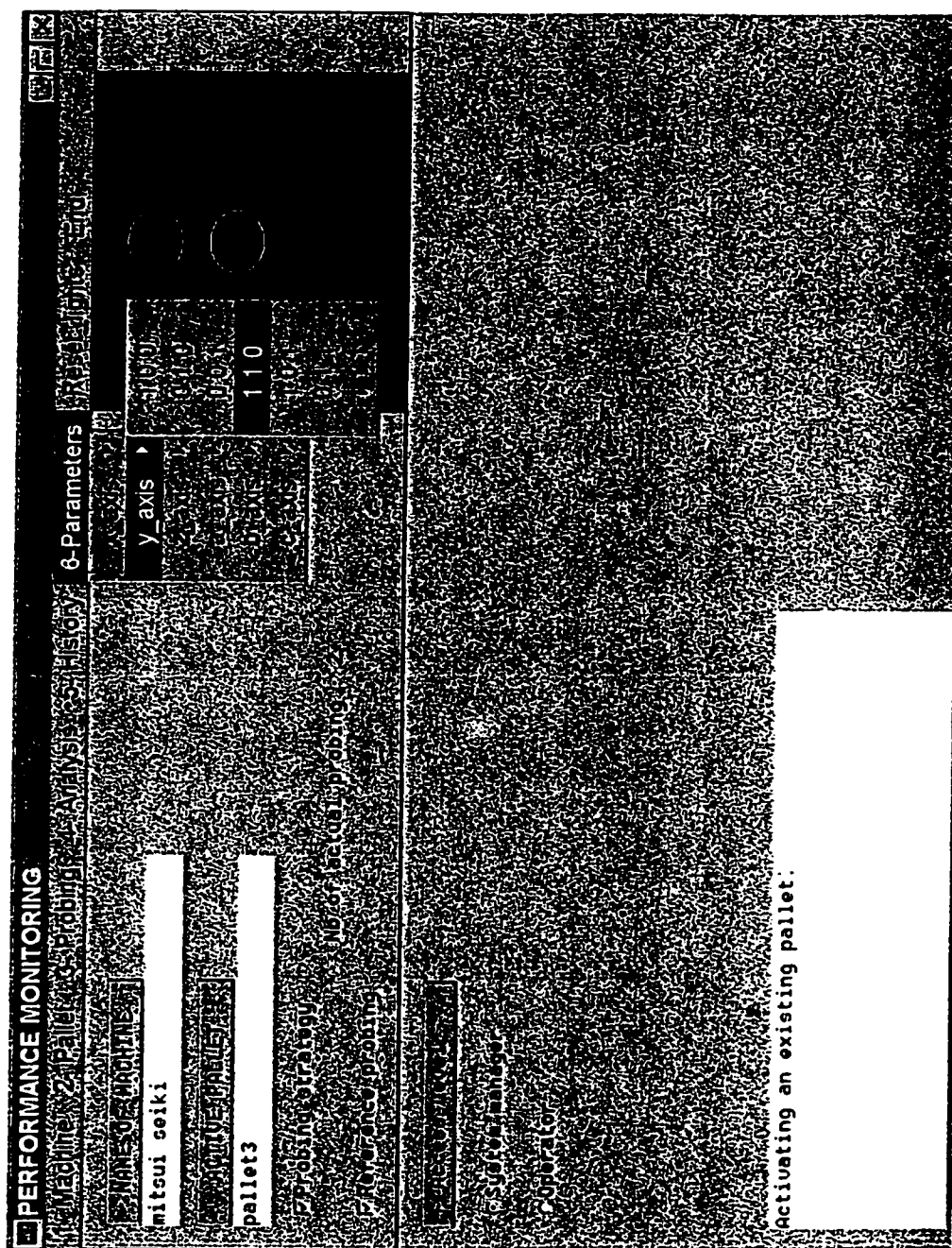
When an error is signaled and the source of the error is apparently not due to your own manipulation of data, then we recommend to close the application. If the 'End' function doesn't respond, then enter the MATLAB Command Window and type:

```
>> close      ENTER  
>> clear all  ENTER
```

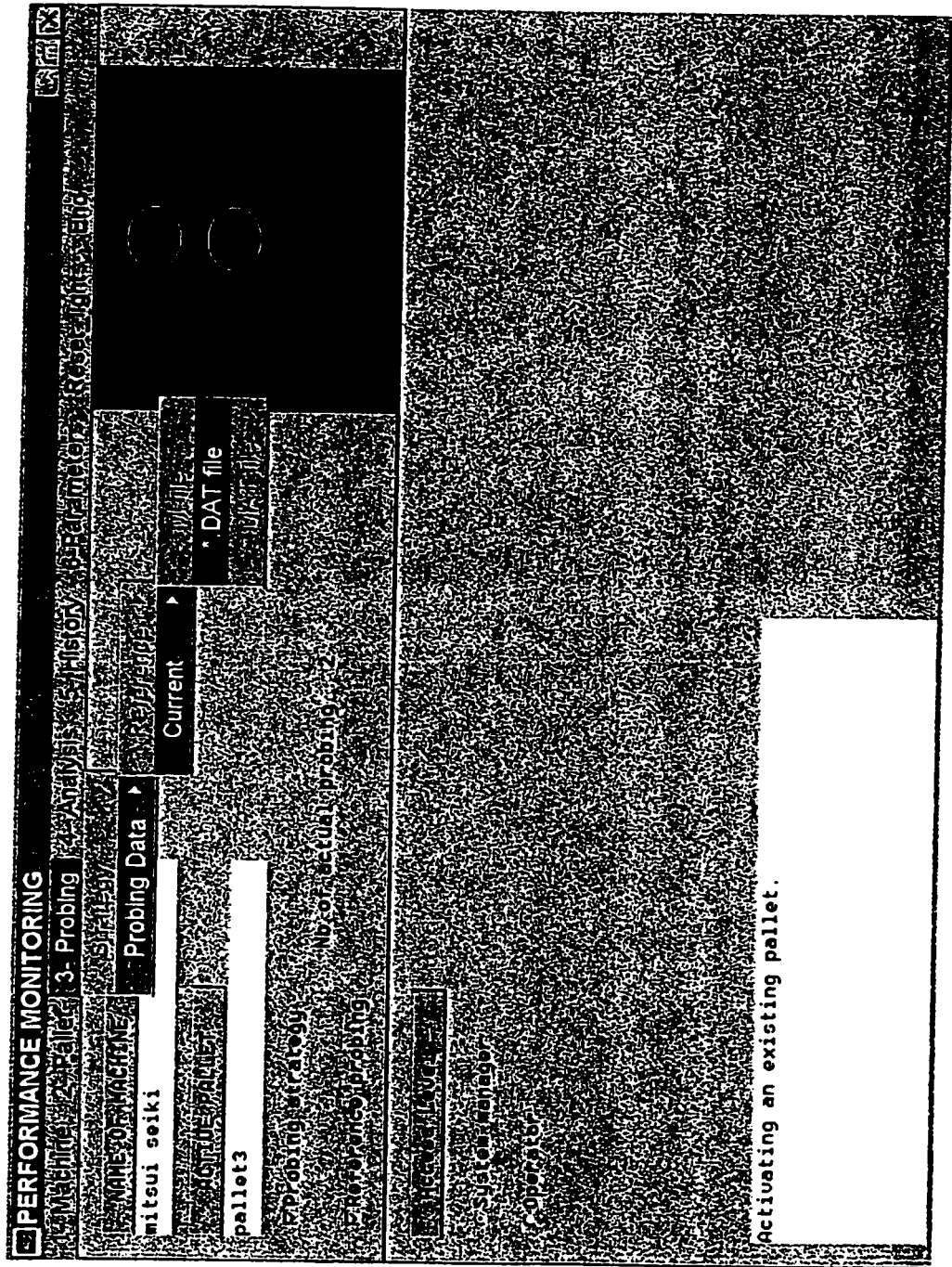
The application will close together with all the created windows or graphics.

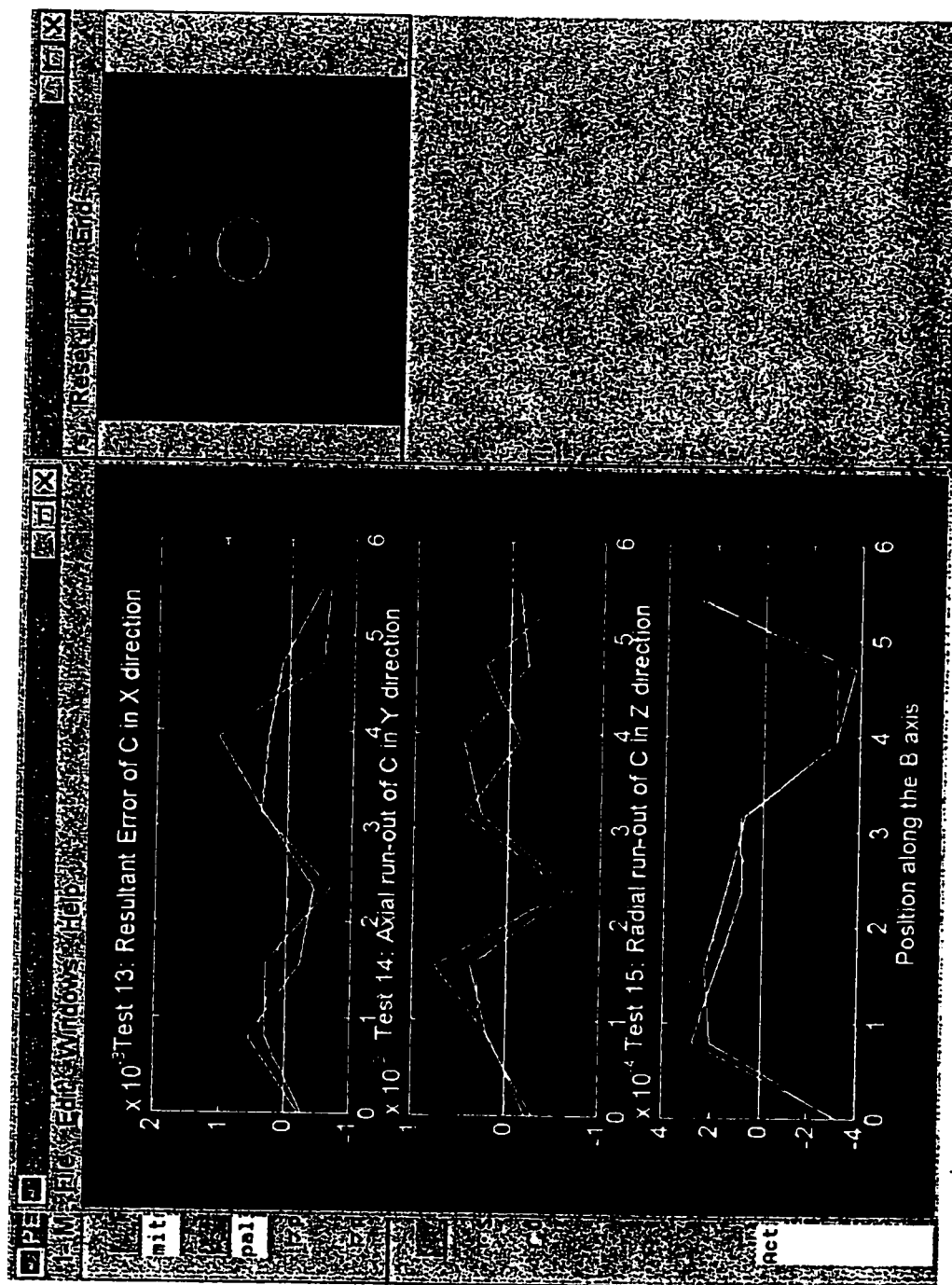


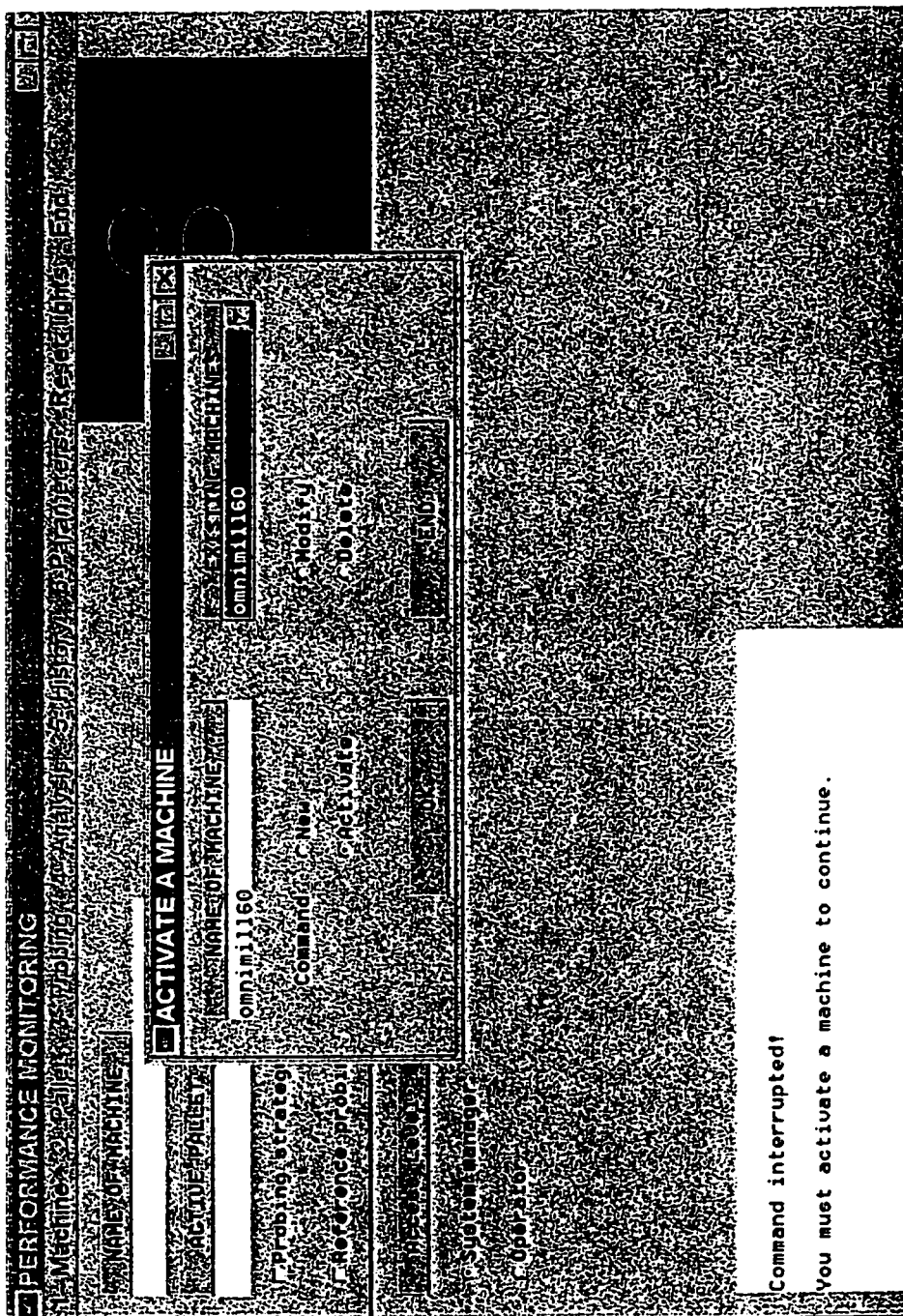




PERFORMANCE MONITORING	
Machine	Robot
Machine 2	Robot 3
NAME OF MACHINE mitai seiki PALETTE DATA pallet3 PROBING METHOD NO OF ACTUAL PROBING PROBING TIME 0.00000000 PROBING COUNT 0.00000000	
Command interrupted! Continue with current machine.	

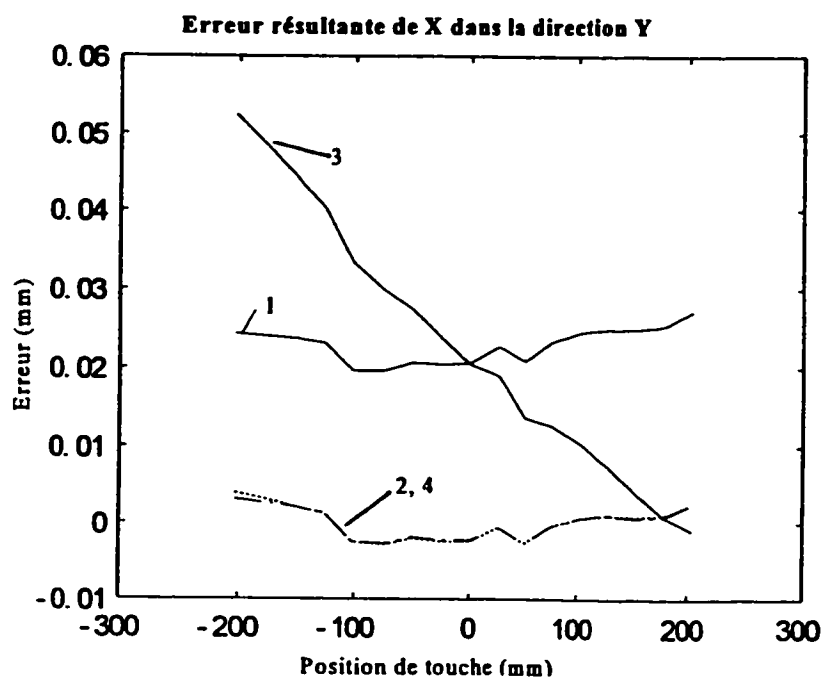






ANNEXE F: REPRÉSENTATION DES ERREURS RÉSUŁTANTES DES AXES DE MOUVEMENT X ET Y, MATSUURA

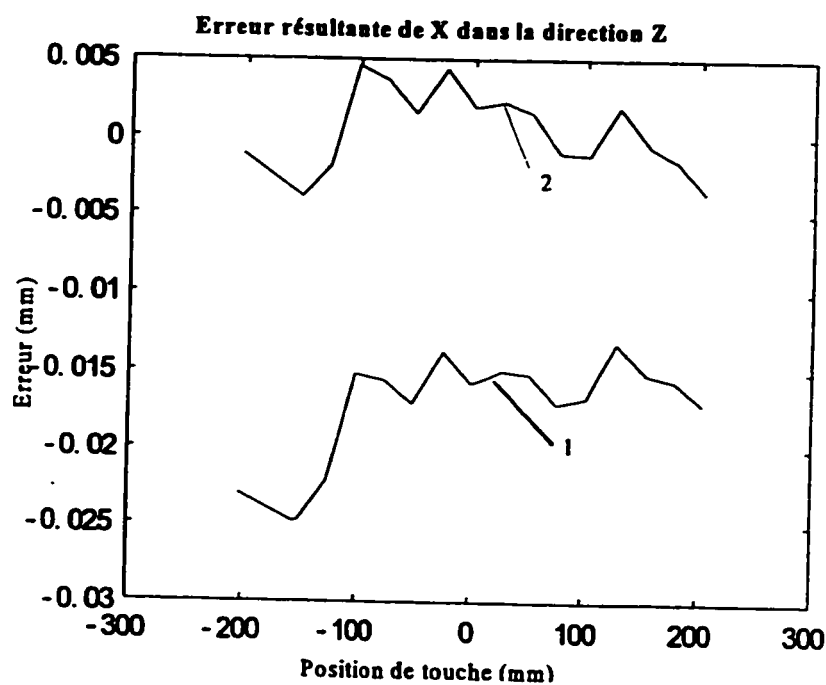
Résultats du test de l'axe X dans la direction Y, MATSUURA



Légende:

- 1 représentation des données palpées de l'axe X dans la direction Y
- 2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après le traitement par le processeur
- 3 représentation des erreurs calculées dans les points de palpé à partir des paramètres géométriques des axes identifiés par la plaque à trous
- 4 représentation des valeurs de la courbe 3 obtenues suite au traitement par le processeur.

Résultats du test de l'axe X dans la direction Z, MATSUURA



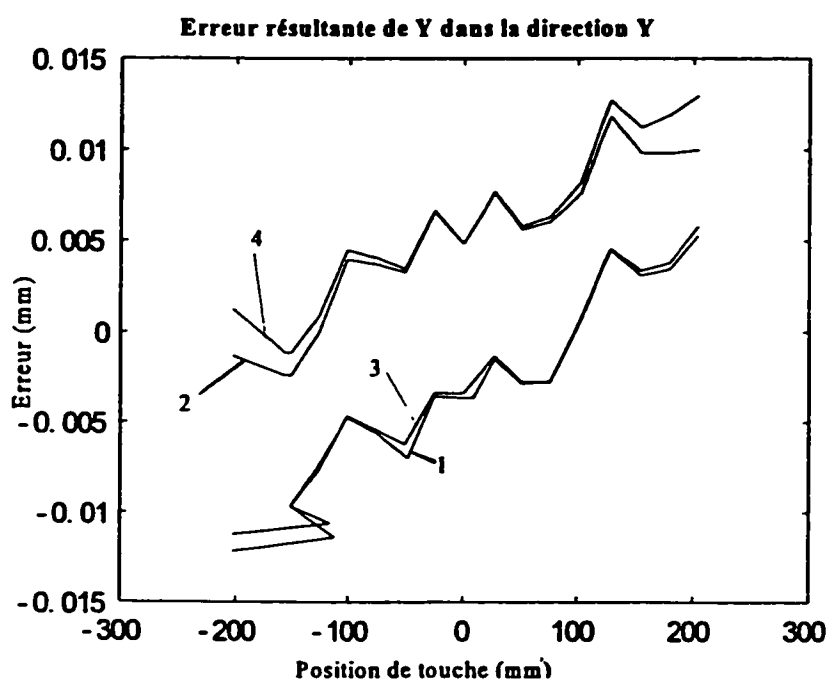
Légende:

1 représentation des données palpées de l'axe X dans la direction Z

2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après la traitement par le processeur

Les courbes 3 et 4 ne sont pas disponibles parce que les paramètres géométriques de l'axe Z n'ont pas été identifiés.

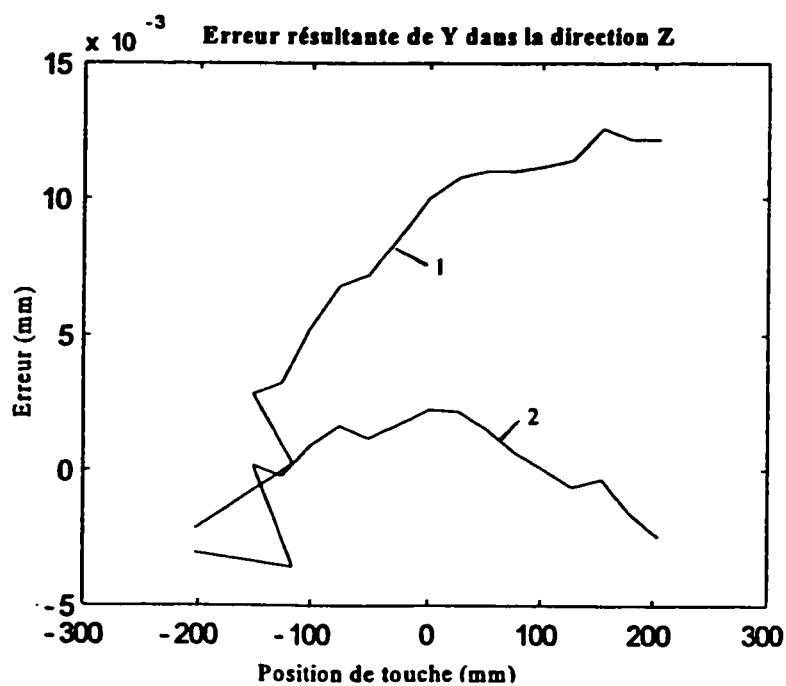
Résultats du test de l'axe Y dans la direction Y, MATSUURA



Légende:

- 1 représentation des données palpées de l'axe Y dans la direction Y
- 2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après la traitement par le processeur
- 3 représentation des erreurs calculées dans les points de palpé à partir des paramètres géométriques des axes identifiés par la plaque à trous
- 4 représentation des valeurs de la courbe 3 obtenues suite au traitement par le processeur.

Résultats du test de l'axe Y dans la direction Z, MATSUURA



Légende:

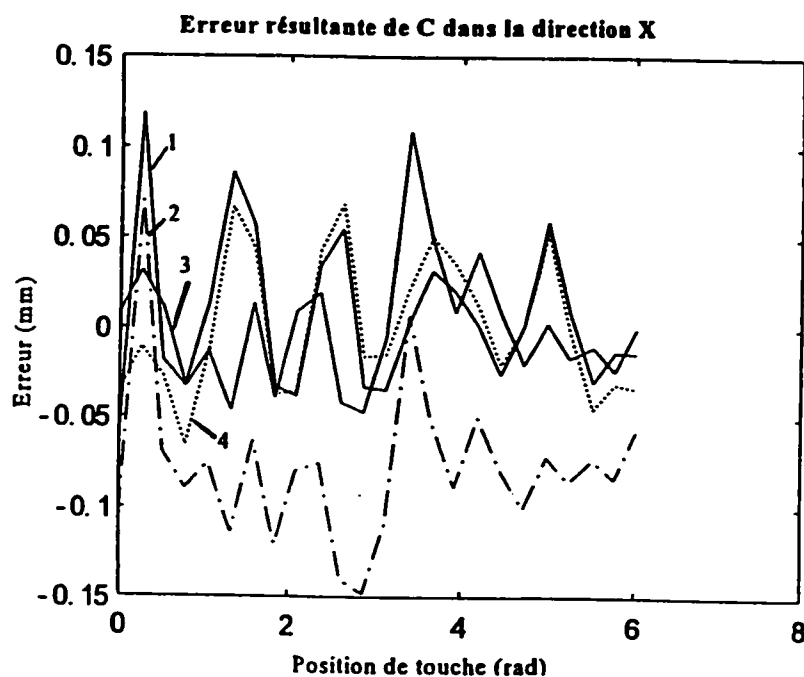
1 représentation des données palpées de l'axe Y dans la direction Z

2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après la traitement par le processeur

Les courbes 3 et 4 ne sont pas disponibles parce que les paramètres géométriques de l'axe Z n'ont pas été identifiés.

ANNEXE G: REPRÉSENTATION DES ERREURS RÉULTANTES DE L'AXE DE MOUVEMENT C, MATSUURA

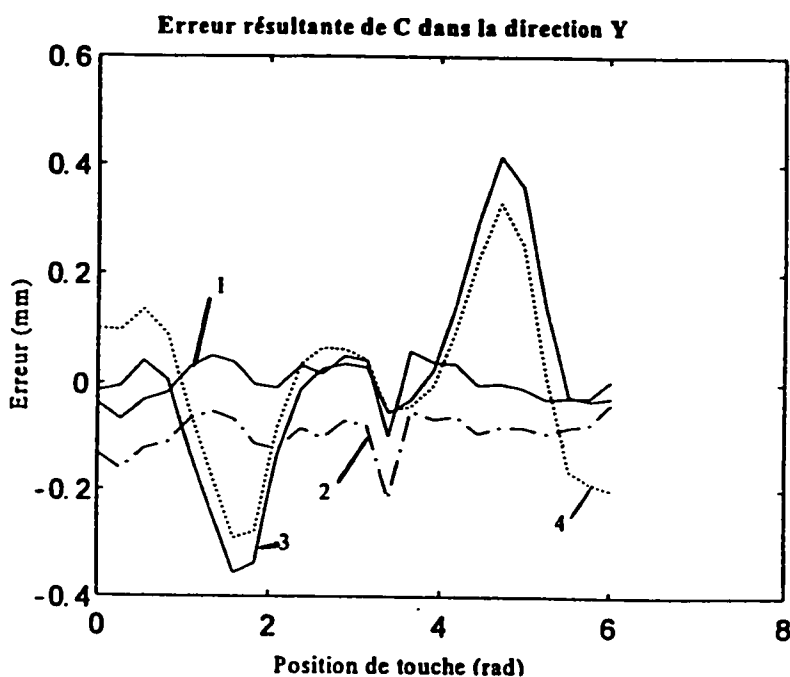
Résultats du test de l'axe C dans la direction X, MATSUURA



Légende:

- 1 représentation des données palpées sur l'artefact selon l'axe C dans la direction X
- 2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après la traitement par le processeur et ensuite re-centrees par rapport a l'axe.
- 3 représentation des erreurs calculées dans les points de palpéage à partir des paramètres géométriques des axes identifiés par la plaque à trous
- 4 représentation des valeurs de la courbe 3 obtenues suite au traitement par le processeur.

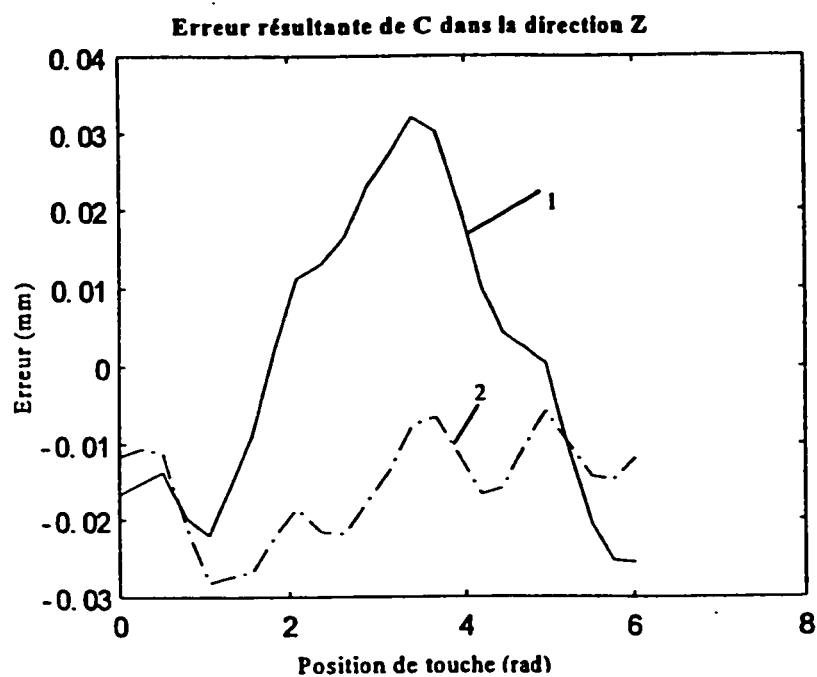
Résultats du test de l'axe C dans la direction Y, MATSUURA



Légende:

- 1 représentation des données palpées sur l'artefact selon l'axe C dans la direction Y
- 2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après la traitement par le processeur et ensuite re-centrées par rapport à l'axe.
- 3 représentation des erreurs calculées dans les points de palpé à partir des paramètres géométriques des axes identifiés par la plaque à trous
- 4 représentation des valeurs de la courbe 3 obtenues suite au traitement par le processeur.

Résultats du test de l'axe C dans la direction Z, MATSUURA



Légende:

- 1 représentation des données palpées sur l'artefact selon l'axe C dans la direction Z
 - 2 représentation des erreurs de la courbe 1 obtenues après la traitement par le processeur et ensuite re-centrees par rapport a l'axe.
- Les courbes 3 et 4 ne sont pas disponibles.

**ANNEXE H: RÉSULTATS DU PROCESSEUR DE NIVEAU 3
SUR LA PIÈCE SPÉCIALE, MATSUURA**

Élément géométrique	Direction de l'erreur	Valeur de l'erreur (mm)
TROU 1, T1	x	-0.0019
	y	-0.0025
	z	0.0039
TROU 2, T2	x	-0.0008
	y	0.0918
	z	-0.0252
TROU 3, T3	x	-0.0010
	y	0.0199
	z	0.0036
TROU 4, T4	x	-0.0001
	y	0.0139
	z	0.0060
POINT M1	x	-0.0018
	y	-0.0005
	z	0.0036
POINT M2	x	-0.0018
	y	-0.0006
	z	0.0037
POINT M3	x	-0.0012
	y	-0.0002
	z	0.0037
POINT M4	x	-0.0022
	y	-0.0047
	z	0.0029
POINT M5	x	-0.0021
	y	-0.0047
	z	0.0028
POINT M6	x	-0.0016
	y	-0.0053
	z	0.0028
POINT M7	x	-0.0004
	y	0.0252
	z	0.0001

POINT M8	x	-0.0004
	y	0.0245
	z	0.0023
POINT M9	x	0.0002
	y	0.0330
	z	0.0022
POINT M10	x	-0.0010
	y	0.0144
	z	0.0045
POINT M11	x	-0.0009
	y	0.0140
	z	0.0055
POINT M12	x	-0.0004
	y	0.0187
	z	0.0054